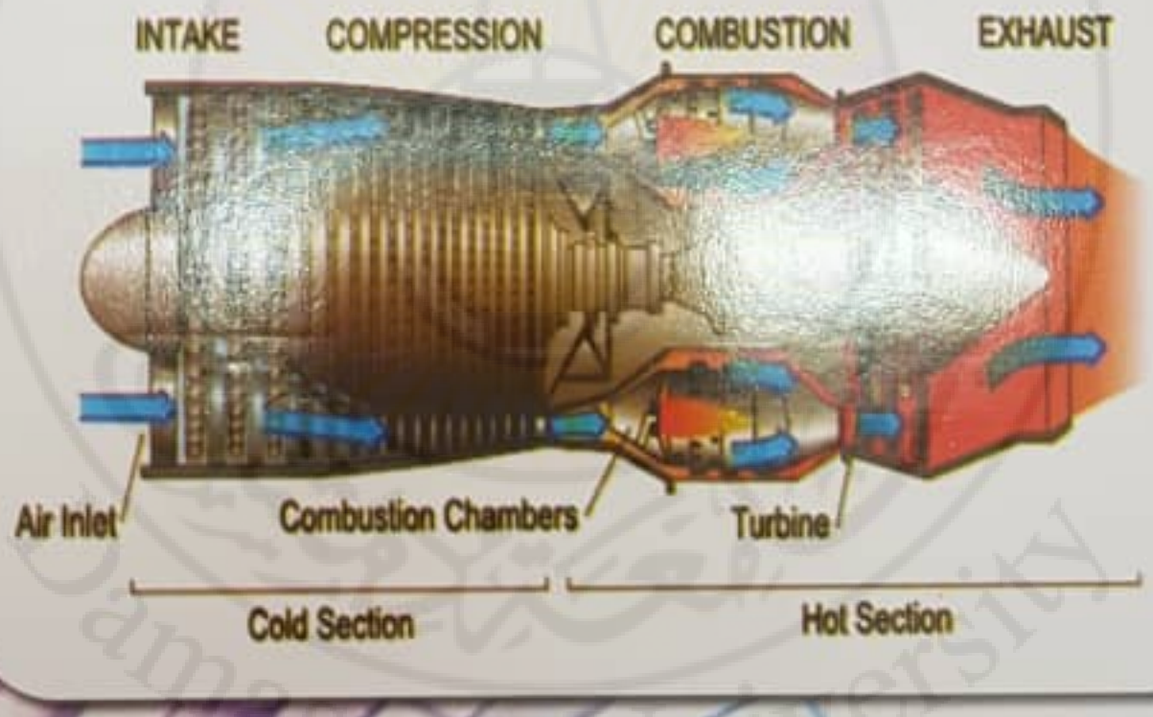
منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

الترموديناميك -٢-

التطبيقات الترموديناميكية

Applied Thermodynamic



الدكتور بسام بدران
أستاذ مساعد في قسم هندسة الميكانيك العام

الدكتور عيسى مراد
أستاذ مساعد في قسم هندسة الميكانيك العام

١٤٣٨ - ١٤٣٩ هـ
٢٠١٦ - ٢٠١٧ م

جامعة دمشق

الفصل الأول

Chapter One

الإكسرجي (مقياس العمل الكامن)

Exergy (Measure of Potential Work)

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
A	مساحة مقطع	m^2
c_v	الحرارة النوعية عند حجم ثابت	$J/kg\ K$
COP	معامل الأداء	لا بعدي
COP_{rev}	معامل الأداء لدورة عكوسة	لا بعدي
D	قطر أسطوانة	m
E	الطاقة الكلية	J
ΔE_{sys}	التغير في الطاقة لنظام	J
e	الطاقة الكلية النوعية	J/kg
e_{out}	الطاقة الكلية الخارجة النوعية	J/kg
e_{in}	الطاقة الكلية الداخلة النوعية	J/kg
g	تسارع الجاذبية الأرضية	m/s^2
H	الإنتالبي	J
h	الإنتالبي النوعي	J/kg
h_{out}	الإنتالبي الخارج النوعي	J/kg
h_{in}	الإنتالبي الداخل النوعي	J/kg
I	الضياعات	J/kg
m	الكتلة	kg
$\dot{m}$	تدفق كتلي	kg/s
P	الضغط	kPa
P_{out}	ضغط الحالة الميتة أو المحيط	kPa
pe	الطاقة الكامنة النوعية	J/kg

Q	كمية الحرارة	J
Q_k	كمية الحرارة عند نقطة معينة	J
$\dot{Q}_k$	معدل تغيير كمية الحرارة عند نقطة معينة	W
$\dot{Q}_{in}$	معدل تغيير كمية الحرارة الداخلة	W
$\dot{Q}_{out}$	معدل تغيير كمية الحرارة الخارجة	W
δQ	تغيير كمية الحرارة	J
S	الإنتروبي	J/K
s	الإنتروبي النوعي	$J/kg\ K$
s_i, s_{in}	إنتروبي الدخول	$J/kg\ K$
s_e, s_{out}	إنتروبي الخروج	$J/kg\ K$
S_{out}	الإنتروبي الحالة الميتة	J/K
S_{gen}	إنتروبي التوليد	J/K
$\dot{S}_{gen}$	معدل تغيير إنتروبي التوليد	W/K
ΔS	التغير في الإنتروبي لعملية	J/K
ΔS_{sys}	التغير في إنتروبي لنظام ما	J/K
dS	التغير في الإنتروبي لخطوة صغيرة	J/K
ds	التغير في الإنتروبي النوعي	$J/kg\ K$
t	الزمن	s
dt	تغيير الزمن	s
T	درجة الحرارة	K أو °C
T_k	درجة حرارة نقطة دخول الحرارة	K أو °C
T_H	درجة الحرارة العليا في دورة كارنو المثالية	K أو °C
T_L	درجة الحرارة الدنيا في دورة كارنو المثالية	K أو °C
T_{out}	درجة حرارة الحالة الميتة أو المحيط	K أو °C

T_{sink}	درجة الحرارة المصرف	K أو ℃
T_{source}	درجة الحرارة المنبع	K أو ℃
U	الطاقة الداخلية	J
u	الطاقة الداخلية النوعية	J/kg
dU	التغير في الطاقة الداخلية	J
du	التغير في الطاقة الداخلية النوعية	$J/\,kg$
V	الحجم	m^3
dV	تغيير الحجم	m^3
dV_{sys}	تغيير الحجم بالنسبة إلى نظام ما	m^3
v	الحجم النوعي	m^3/kg
dv	تغيير الحجم النوعي	m^3/kg
V	السرعة	m/s
W	العمل الكلي	J
$\dot{W}$	معدل تغيير العمل الكلي	W
W_{surr}	عمل الوسط المحيط	J
W_w	عمل الوزن	J
W_{fr}	عمل الاحتكاك	J
W_{useful}	العمل المفيد	J
$W_{useful,in}$	العمل المفيد الداخل إلى النظام	J
$W_{useful,out}$	العمل المفيد الخارج من النظام	J
$\dot{W}_{net,out}$	معدل تغيير العمل الصافي (المفيد) الخارج	W
δW_{useful}	التغير في العمل المفيد	J
$\delta W_{total,useful}$	التغير في العمل المفيد الكلي	J
δW_{HE}	التغير في عمل المحرك الحراري	J

W_{rev}	العمل العكوس	J
$\dot{W}_{rev}$	معدل تغيير العمل العكوس	W
$\dot{W}_{rev,in}$	معدل تغيير العمل العكوس الداخل إلى النظام	W
$\dot{W}_{rev,out}$	معدل تغيير العمل العكوس الخارج من النظام	W
W_{in}	العمل المقدم إلى النظام	J
W_{out}	العمل المستخرج من النظام	J
X	الإكسرجي	J
ΔX	التغير في الإكسرجي خلال عملية ما	J
dX	التغير في الإكسرجي خلال خلال خطوة صغيرة	J
ΔX_{system}	التغير في الإكسرجي خلال عملية لنظام	J
dX_{sys}	التغير في الإكسرجي خلال خطوة صغير لنظام	J
$\Delta X_{isolated}$	التغير في الإكسرجي خلال عملية لنظام معزول	J
$\dot{X}$	معدل تغيير في الإكسرجي	W
$\dot{X}_{in}$	معدل تغيير في الإكسرجي الداخل إلى النظام	W
$\dot{X}_{out}$	معدل تغيير في الإكسرجي الخارج من النظام	W
$X_{destroyed}$	الإكسرجي المدمر	J
$\dot{X}_{destroyed}$	معدل تغيير الإكسرجي المدمر	W
X_{heat}	الإكسرجي انتقال الحرارة	J
$\dot{X}_{heat}$	معدل تغيير الإكسرجي انتقال الحرارة	W
X_{work}	الإكسرجي انتقال العمل	J
$\dot{X}_{work}$	معدل تغيير الإكسرجي انتقال العمل	W
X_{mass}	الإكسرجي انتقال الكتلة	J
$\dot{X}_{mass}$	معدل تغيير الإكسرجي انتقال الكتلة	W
x	الإكسرجي النوعي	J/kg

x_{pe}	الإكسرجي النوعي الموافق للطاقة الكامنة	J/kg
x_{ke}	الإكسرجي النوعي الموافق للطاقة الحركية	J/kg
x_{in}	الإكسرجي النوعي عند الدخول	J/kg
x_{out}	الإكسرجي النوعي عند الخروج	J/kg
x_{heat}	الإكسرجي النوعي لانتقال كمية من الحرارة	J/kg
x_{work}	الإكسرجي النوعي لانتقال العمل	J/kg
x_{mass}	الإكسرجي النوعي لانتقال كتلة	J/kg
$x_{mass,in}$	الإكسرجي النوعي عند دخول الكتلة	J/kg
$x_{mass,out}$	الإكسرجي النوعي عن خروج الكتلة	J/kg
x_{flow}	إكسرجي التدفق	J/kg
$x_{flowing\ fluid}$	إكسرجي تدفق السائل	J/kg
z	الارتفاع	m
ϕ	إكسرجي التدفق في نظام مغلق	J
$\Delta\phi$	التغير في إكسرجي التدفق خلال عملية ما لنظام مغلق	J
ψ	إكسرجي التدفق في نظام مفتوح	J
$\Delta\psi$	التغير في إكسرجي التدفق خلال عملية ما لنظام مفتوح	J
$\eta_{th,rev}$	المردود لدورة عكوسة	لا بعدي
η_{th}	المردود الحراري	لا بعدي
η_I	مردود القانون الاول أو المردود الحراري	لا بعدي
η_{II}	مردود القانون الثاني	لا بعدي

مقدمة الفصل.

التزايد في الوعي العالمي في الحفاظ على الطاقة جعل بعض الدول تراجع سياسات الطاقة التي تتبعها وتأخذ خطوات جريئة من أجل الحفاظ على هذه الطاقة وتقليل الهدر *Waste* فيها. هذه السياسات جعلت العلماء يعيدون النظر في الأجهزة الهندسية المستعملة وأدائها الطاقي وبدؤوا يبحثون عن معايير وطرائق للتوفير في الطاقة المستهلكة.

يقوم القانون الأول في الترموديناميك على تحقيق التوزان الطاقي لأي نظام ولكن القانون الأول لايعطينا أي إشارة عن كمية الطاقة المهدورة أو الضائعة. ويقوم القانون الثاني في الترموديناميك على معرفة نوعية الطاقة المستهلكة ويهتم بكمية الطاقة المهدورة خلال أي عملية يسلكها النظام من خلال تحليل بارامتر الإنتروبي *Entropy* وبارامتر توليد الإنتروبي *Entropy Generation* ضمن تلك الأنظمة. وفي هذا الفصل سنقوم بتعريف بارامتر جديد يسمى الإكسرجي *Exergy* أو الطاقة المتاحة أو الطاقة المتوفرة *Availability* والذي يقوم على تحديد العمل المفيد الأعظمي *Maximum Useful Work* التي يمكن أن نحصل عليها من أي نظام يخضع لعملية ما في وسط ما. الطاقة العظمى التي يمكن أن نحصل عليها تساوي العمل العكوس الذي يقوم به هذا النظام خلال تلك العملية. وسنعرف الإكسرجي المُدَمر *Exergy Destruction* والذي يساوي بالقيمة العمل الضائع *Lost Work* لنظام ما يقوم بعملية عكوسة كلية. وسنعرف أيضاً مردود القانون الثاني *Second Law Efficiency* ونتابع تحديد توازن الإكسرجي ودراسته في الأنظمة المغلقة والمفتوحة.

<u>الفائدة العلمية من الفصل</u>

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ فحص أداء الأجهزة الميكانيكية باستخدام مردود القانون الثاني في الترموديناميك.

- ✓ تعريف الإكسرجي، العمل الأعظمي المفيد، الذي يمكن أن يعطيه النظام خلال عملية ما.
- ✓ تعريف العمل العكوس، أيضا العمل الأعظمي المفيد، الذي يمكن أن يعطيه النظام بين حالة ابتدائية ونهائية خلال عملية ما.
- ✓ تعريف الإكسرجي المُدمر، العمل الضائع، الذي يصرفه النظام في العمليات غير العكوسة.
- ✓ تطبيق توازن الإكسرجي على الأنظمة المغلقة والمفتوحة.

محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.1	تعريف الإكسرجي.	28
2.1	العمل المفيد الأعظمي بمفهوم الإكسرجي.	32
3.1	مردود القانون الثاني.	38
4.1	التغير في الإكسرجي ضمن الأنظمة.	40
1.4.1	التغير في الإكسرجي في الأنظمة المغلقة.	41
2.4.1	التغير في الإكسرجي في الأنظمة المفتوحة.	46
5.1	انتقال الإكسرجي على شكل طاقة.	50
6.1	مبدأ تناقص الإكسرجي والإكسرجي الضائع.	51
7.1	توازن الإكسرجي في الأنظمة المغلقة.	52
8.1	توازن الإكسرجي في الأنظمة المفتوحة.	69
ملخص الفصل.		76
مسائل غير محلولة.		80
نهاية الفصل.		81

1.1 تعريف الإكسرجي *Exergy*.

يقوم الباحثون عند اكتشاف أي مصدر طاقي جديد على تقدير كمية الطاقة المحتواة في هذا المصدر فمثلاً يقول الباحثون في المعهد التكنولوجي في ماستيتوشس (*MIT*) إن الطاقة الجيوحرارية *Geothermal Energy* الموجودة على عمق 10 كيلومترات من سطح الأرض يمكن أن تزود الكرة الأرضية بطاقة كهربائية مستمرة ولمدة 1400 سنة من دون انقطاع. ولكن هذا التقدير غير كاف لأخذ القرار في بناء محطات لتوليد الطاقة الكهربائية *Power Plant* على تلك المواقع. يعتمد قرار بناء هذه المحطات الطاقية على مقدار العمل الكامن *Work Potential* أو العمل المفيد الذي يمكن استخراجه من هذا المصدر مطروحاً منه الطاقة المهدورة بحسب مقولة كالفن – بلانك لذلك يجب علينا إيجاد خاصية (بارامتر) تقوم على تحديد هذا العمل الكامن الموجود في ذلك المصدر الحراري واعتماده في تقييم مقدار العمل الكامن في ذلك المصدر. يسمى هذا البارامتر بالإكسرجي *Exergy* أو الطاقة المتاحة *Available Energy* أو اختصاراً *Availability*. العمل الكامن هنا هو العمل الأعظمي *Maximum Useful Work* الذي يمكن الحصول عليه من هذا النظام أو المصدر. هذا العمل الأعظمي هو تابع للحالة الابتدائية للمصدر وطريقة استخراج العمل منه والحالة النهائية للمصدر. وبشكل عام يمكن كتابة هذه العلاقة بالشكل

العمل الأعظمي = تابع (الحالة الابتدائية، الطريق المسلوك، الحالة النهائية)

- ✓ الحالة الابتدائية هي حالة معينة ومحددة وغير متغيرة.
- ✓ الطريق المسلوك هو الطريق الذي يسلكه النظام بشكل عكوس.
- ✓ الحالة النهائية هي الحالة التي يكون فيها النظام قد وصل إلى حالة توازن كامل مع المحيط وتسمى هذه الحالة بالحالة الميتة *Dead State*.

تعرف الحالة الميتة بأنها الحالة التي يكون فيها النظام قد وصل إلى حالة توازن حراري وميكانيكي (*Thermal & Mechanical Equilibrium*) مع المحيط (*Environment*) أي يكون النظام خالياً من الطاقة الحركية والكامنة ولايمكن أن يتفاعل كيميائياً (*Chemically Inert*) مع محيطه ولاتوجد فيه أي قوى مغناطيسية أو كهربائية أو أي قوى أخرى تجعله غير متوازن مع الوسط المحيط. شروط الحالة الميتة هي شروط الوسط المحيط بالنظام وبشكل عام توصف هذه الشروط بضغط جوي نظامي ($P_{out} = 1\ atm$) ودرجة الحرارة ($T_{out} = 25°C$). يكون الإكسرجي عند هذه الشروط مساوياً للصفر.

يعرف الإكسرجي بأنه العمل الأعظمي والذي يمكن أن يعطيه نظام ما بعملية عكوسة بين حالة ابتدائية معينة وشروط محيطه فمثلاً إكسرجي الطاقة الحركية هي الطاقة الميكانيكية يمكن تحويلها **بالكامل** إلى عمل مفيد. إكسرجي الطاقة الحركية في نظام ما يساوي إلى الطاقة الحركية نفسها

$$x_{ke} = ke = \frac{V^2}{2} \quad (kJ/kg) \qquad (1\text{-}1)$$

اما إكسرجي الطاقة الكامنة فهو

$$x_{pe} = pe = gz \quad (kJ/kg) \qquad (2\text{-}1)$$

المثال التطبيقي 1-1 – الطاقة الأعظمية من العنفات الهوائية.

يراد تركيب عنفة هوائية بقطر ($12\ m$) في منطقة. سرعة الهواء الوسطية في تلك المنطقة هي ($10\ m/s$). احسب العمل الكامن أو العمل الأعظمي الذي يمكن أن تولده هذه العنفة الهوائية في تلك المنطقة.

الفرضيات: الهواء ذو ضغط ($P_{out} = 1\ atm$) ودرجة الحرارة ($T_{out} = 25°C$) وكثافة ($\rho = 1.18\ kg/m^3$).

التحليل: يمكن الحصول على العمل الأعظمي للعنفة بفرض أن الهواء يخرج من العنفة بالشروط النظامية أي لاتوجد لديه أي سرعة بعد خروجه من العنفة.

$$W_{max} = \dot{m} * ke$$

الطاقة الحركية للهواء عند السرعة الابتدائية

$$x_{ke} = ke = \frac{V^2}{2} = \frac{\left(10\frac{m}{s}\right)^2}{2} = 0.05\frac{kJ}{kg}$$

أما تدفق الهواء فهو

$$\dot{m} = \rho * V * A = \rho * \frac{\pi D^2}{4} * V$$

$$\dot{m} = 1.18\frac{kg}{m^3} * \frac{\pi(12m)^2}{4} * \frac{10m}{s} = 1335\ kg/s$$

بالتعويض في علاقة العمل الأعظمي نجد أن

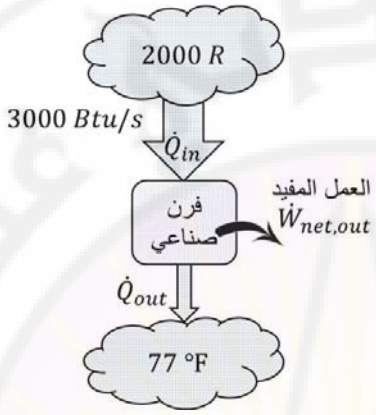
$$W_{max} = 1335\frac{kg}{s} * 0.05\frac{kJ}{kg}$$

$$W_{max} = 66.8\ kW$$

مناقشة:

الطاقة السابقة هي أعظم طاقة يمكن استخراجها من العنفة. ولكن بحسب قانون بتس *Betz's Law* أعظم طاقة يمكن إستجرارها من العنفة الهوائية تكون عندما تنخفض سرعة خروج الهواء من العنفة إلى الثلث. تتراوح المراديد للعنفات الهوائية بين 20 إلى 40 بالمئة وتكون العنفة الهوائية قابلة للاستثمار عندما تكون سرعة الهواء بحدود $(6m/s)$.

المثال التطبيقي 1–2 – العمل الأعظمي (الإكسرجي) من فرن صناعي.



تنتقل كمية في الحرارة بمقدار $(3000\ Btu/s)$ وبشكل مستقر إلى فرن صناعي بدرجة حرارة $(2000\ R)$. حدد معدل تدفق الإكسرجي إلى الفرن والتي تترافق مع انتقال الحرارة بفرض أن حرارة المحيط هي (77°F).

الفرضيات: 1) بما أن العمل الأعظمي هو عمل عكوس فيمكن أن نعد أن عملية انتقال الحرارة تتم من الفرن باتجاه الوسط الخارجي وليست بالعكس 2) الفرن يوجد بين مصدر حراري مرتفع بدرجة حرارة $(2000\ R)$ ومصدر حراري منخفض بدرجة حرارة المحيط $(77°\text{F} = 537\ R)$ كما في الشكل المرفق.

التحليل: معدل تدفق الإكسرجي يمثل العمل الأعظمي الذي يمكن الحصول عليه باعتبار أن الفرن بين المصدرين الحراريين

$$\eta_{th,rev} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{Q}_{in}}$$

$$\eta_{th,rev} = \frac{\dot{W}_{rev}}{\dot{Q}}$$

$$\dot{W}_{rev} = \eta_{th,rev} * \dot{Q}$$

يمكن حساب المردود الأعظمي من مردود كارنو في العلاقة

$$\eta_{th,max} = \eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_{out}}{T}$$

$$T_{out} = 77 + 460 = 537\ R$$

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{537}{2000}$$

$$\eta_{th,rev} = 0.732\ or\ 73.2\%$$

أي أن الفرن يحول ما يعادل 73.2 بالمئة من الطاقة المقدمة (كمية الحرارة) إلى عمل مفيد *Available Work*. بالتعويض في علاقة العمل نجد أن

$$\dot{W}_{rev} = 0.732 * 3000\,\frac{Btu}{s}$$

$$\dot{W}_{rev} = 2196\,\frac{Btu}{s}$$

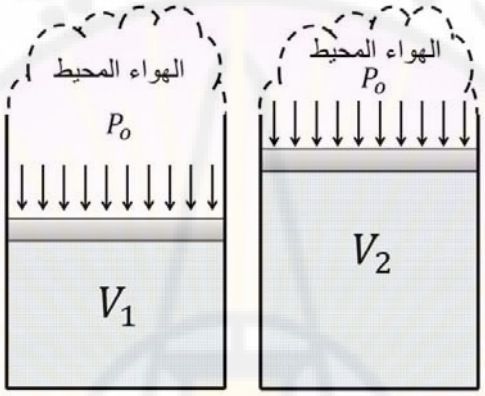
مناقشة:

كمية الحرارة غير المحولة إلى عمل هي $804\ Btu/s$ وهي تطرح على شكل ضياعات.

2.1 العمل المفيد الأعظمي بمفهوم الإكسرجي.

الإكسرجي هو بارامتر مهم في قياس نوعية العمل المقدم ويستخدم في مقارنة مصادر الطاقة المختلفة ولكنه غير كاف في دراسة الأجهزة الهندسية الحقيقية التي تعمل بين حالتين مختلفتين لأن الحالة النهائية في هذه الأجهزة قد لاتصل أبداً إلى الحالة الميتة. أيضاً المردود الإيزونتروبي والذي درس سابقاً غير كاف في تحديد كفاءة هذه الأجهزة لأن الحالة النهائية قد تكون بعيدة جداً عن الحالة المثالية. لوصف الحالات الحقيقية في الأجهزة الهندسية نقوم بتحدي العمل العكوس *Reversible Work* والضياعات *Irreversibility* (العمل غير العكوس) أو ماسيعرف لاحقا باسم الإكسرجي المُدمر *Exergy Destruction*. عند تمدد غاز معين ضمن نظام مغلق (أسطوانة – مكبس) بين الحالة الأولى (V_1) والحالة الثانية (V_2) فإن جزءاً من هذا العمل الكلي (W) سيصرف

على التغلب على الضغط الخارجي (P_{out}) الممارس من الهواء على سطح المكبس (W_{surr}) وعلى وزن المكبس (W_w) وعلى الاحتكاك بين المكبس وجدران الأسطوانة (W_{fr}) كما في الشكل (1−1).



الشكل (1−1) العمل الممارس على المحيط في نظام مغلق نتيجة تمدد الوسيط ضمن الأسطوانة.

يحسب العمل المفيد من العلاقة

$$W_{useful} = W - (W_{surr} + W_w + W_{fr})$$

يجب الانتباه إلى أن العمل المفيد يتحول إلى عمل الحدود (W_b) عند إهمال كافة الأعمال الممانعة في النظام

$$W_{useful} = W_b$$

يسمى العمل الذي يصرف في التغلب على الضغط الخارجي الممارس على سطح مكبس النظام بعمل المحيط *Surrounding Work* ويعطى بالعلاقة

$$W_{surr} = P_{out}(V_2 - V_1) \quad (kJ) \qquad (3\text{-}1)$$

بإهمال وزن المكبس والاحتكاك بين الأسطوانة والمكبس فيمكن أن نكتب علاقة العمل المفيد (*Useful Work*) بالشكل

$$W_{useful} = W - W_{surr} = W - P_{out}(V_2 - V_1) \quad (kJ) \qquad (4\text{-}1)$$

يجب أن نلاحظ من العلاقة (4−1) إلى أن عمل المحيط يؤثر في العمل المفيد عندما يتغير الحجم في النظام فقط ويكون هذا العمل عملاً ممانعاً عندما يتمد الغاز في النظام المغلق وعملاً مساعداً عندما يتقلص الغاز.

نعرف العمل العكوس (W_{rev}) بأنه العمل المفيد **الأعظمي** (W_{useful}) الذي يمكن **إنتاجه** في محرك حراري أو بأنه العمل المفيد **الأصغري** الذي يمكن أن **نزوده** إلى محرك تبريدي عندما يتحرك هذا النظام بين حالة ابتدائية وحالة نهائية خلال عملية عكوسة. عندما تكون الحالة النهائية تساوي الحالة الميتة يكون العمل العكوس يساوي الإكسرجي.

تعرف الضياعات *Irreversibility* بأنها الفرق بين العمل العكوس (W_{rev}) والعمل المفيد (W_{useful}) في عملية ما. تعطى الضياعات بالرمز (I)

$$I = |W_{rev} - W_{useful}| \geq 0 \qquad (5\text{-}1)$$

نلاحظ من العلاقة (5−1) أن الأجهزة التي **تنتج عملاً** يكون فيها العمل العكوس أكبر من العمل المفيد. العمل العكوس في هذه الحالة يكون **أعظمياً**. تعطى الضياعات بالشكل

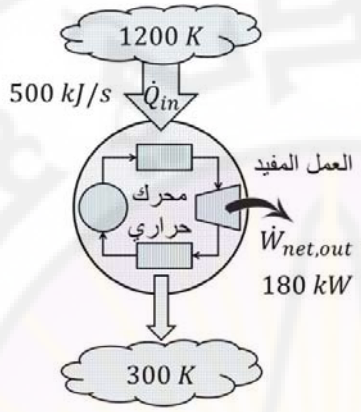
$$I = W_{rev,out,max} - W_{useful,out} \quad (kJ)$$

أما الأجهزة التي **تستهلك عملاً** فيكون فيها العمل العكوس أقل من العمل المفيد. العمل العكوس في هذه الحالة يكون **أصغرياً**. تعطى الضياعات بالشكل

$$I = W_{useful,in} - W_{rev,min,in} \qquad (kJ)$$

عندما تكون العمليات عكوسة فتكون الضياعات تساوي الصفر ويكون العمل المفيد يساوي العمل العكوس. يمكن أن نعرف الضياعات أيضا إلى أنها العمل الكامن المفقود.

المثال التطبيقي 1-3 – الضياعات في محرك حراري.



يستقبل محرك حراري كمية من الحرارة مقدارها $(500\ kJ/s)$ من خزان حراري مرتفع بدرجة حرارة $(1200\ K)$ ويطرح كمية من الحرارة إلى مصرف حراري منخفض ذي درجة حرارة $(300\ K)$ كما في الشكل المرافق. بفرض أن عمل المحرك المفيد هو $(180\ kW)$. حدد العمل العكوس (الأعظمي) والضياعات في هذه العملية.

الفرضيات: 1) المحرك حراري 2) العمل المفيد في المحرك هو $(180\ kW)$.

التحليل. يحسب العمل العكوس من علاقة كارنو

$$\eta_{th,rev} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{W}_{rev}}{\dot{Q}}$$

$$\dot{W}_{rev} = \eta_{th,rev} * \dot{Q}_{in}$$

$$\dot{W}_{rev} = \left(1 - \frac{T_{sink}}{T_{source}}\right) * \dot{Q}_{in}$$

$$\dot{W}_{rev} = \left(1 - \frac{300}{1200}\right) * 500 \quad kW$$

$$\dot{W}_{rev} = 375 \quad kW$$

بما أن نص المسالة يذكر أن عمل المحرك المفيد هو $(180\ kW)$ فتكون الضياعات هي

$$I = \dot{W}_{rev} - \dot{W}_{useful,out}$$

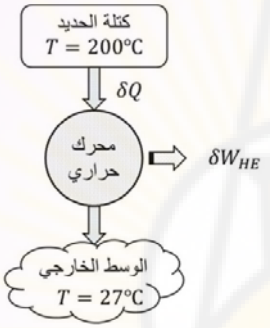
$$I = 375 - 180 = 195\ kW$$

مناقشة.

الضياعات في النظام هي 48 بالمئة $(\dot{W}_{useful,out}/\dot{W}_{rev} = 48\%)$ وسنناقش لاحقاً كيفية إيجادها. كمية الحرارة الأصغرية المطروحة هي $(500 - 375 = 125\ kW)$ ولايمكن تحويلها إلى عمل.

المثال التطبيقي 1-4 – الضياعات عند تبريد كتلة من الحديد.

تترك كتلة من الحديد ذات الوزن $(500\ kg)$ ودرجة الحرارة (200℃) لتبرد إلى درجة حرارة (27℃) في وسط درجة حرارته (27℃). حدد العمل العكوس والضياعات خلال عملية التبريد.



الفرضيات: الطاقة الحركية والكامنة مهملة

2) لايوجد عمل متبادل مع المحيط.

التحليل: على الرغم من عدم وجود عمل في هذا النظام فإن الطاقة المخزونة ضمن كتلة الحديد يمكن أن تعطي عملاً في حال تحويلها إلى محرك حراري كما في الشكل المرفق.

$$\delta W_{rev} = \eta_{th,rev} * \delta Q_{in}$$

$$\delta W_{rev} = \left(1 - \frac{T_{sink}}{T_{source}}\right) * \delta Q_{in}$$

$$\delta W_{rev} = \left(1 - \frac{T_{out}}{T}\right) * \delta Q_{in}$$

$$W_{rev} = \int_{T_1}^{T_{out}} \left(1 - \frac{T_{out}}{T}\right) * \delta Q_{in}$$

تحسب كمية الحرارة من القانون الأول في الترموديناميك

$$-\delta Q_{out} = dU$$

$$-\delta Q_{out} = m * c * dT$$

$$\delta Q_{in,heat\ engine} = \delta Q_{out,system} = -m * c * dT$$

بالتعويض نجد أن

$$W_{rev} = \int_{T_1}^{T_{out}} \left(1 - \frac{T_{out}}{T}\right) * - m * c * dT$$

$$W_{rev} = m * c * (T_1 - T_{out}) - m * c * T_{out} * ln\frac{T_1}{T_{out}}$$

$$W_{rev} = m * c * \left[(T_1 - T_{out}) - T_{out} * ln\frac{T_1}{T_{out}}\right]$$

$$W_{rev} = 500kg * 0.45\frac{kJ}{kgK} * \left[(473 - 300)K - 300K * ln\frac{473}{300}\right]$$

$$W_{rev} = 8191\ kJ$$

مناقشة.

الطاقة التي يمكن أن تنتجها هذه الكتلة والتي تعطى إلى المحرك الحراري هي

$$Q = m * c * (T_1 - T_{out}) = 38925\ kJ$$

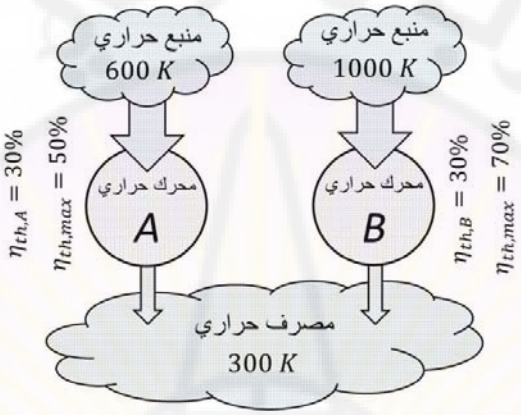
وكان العمل العكوس هو $(W_{rev} = 8191\ kJ)$ أي أن فقط 21 بالمئة من كمية الحرارة المنتجة **يمكن** أن تتحول إلى عمل. الضياعات هي وبحسب التعريف

$$I = W_{rev} - W_{useful}$$

$$I = 8191 - 0 = 8191\ kJ$$

3.1 مردود القانون الثاني *Second Law Efficiency*.

بفرض أن لدينا محركين حراريين كما في الشكل (2−1) لهما المردود الحراري نفسه.



الشكل (2−1) مردود القانون الثاني.

المحرك الحراري الأول (A) يزود بكمية من الحرارة من مصدر حراري مرتفع بدرجة حرارة $(600\,K)$ والآخر (B) يزود من مصدر حراري مرتفع بدرجة حرارة $(1000\,K)$. المصرف الحراري لكل من المحركين واحد وبدرجة حرارة $(300\,K)$. من النظرة الأولى يمكن أن نقول: إن المحركين الحراريين ينتجان أعمالاً متساوية لأن المراديد متساوية ولكن إذا أمعنا النظر أكثر وأردنا أن نحسب العمل الأعظمي لكل محرك بحسب علاقة كارنو نجد أن مردود المحرك الأول هو

$$\eta_{th,rev,A} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)$$

$$\eta_{th,rev,A} = 1 - \frac{300}{600}$$

$$\eta_{th,rev,A} = 0.5\ (50\%)$$

أما مردود المحرك الثاني فهو

$$\eta_{th,rev,B} = 1 - \frac{300}{1000}$$

$$\eta_{th,rev,B} = 0.7\ (70\%)$$

نرى من الحسابات السابقة إلى أن المردود الأعظمي للمحرك الحراري (B) هو أكبر من المردود الأعظمي للمحرك الحراري (A) وبالتالي فإن المحرك الحراري (A) هو **أفضل طاقياً** من المحرك (B) لأن المحرك (A) يهدر فقط 20% من الطاقة الكامنة بينما يقوم المحرك (B) يهدر 40% من الطاقة الكامنة. نلاحظ من المثال السابق إلى أن المردود الحراري (η_{th}) (نسبة العمل المفيد إلى كمية الطاقة المعطاة) والذي يسمى بمردود القانون الأول $(First\ Law\ Efficiency, \eta_I)$ لايعبر بشكل حقيقي عن الضياعات في الدورة لذلك نلجأ إلى تعريف مردود القانون الثاني $(Second\ Law\ Efficiency, \eta_{II})$ من أجل توضيح الأداء الحقيقي للأجهزة الهندسية الدورية. نعرف مردود القانون الثاني إلى أنه نسبة المردود الحقيقي للدورة (مردود القانون الأول) إلى المردود الأعظمي عند الشروط نفسها ويعطى بالعلاقة

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,rev}} \qquad (6\text{-}1)$$

بالعودة إلى المثال السابق نجد أن مراديد القانون الثاني للمحركين هي

$$\eta_{II,A} = \frac{0.3}{0.5} = 0.6$$

$$\eta_{II,B} = \frac{0.3}{0.7} = 0.43$$

أي أن المحرك (A) يحول 60 بالمئة من العمل الكامن إلى عمل مفيد أما المحرك (B) فيحول 43 بالمئة فقط من العمل الكامن أي أن المحرك فقط (A) أفضل طاقياً من المحرك (B) بالنسبة إلى العمل الكامن المحول إلى طاقة مفيدة. تكتب علاقة مردود القانون الثاني في الأجهزة الحرارية المنتجة للعمل *Work Producing Devices* بالشكل

$$\eta_{II} = \frac{W_{useful}}{W_{rev}} \qquad (7\text{-}1)$$

أما علاقة مردود القانون الثاني في الأجهزة الحرارية المستهلكة للعمل *Work Consuming Devices* فهي

$$\eta_{II} = \frac{W_{rev}}{W_{useful}} \qquad (8\text{-}1)$$

يمكن أيضاً ان نكتب علاقة مردود القانون الثاني في الأجهزة التبريدية (مبرد أو مضخة حرارية) بالشكل

$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}} \qquad (9\text{-}1)$$

ونكتب علاقة مردود القانون الثاني بدلالة الإكسرجي بالشكل

$$\eta_{II} = \frac{\text{الإكسرجي المحول}}{\text{الإكسرجي المزود}}$$

$$\eta_{II} = 1 - \frac{\text{الإكسرجي المهدور}}{\text{الإكسرجي المزود}} \qquad (10\text{-}1)$$

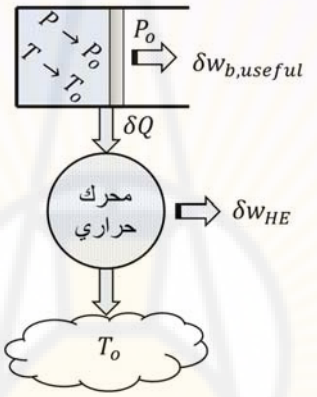
4.1 التغير في الإكسرجي ضمن الأنظمة.

عُرف الإكسرجي بأنه العمل الكامن لنظام ضمن وسط معين ويمثل بالعمل الأعظمي الذي يمكن الحصول عليه من نظام عندما يصل هذا النظام إلى حالة توازن مع الوسط المحيط. وبعكس تعريف الطاقة *Energy*، فإن قيمة الإكسرجي تعتمد على حالة (بارامترات) الوسط الخارجي وبارامترات النظام نفسه. هذه القيمة تساوي الصفر عندما تكون حالة النظام من حالة الوسط الخارجي وتسمى بالحالة الميتة *Dead State* لأن النظام لايمكن أن يعطي أبداً أي عمل من الناحية الترموديناميكية. سندرس

الإكسرجي الحراري – الميكانيكي *Thermo-Mechanical Exergy* فقط في هذه الفقرة مهملين بذلك أي عمل يمكن أن يتنج عن عمليات الخلط أو التفاعلات الكيميائية.

1.4.1 التغير في الإكسرجي في الأنظمة المغلقة.

بفرض أن لدينا نظام أسطوانة – مكبس كما في الشكل (3−1) والذي يحتوي على وسيط ما بكتلة (m) وبدرجة حرارة (T) وبضغط (P).



الشكل (3−1) التغير في الإكسرجي في الأنظمة المغلقة.

النظام له حجم (V) وطاقة داخلية (U) وإنتروبي (S). إذا قام هذا النظام بخطوة صغيرة جداً بحيث يتغير الحجم بمقدار (dV) وتطرح كمية معينة من الحرارة إلى الوسط الخارجي (δQ) فإن تطبيق القانون الأول في الترموديناميك على هذا النظام خلال هذه الخطوة الصغيرة يكون

$$-\delta Q - \delta W = dU \quad (kJ) \qquad (11\text{-}1)$$

وبما أن العمل الذي يقدمه النظام هو عمل حدود فقط فيمكن كتابة علاقة العمل بالشكل التالي

$$\delta W = PdV = (P - P_{out})dV + P_{out}dV$$

أو بالشكل

$$\delta W = \delta W_{b,useful} + P_{out} dV \quad (kJ) \qquad (12\text{-}1)$$

بفرض أن كمية الحرارة المطروحة (δQ) من نظام أسطوانة – مكبس تم نقلها إلى محرك حراري عكوس لإنتاج عمل وتم طرح باقي كمية الحرارة إلى وسط خارجي بدرجة حرارة (T_{out}) فيكون المردود الأعظمي للمحرك الحراري بحسب كارنو هو

$$\eta_{th,rev} = \frac{\delta W_{HE}}{\delta Q}$$

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_{out}}{T}$$

ويكون العمل المقدم من المحرك الحراري هو

$$\delta W_{HE} = \left(1 - \frac{T_{out}}{T}\right) \delta Q$$

$$\delta W_{HE} = \delta Q - T_{out} * \frac{\delta Q}{T}$$

النسبة $(\delta Q/T)$ هي بالتعريف التغير في الإنتروبي لنظام الأسطوانة – مكبس الوضح في الشكل $(3\text{–}1)$. يجب الانتباه إلى أن الحرارة خارجة من النظام أي

$$\frac{\delta Q}{T} = -ds$$

تتحول معادلة المحرك الحراري السابقة إلى

$$\delta W_{HE} = \delta Q - (-T_{out} dS)$$

أو بالشكل

$$\delta Q = \delta W_{HE} - T_{out} dS \quad (kJ) \qquad (13\text{-}1)$$

بتعويض علاقة العمل $(12\text{–}1)$ وعلاقة كمية الحرارة $(13\text{–}1)$ في معادلة القانون الأول $(11\text{–}1)$ نجد

$$-(\delta W_{HE} - T_{out}dS) - (\delta W_{b,useful} + P_{out}dV) = dU$$

فيكون العمل الأعظمي المفيد الذي حصلنا عليه هو

$$\delta W_{total,useful} = \delta W_{HE} + \delta W_{b,useful}$$

$$\delta W_{total,useful} = -dU - P_{out}dV + T_{out}dS$$

بمكاملة العلاقة السابقة بين حالة ما والحالة الميتة

$$W_{total,useful} = -\int_{U}^{U_{out}} dU - \int_{V}^{V_{out}} P_{out}dV + \int_{S}^{S_{out}} T_{out}dS$$

نجد أن العمل الكلي المفيد هو

$$W_{total,useful} = (U - U_{out}) + P_{out}(V - V_{out}) - T_{out}(S - S_{out})$$

يعرف $(W_{total,useful})$ بالعمل المفيد الأعظمي الذي يقدمه النظام في عملية عكوسة من حالة ما إلى الحالة الميتة بالإكسرجي *Exergy*. نلاحظ إلى أن الإكسرجي هو عبارة عن طاقة داخلية $(U - U_{out})$ وطاقة ميكانيكية $[P_{out}(V - V_{out})]$ وطاقة حرارية $[T_{out}(S - S_{out})]$. في حال كان النظام المدروس يملك طاقة حركية وكامنة فيمكن أن نكتب علاقة الإكسرجي لهذا النظام المغلق بالشكل

$$X = (U - U_{out}) + P_{out}(V - V_{out}) - T_{out}(S - S_{out}) + m\frac{V^2}{2} + mgz \qquad (kJ) \qquad (14\text{-}1)$$

من أجل واحدة الكتل نجد أن الإكسرجي النوعي *Specific Exergy* يعطى بالعلاقة

$$\phi = (e - e_{out}) + P_{out}(v - v_{out}) - T_{out}(s - s_{out}) \qquad (15\text{-}1)$$

حيث

$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz$$

التغير في الإكسرجي لنظام مغلق خلال عملية ما هو

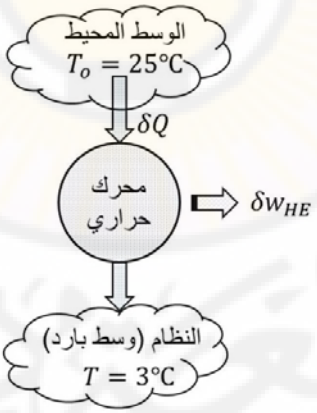
$$\Delta X = m(\phi_2 - \phi_1)$$

$$\Delta X = (E_2 - E_1) + P_{out}(V_2 - V_1) - T_{out}(S_2 - S_1) \quad (kJ)$$

أو يمكن كتابتها بالشكل

$$\Delta X = (U_2 - U_1) + P_{out}(V_2 - V_1) - T_{out}(S_2 - S_1) + m\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + mg(z_2 - z_1) \quad (kJ) \qquad (16\text{-}1)$$

إن قيمة الإكسرجي في نظام مغلق يجب أن تكون إما قيمة موجبة أو تساوي الصفر. لايمكن أن تكون قيمة الإكسرجي سالبة حتى ولو كانت درجة حرارة النظام أقل من درجة حرارة الوسط الخارجي $(T < T_{out})$ والضغط ضمن النظام أقل من ضغط الوسط الخارجي $(P < P_{out})$. في هذه الحالة نعد أن النظام هو الوسط الماص للحرارة (الوسط البارد) والوسط الطارح للحرارة هو الوسط الخارجي كما هو واضح في الشكل (4−1) وتكون قيمة الإكسرجي موجبة.



الشكل (4−1) درجة حرارة وضغط النظام المدروس أقل من درجة حرارة الوسط الخارجي.

المثال التطبيقي 1-4 – العمل الكامن لهواء مضغوط ضمن خزان.

خزان صلب بحجم ($200m^3$) يحتوي على هواء مضغوط بضغط ($1\ MPa$) ودرجة حرارة ($300\ K$). حدد كمية العمل التي يمكن أن نحصل عليها من هذا الهواء في حال كانت الشروط الخارجية المحيطه بالخزان ذات ضغط ($100\ kPa$) ودرجة حرارة ($300\ K$).

الفرضيات: 1) الغاز مثالي و2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: اكسرجي هذا النظام هو

$$X = m\phi$$

$$X = m\left[(u - u_{out}) + P_{out}(v - v_{out}) - T_{out}(s - s_{out}) + \frac{V^2}{2} + gz\right]$$

الطاقة الداخلية تساوي الصفر لأن الحرارة متساوية بين النظام والوسط الخارجي والطاقة الحركية والكامنة مهملة.

$$X = m * [P_{out}(v - v_{out}) - T_{out}(s - s_{out})]$$

تحسب الكتلة من معادلة الغاز المثالي بالشكل

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{1000\ kPa * 200m^3}{0.287kJ/kgK * 300K}$$

$$m = 2323\ kg$$

$$P_{out}(v - v_{out}) = P_{out}\left(\frac{RT}{P} - \frac{RT_{out}}{P_{out}}\right)$$

$$P_{out}(v - v_{out}) = RT_{out}\left(\frac{P_{out}}{P} - 1\right)$$

$$T_{out}(s - s_{out}) = T_{out}\left(c_P ln\frac{T}{T_{out}} - Rln\frac{P}{P_{out}}\right)$$

$$T_{out}(s - s_{out}) = -RT_{out}ln\frac{P}{P_{out}}$$

$$\phi = RT_{out}\left(\frac{P_{out}}{P} - 1\right) - RT_{out} ln \frac{P}{P_{out}}$$

$$\phi = 0.287\ \frac{kJ}{kg\ K} * 300K * \left(\frac{100}{1000} - 1 + ln\frac{1000}{100}\right)$$

$$\phi = 120.76\ kJ/kg$$

$$X = m * \phi = 2323kg * 120.76\frac{kJ}{kg}$$

$$X = 280.525\ kJ = 281\ MJ$$

مناقشة.

عند ضخ هذا الهواء الموجود ضمن الخزان في عنفة فالعمل الأعظمي الذي يمكن الحصول عليه هو $281\ MJ$.

2.4.1 التغير في الإكسرجي في الأنظمة المفتوحة.

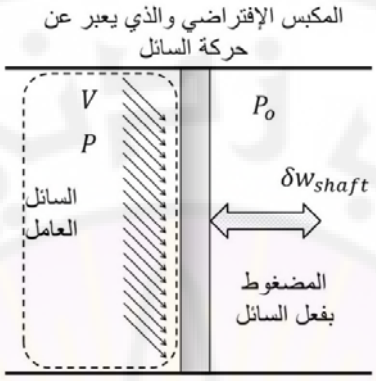
يختلف النظام المفتوح عن النظام المغلق بوجود كتلة تتدفق عبر حدوده. يعطى إكسرجي تدفق الكتلة في نظام مفتوح بالعلاقة

$$x_{flow} = Pv - P_{out}v$$

$$x_{flow} = (P - P_{out})v$$

حيث $(P - P_{out})$ هو الفرق بين ضغط السائل المتحرك وضغط السائل الساكن على طرفي المكبس الافتراضي كما هو واضح في الشكل (5−1). هنا يمكن أن نعبر عن إكسرجي النظام المفتوح بالشكل التالي

$$x_{flowing\ fluid} = x_{non-flowing\ fluid} + x_{flow}$$



الشكل (5–1) إكسرجي النظام المفتوح.

علاقة الإكسرجي بالنسبة إلى نظام لاتدفق فيه هي

$$x_{non-flowing\ fluid} = (e - e_{out}) + P_{out}(v - v_{out}) - T_{out}(s - s_{out})$$

حيث

$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz$$

علاقة الإكسرجي بالنسبة إلى كتلة متدفقه هي

$$x_{flow} = (P - P_{out})v$$

بالتعويض في العلاقة السابقة

$$x_{flowing\ fluid} = (e - e_{out}) + P_{out}(v - v_{out}) - T_{out}(s - s_{out}) + (P - P_{out})v$$

$$x_{flowing\ fluid} = [(u + Pv) - (u + Pv)_{out}] - T_{out}(s - s_{out}) + \frac{V^2}{2} + gz$$

وباستخدام علاقة مايير نجد أن

$$x_{flowing\ fluid} = (h - h_{out}) - T_{out}(s - s_{out}) + \frac{V^2}{2} + gz$$

تسمى العلاقة السابقة بإكسرجي التدفق *Flow Exergy* ويعطى إكسرجي التدفق بالرمز (ψ) وتصبح علاقة الإكسرجي في النظام المفتوح بالشكل

$$\psi = (h - h_{out}) - T_{out}(s - s_{out}) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (kJ/kg) \qquad (17\text{-}1)$$

يعبر عن التغير في إكسرجي التدفق خلال عملية ما بالشكل

$$\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1 \quad (kJ/kg) \qquad (18\text{-}1)$$

التغير في الإكسرجي في الأنظمة المفتوحة خلال عملية ما فيعطى بالشكل

$$\Delta X = m * \Delta\psi \quad (kJ)$$

$$\Delta X = \dot{m} * \Delta\psi \quad (kW)$$

يمثل التغير في الإكسرجي في الأنظمة المغلقة أو المفتوحة العمل المفيد الأعظمي الذي يمكن أن نحصل عليه (أو العمل الأصغري الذي يجب أن نزوده) عندما ينتقل النظام من الحالة (1) إلى الحالة (2) ضمن وسط معين ويمثل العمل العكوس *Reversible Work* والذي يرمز له (W_{rev}). هذا العمل لا يتعلق بالعملية التي يقوم بها النظام.

<u>المثال التطبيقي 1-5 – التغير في الإكسرجي خلال عملية انضغاط.</u>

ينضغط وسيط التشغيل ($134A$) في ضاغط وبشكل مستقر من الحالة ($1\ MPa, -10°C$) إلى الحالة ($0.8\ MPa, 50°C$). إذا فرضنا أن بارامترات الوسط الخارجي هي ($5\ kPa, 20°C$) حدد التغير في الإكسرجي خلال العملية والعمل (الأصغري) الذي يجب أن يستهلكه الضاغط بالنسبة إلى واحدة الكتل.

الفرضيات: 1) العمليات مستقرة 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: العمل الأصغري هو التغير في الإكسرجي للضاغظ. يعطى التغير في إكسرجي التدفق لهذا النظام المفتوح بالعلاقة

$$\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1$$

$$\Delta\psi = (h_2 - h_1) - T_{out}(s_2 - s_1)$$

من الضغط ودرجة الحرارة $(1\ MPa, -10℃)$ في الحالة الأولى نجد

$$h_1 = 246.36\frac{kJ}{kg}$$

$$s_1 = 0.9724\frac{kJ}{kgK}$$

ومن الضغط ودرجة حرارة $(0.8\ MPa, 50℃)$ في الحالة الثانية نجد

$$h_2 = 286.69\frac{kJ}{kg}$$

$$s_1 = 0.9802\frac{kJ}{kgK}$$

بالتعويض في علاقة التغير في إكسرجي التدفق نجد أن

$$\Delta\psi = (286.69 - 246.36)\frac{kJ}{kg} - 293K * (0.9802 - 0.9724)\frac{kJ}{kg\ K}$$

$$\Delta\psi = W_{rev} = 38.0446\ kJ/kg$$

نلاحظ إلى أن عملية الانضغاط رفعت من الإكسرجي بمقدار $38\ kJ/kg$ وهو أقل عمل يمكن تزويده إلى الضاغط. العمل المفيد الذي يجب أن يصرف على الضاغط يحسب من القانون الأول في الترموديناميك بالشكل

$$W_{useful} = (h_2 - h_1)$$

$$W_{useful} = (286.69 - 246.36)$$

$$W_{useful} = 40.33\ kJ/kg$$

الضياعات هي

$$I = W_{useful} - W_{rev}$$

$$I = 38 - 40.33 = 2.2854\ kJ/kg$$

نلاحظ أيضاً بالمقارنة أن

$$I = T_{out}(s_2 - s_1)$$

$$I = 293K * (0.9802 - 0.9724)\frac{kJ}{kg\ K}$$

$$I = 2.2854\ kJ/kg$$

مناقشة.

التغير في إكسرجي التدفق في الأنظمة المفتوحة هو عبارة عن العمل المفيد مطروحاً منه الضياعات

$$\Delta\psi = W_{rev} = (h_2 - h_1) - T_{out}(s_2 - s_1) = W_{useful} - I$$

5.1 انتقال الإكسرجي على شكل طاقة.

يتم انتقال الطاقة من وإلى النظام بثلاثة أشكال: حرارة وعمل وطاقة مرافقة لتدفق الكتلة.

- الإكسرجي المرافق لانتقال كمية معينة من الحرارة

$$X_{heat} = \left(1 - \frac{T_{out}}{T}\right)Q \quad (kJ) \qquad (19\text{-}1)$$

- الإكسرجي المرافق لانتقال كمية معينة من العمل

$$X_{work} = W - W_{sur}$$

وبالتالي

$$X_{work} = W - P_{out}(V_2 - V_1) \quad (kJ) \qquad (20\text{-}1)$$

- الإكسرجي المرافق لتدفق كمية معينة من الكتلة

$$X_{mass} = m * \psi$$

وبالتالي

$$X_{mass} = m\left\{(h - h_{out}) - T_{out}(s - s_{out}) + \frac{V^2}{2} + gz\right\} \quad (kJ) \qquad (21\text{-}1)$$

6.1 مبدأ تناقص الإكسرجي والإكسرجي الضائع.

يمكن كتابة معادلة توازن الطاقة لنظام معزول *Isolated System* بالشكل التالي

$$\Delta E_{sys} = 0$$

$$\rightarrow E_2 - E_1 = 0$$

يمكن أيضاً كتابة معادلة توازن الإنتروبي لنظام معزول *Isolated System* بالشكل التالي

$$\Delta S_{sys} = S_{gen}$$

$$\rightarrow S_2 - S_1 = S_{gen}$$

بضرب علاقة الإنتروبي السابقة بدرجة حرارة الوسط الخارجي وطرحها من علاقة الطاقة نجد أن

$$(E_2 - E_1) - T_{out}(S_2 - S_1) = -T_{out} * S_{gen}$$

معادلة الإكسرجي لنظام مغلق هي

$$\Delta X = (E_2 - E_1) + P_{out}(V_2 - V_1) - T_{out}(S_2 - S_1)$$

وبما أن الحجم ثابت في النظام المعزول فتصبح العلاقة بالشكل

$$\Delta X = (E_2 - E_1) - T_{out}(S_2 - S_1)$$

نلاحظ من العلاقات السابقة أن التغير في الإكسرجي لنظام معزول يساوي جداء درجة حرارة المحيط بتوليد الإنتروبي أي

$$X_2 - X_1 = -T_{out} * S_{gen}$$

وبما أن توليد الإنتروبي موجب دوما

$$(S_{gen} > 0)$$

هذا يعطي أن التغير في الإكسرجي لنظام معزول هو

$$\Delta X_{isolated} = (X_2 - X_1)_{isolated} \leq 0$$

تعبر العلاقة عن أن التغير في الإكسرجي لنظام معزول خلال عملية ما ينقص دوماً أو يبقى ثابتاً عندما تكون العملية عكوسة، هذه يعني أن الإكسرجي لايزداد أبداً إنما يتكسر أو يدمر خلال عملية حقيقية بين حالتين وهذا مايعرف بإسم مبدأ تناقص الإكسرجي *Decrease of Exergy Principle*.

يمكن أن نقول إن أي عملية تقوم بتوليد إنتروبي تؤدي إلى ضياع في الإكسرجي وبالتالي الإكسرجي الضائع يتناسب طرداً مع مع الإنتروبي المتولد ويعطى بالعلاقة

$$X_{destroyed} = T_{out} * S_{gen} \geq 0 \quad (kJ) \qquad (22\text{-}1)$$

أما معدل ضياع الإكسرجي فيعطى بالعلاقة

$$\dot{X}_{destroyed} = T_{out} * \dot{S}_{gen} \geq 0 \quad (kW) \qquad (23\text{-}1)$$

7.1 توازن الإكسرجي في الأنظمة المغلقة.

بارامتر الإكسرجي هو بعكس بارامتر الإنتروبي حيث أن الإكسرجي يضيع بينما بارامتر الإنتروبي يولد دوماً. لذلك التغير في الإكسرجي لنظام ما خلال عملية معينة هو أقل من الإكسرجي المنتقل بقيمة الإكسرجي الضائع *Exergy Destroyed* خلال تلك العملية وضمن حدود النظام. يمكن التعبير عن مبدأ تناقص الإكسرجي بالشكل التالي

الإكسرجي الضائع ضمن النظام *Total Exergy Destroyed*	-	الإكسرجي الخارج من النظام *Total Exergy Leaving*	-	الإكسرجي الداخل إلى النظام *Total Exergy Entering*	=	التغير في الإكسرجي الكلي في النظام *Change of Total Exergy of the System*	

يمكن كتابة علاقة مبدأ تناقص الإكسرجي بالشكل الرياضي التالي

$$(X_{in} - X_{out}) - X_{destroyed} = \Delta X_{system} \qquad (kJ) \qquad (24\text{-}1)$$

تعرف هذه العلاقة بتوازن الإكسرجي *Exergy Balance* وتقول إن التغير في الإكسرجي لنظام (ΔX_{system}) خلال عملية ما يساوي الفرق بين الإكسرجي الذي يخترق الحدود $(X_{in} - X_{out})$ والإكسرجي الضائع $(X_{destroyed})$ ضمن حدود النظام والناتج عن العمليات غير العكوسة. شكل المعادلة بالنسبة إلى واحدة الكتل هي

$$(x_{in} - x_{out}) - x_{destroyed} = \Delta x_{system} \qquad (kJ/kg) \qquad (25\text{-}1)$$

بتعويض أشكال الإكسرجي ضمن المعادلة (24−1) حيث أن الكتلة ثابتة نجد

$$\{(X_{heat} + X_{work})_{in} - (X_{heat} + X_{work})_{out}\} - X_{destroyed} = \Delta X_{system} \qquad (kJ) \qquad (26\text{-}1)$$

وبحسب عرف الاتجاهات والذي يفرض أن كمية الحرارة الداخلة إلى النظام موجبة والعمل الخارج من النظام موجب فإن معادلة توازن الإكسرجي لنظام مغلق تكون

$$(X_{heat,in} - X_{work,out}) - X_{destroyed} = \Delta X_{system} \qquad (kJ) \qquad (27\text{-}1)$$

بالتعويض في قيم أشكال الإكسرجي تتحول العلاقة إلى

$$\left\{\left(\sum\left(1-\frac{T_{out}}{T_k}\right)Q_k\right)-[W-P_{out}(V_2-V_1)]\right\}-T_{out} * S_{gen}=X_2-X_1 \quad (kJ) \tag{28-1}$$

حيث أن (Q_k) الحرارة المنتقلة إلى النظام عبر الحدود عند درجة حرارة (T_k) عند المكان (k). شكل المعادلة السابقة بدلالة معدل التغير يكون بالشكل

$$\left\{\sum\left(1-\frac{T_{out}}{T_k}\right)\dot{Q}_k-\left[\dot{W}-P_{out}\frac{dV_{sys}}{dt}\right]\right\}-T_{out} * \dot{S}_{gen}=\frac{dX_{sys}}{dt} \quad (kW) \tag{29-1}$$

في المعادلة السابقة يمكن حساب العمل العكوس بوضع توليد الإنتروبي مساوياً للصفر.

ملاحظة: يمكن إستخراج علاقة توازن الإكسرجي من القانون الأول في الترموديناميك وتوازن الإنتروبي كما يلي

$$(\Delta U+\Delta KE+\Delta PE)=\int_1^2 \delta Q-W$$

$$\Delta S=\int_1^2\left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b+S_{gen}$$

بضرب القانون الأول في الترموديناميك بدرجة حرارة الوسط الخارجي أو الحالة الميتة (T_{out}) وطرح العلاقة من القانون الأول نجد

$$(\Delta U+\Delta KE+\Delta PE-T_{out} * \Delta S)=\int_1^2 \delta Q-T_{out}\int_1^2\left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b-W-T_{out} * S_{gen}$$

بإستخدام معادلة التغير في الإكسرجي للنظام المغلق (16−1) نجد أن

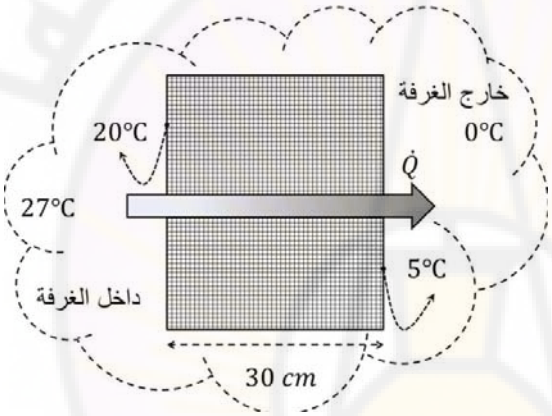
$$(X_2-X_1)-P_{out} * (V_2-V_1)=\int_1^2\left(1-\frac{T_{out}}{T}\right)_b\delta Q-W-T_{out} * S_{gen}$$

بالترتيب وبتحويل التكامل إلى مجموع تتحول العلاقة السابقة إلى المعادلة (28−1)

$$\left\{\left(\sum\left(1-\frac{T_{out}}{T_k}\right)Q_k\right)-[W-P_{out}(V_2-V_1)]\right\}-T_{out}*S_{gen}$$
$$=X_2-X_1\quad(kJ)$$

المثال التطبيقي 1-6 – الإكسرجي الضائع خلال عملية توصيل حراري عبر جدار.

جدار أجري بأبعاد $(5m*6m*30cm)$ ينقل كمية من الحرارة وقدرها $(1035W)$ عبره وبشكل مستقر. بفرض أن درجة حرارة الجو الخارجي (0°C) ودرجة حرارة الجو الداخلي (27°C) وبفرض أن درجة حرارة سطح الجدار الخارجي هي (5°C) ودرجة حرارة سطح الجدار الداخلي هي (20°C)، حدد 1) معدل الإكسرجي الضائع خلال عملية انتقال الحرارة عبر الجدار و 2) معدل الإكسرجي الضائع خلال عملية انتقال الحرارة الكلي.



الفرضيات: 1) العمليات مستقرة وبالتالي كمية الحرارة ثابتة 2) انتقال الحرارة عبر الجدار ذات بعد واحد.

التحليل: من معادلة توازن الإكسرجي عبر الجدار نجد أن

$$\left(\dot{X}_{in}-\dot{X}_{out}\right)-\dot{X}_{destroyed}=0$$

$$\left\{\left(\dot{X}_{heat}-\dot{X}_{work}\right)_{in}-\left(\dot{X}_{heat}-\dot{X}_{work}\right)_{out}\right\}-\dot{X}_{destroyed}=0$$

لاتوجد أعمال خارجية فقط كميات حرارة، بتعويض قيم الإكسرجي فقط **للجدار** باعتبار أن درجة الوسط الخارجي هي درجة حرارة الجو الخارجي نجد أن

$$\left(1-\frac{T_{out}}{T}\right)_{in}\dot{Q}_{in}-\left(1-\frac{T_{out}}{T}\right)_{out}\dot{Q}_{out}-\dot{X}_{destroyed}=0$$

كمية الحرارة الداخلة تساوي كمية الحرارة الخارجة لأن العملية مستقرة

$$\left[\left(1-\frac{T_{out}}{T}\right)_{in}-\left(1-\frac{T_{out}}{T}\right)_{out}\right]*\dot{Q}-\dot{X}_{destroyed}=0$$

$$\left[\left(1-\frac{0+273}{20+273}\right)_{in}-\left(1-\frac{0+273}{5+273}\right)_{out}\right]*1035W-\dot{X}_{destroyed}=0$$

$$\dot{X}_{destroyed}=52\ W$$

لمعرفة الإكسرجي المدمرالكلي نقوم باحتواء المنطقة المجاورة للجدار وبالتالي فإن النظام يتحول إلى (جدار + محيط الجدار) كما هو واضح في الشكل المرافق وتصبح العلاقة

$$\left[\left(1-\frac{0+273}{27+273}\right)_{in}-\left(1-\frac{0+273}{0+273}\right)_{out}\right]*1035W-\dot{X}_{destroyed}=0$$

$$\dot{X}_{destroyed}=93.2\ W$$

مناقشة: يبين الشكل المرفق المقارنة بين الإنتروبي والإكسرجي عبر الجدار فقط. الفرق الناتج الإكسرجي الضائع يعود إلى العمليات غير العكوسة ضمن النظام ويمثل الإكسرجي المفقود في طبقات الهواء على طرفي الجدار. يمكن حساب الإكسرجي الضائع من خلال المعادلة

$$\dot{X}_{destroyed}=T_{out}*\dot{S}_{gen}\geq 0$$

بعد معرفة الإنتروبي المتولد ودرجة الحرارة $(T_{out}=273K)$.

$$\left(\dot{S}_{in}-\dot{S}_{out}\right)+\dot{S}_{gen}=0$$

$$\left(\frac{\dot{Q}_{in}}{T_{in}} - \frac{\dot{Q}_{out}}{T_{out}}\right) = -\dot{S}_{gen}$$

$$\left(\frac{1}{T_{in}} - \frac{1}{T_{out}}\right) * \dot{Q} = -\dot{S}_{gen}$$

للجدار كنظام فقط

$$\left(\frac{1}{273+20} - \frac{1}{273+5}\right) * 1035W = -\dot{S}_{gen}$$

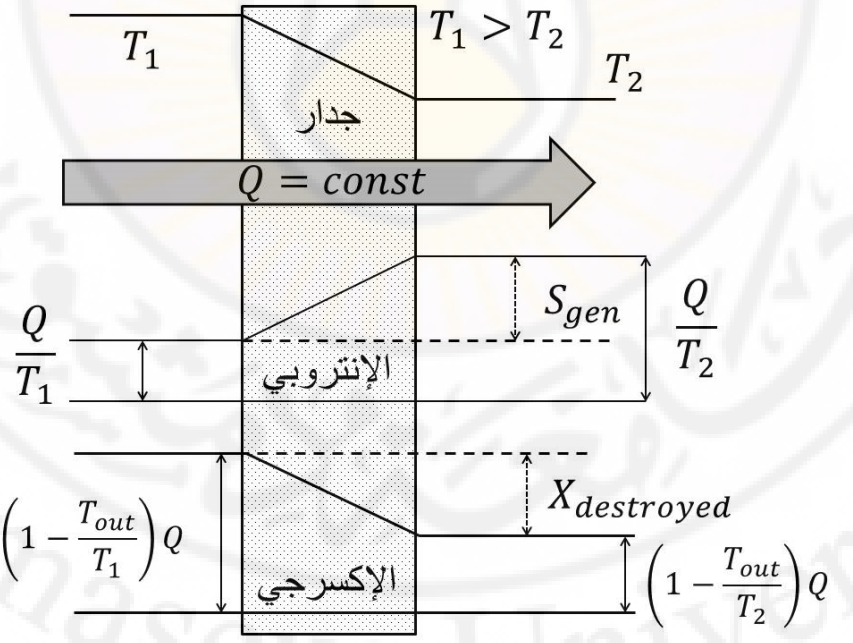
$$\dot{S}_{gen} = 1.84 * 10^{-4} * 1035$$

$$\dot{S}_{gen} = 0.19059\ \frac{W}{K}$$

$$\dot{X}_{destroyed} = T_{out} * \dot{S}_{gen}$$

$$\dot{X}_{destroyed} = 273K * 0.19059\ \frac{W}{K}$$

$$\dot{X}_{destroyed} = 52.03\ W$$



للجدار والمحيط كنظام

$$\left(\frac{1}{273+27}-\frac{1}{273+0}\right)*1035W=-\dot{S}_{gen}$$

$$\dot{S}_{gen}=3.296*10^{-4}*1035$$

$$\dot{S}_{gen}=0.3412\ \frac{W}{K}$$

$$\dot{X}_{destroyed}=T_{out}*\dot{S}_{gen}$$

$$\dot{X}_{destroyed}=273K*0.3412\ \frac{W}{K}$$

$$\dot{X}_{destroyed}=93.14\ W$$

نلاحظ أن القيم متساوية إذا تم الحساب عن طريق توازن الإنتروبي.

المثال التطبيقي 1-7 – الإكسرجي الضائع خلال عملية تمدد غاز.

نظام أسطوانة – مكبس يحتوي على $(0.05\ kg)$ من البخار ذي البارامترات $[1MPa, 300℃]$ يتمدد البخار إلى الحالة $[200kPa, 150℃]$ منتجاً عملاً. تقدر كمية الحرارة المنتقلة إلى الوسط الخارجي $(2\ kJ)$ خلال عملية التمدد. بفرض أن درجة حرارة الوسط الخارجي هي (25℃) والضغط هو $(100kPa)$، حدد 1) إكسرجي البخار في الحالة الابتدائية والنهائية 2) التغير في الإكسرجي 3) الإكسرجي الضائع و4) مردود القانون الثاني في هذه العملية.

الفرضيات: الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: 1) لتحديد الإكسرجي في الحالة الابتدائية والنهائية يجب أولا تحديد بارامترات البخار. عند الضغط ودرجة الحرارة في الحالة الابتدائية $[1MPa, 300℃]$ نجد من جداول البخار أن

$$u_1=2793.7\ kJ/kg$$

$$v_1 = 0.25799\ m^3/kg$$

$$s_1 = 7.1246\ kJ/kgK$$

عند الحالة النهائية $[200kPa, 150℃]$ نجد من جداول البخار أن

$$u_2 = 2577.1\ kJ/kg$$

$$v_2 = 0.95986\ m^3/kg$$

$$s_2 = 7.2810\ kJ/kgK$$

بارامترات البخار عند بارامترات الوسط الخارجي $[100kPa, 25℃]$ والتي تعبر عن النقطة الميتة نجد من جداول البخار أن

$$u_{out} = 104.83\ kJ/kg$$

$$v_{out} = 0.00103\ m^3/kg$$

$$s_{out} = 0.3672\ kJ/kgK$$

إكسرجي الحالة يعطى من العلاقة

$$X = (U - U_{out}) + P_{out}(V - V_{out}) - T_{out}(S - S_{out}) + m\frac{V^2}{2} + mgz$$

للحالة الابتدائية مع إهمال الطاقة الحركية والكامنة

$$X_1 = m[(u_1 - u_{out}) - T_{out}(s_1 - s_{out}) + P_{out}(v_1 - v_{out})]$$

$$\begin{aligned} X_1 = 0.05kg * \{&[(2793.7 - 104.83)kJ/kg] \\ &- [298K(7.1246 - 0.3672)kJ/kgK] \\ &+ [100kPa(0.25799 - 0.00103)m^3/kg]\} \end{aligned}$$

$$X_1 = 35\ kJ$$

للحالة النهائية مع إهمال الطاقة الحركية والكامنة

$$X_2 = m[(u_2 - u_{out}) - T_{out}(s_2 - s_{out}) + P_{out}(v_2 - v_{out})]$$

$$X_2 = 0.05kg * \{[(2577.1 - 104.83)kJ/kg] - [298K(7.281 - 0.3672)kJ/kgK] + [100kPa(0.95986 - 0.00103)m^3/kg]\}$$

$$X_2 = 25.4\ kJ$$

أي أن الإكسرجي في الحالة الابتدائية كان $(X_1 = 35\ kJ)$ ثم تم تدميره إلى الحالة النهائية $(X_2 = 25.4\ kJ)$ وبالتالي إذا فرضنا أن البخار قام بعملية تمدد وبشكل عكوس من الحالة الابتدائية إلى الحالة الميتة لكان أعطى عملاً وقدره 35 كيلوجول.

2) التغير في الإكسرجي خلال هذه العملية. يحسب التغير في الإكسرجي من العلاقة مع إهمال الطاقة الحركية والكامنة

$$\Delta X = (U_2 - U_1) + P_{out}(V_2 - V_1) - T_{out}(S_2 - S_1)$$

حيث أن

$$(U_2 - U_1) = (0.05\ kg) * (2577.1 - 2793.7\ )\frac{kJ}{kg} = -10.8\ kJ$$

$$P_{out}(V_2 - V_1) = (0.05\ kg) * 100kPa * (0.95986 - 0.25799)\frac{m^3}{kg}$$

$$P_{out}(V_2 - V_1) = 3.5\ kJ$$

$$T_{out}(S_2 - S_1) = (0.05\ kg) * 298K(7.2810 - 7.1246)\frac{kJ}{kg\ K} = 2.3\ kJ$$

$$\Delta X = -10.8 + 3.5 - 2.3 = -9.6\ kJ$$

أو يمكن حسابها من الفرق بين إكسرجي الحالة الثانية والحاللة الأولى المحسوبة سابقاً

$$\Delta X = X_2 - X_1 = 25.4 - 35 = -9.6\ kJ$$

في حالة تمت العملية بشكل عكوسة فإن النظام يقوم على تسليم عمل قدره 9.6 كيلوجول.

3) لمعرفة الإكسرجي الضائع خلال هذه العملية نأخذ النظام المؤلف من البخار المتمدد والمحيط كنظام معزول

$$\left(-X_{heat,out} - X_{work,out}\right) - X_{destroyed} = (X_2 - X_1)$$

إكسرجي كمية الحرارة لا يدخل في الحساب لأن انتقال الحرارة هو داخل النظام وليس على الحدود فتتحول المعادلة إلى

$$\left(-X_{work,out}\right) - X_{destroyed} = (X_2 - X_1)$$

$$X_{destroyed} = (X_1 - X_2) - [W - P_{out}(V_2 - V_1)]$$

بما أن العمل الكلي (W) هو عمل الحدود (W_b) لأن الأعمال الخارجية مهملة

$$X_{destroyed} = (X_1 - X_2) - [W_b - P_{out}(V_2 - V_1)]$$

$$X_{destroyed} = (X_1 - X_2) - W_{u,out}$$

العمل $(W_{u,out})$ هو العمل المفيد ضمن النظام

يحسب عمل الحدود من القانون الأول في الترموديناميك كما يلي

$$-Q_{out} - W_b = \Delta U$$

$$W_b = -Q_{out} - m(u_2 - u_1)$$

$$W_b = -2kJ - 0.05\ kg * (2577.1 - 2793.7)kJ/kg$$

$$W_b = 8.8\ kJ$$

عمل المحيط الممانع يحسب من العلاقة

$$P_{out}(V_2 - V_1) = 3.5\ kJ$$

العمل المفيد هو

$$W_{u,out} = 8.8 - 3.5 = 5.3\ kJ$$

$$W_{u,out} = 5.3\ kJ$$

بالتعويض في علاقة توازن الإكسرجي يكون

$$X_{destroyed} = (X_1 - X_2) - W_{u,out}$$

$$X_{destroyed} = (35 - 25.4) - 5.3$$

$$X_{destroyed} = 4.3\ kJ$$

وبالتالي فإن $4.3\ kJ$ من الطاقة تم هدرها خلال هذه العملية. يمكن أيضا أن نحدد الإكسرجي الضائع من العلاقة

$$X_{destroyed} = T_{out} * S_{gen} = T_{out} * \left[m(s_2 - s_1) + \frac{Q_{surr}}{T_{out}}\right]$$

$$X_{destroyed} = 298K\left\{0.05kg * (7.281 - 7.1246) + \frac{2kJ}{298K}\right\}$$

$$X_{destroyed} = 4.3\ kJ$$

4) مردود القانون الثاني

$$\eta_{II} = \frac{\text{الإكسرجي المحول}}{\text{الإكسرجي المزود}}$$

$$\eta_{II} = \frac{W_u}{X_1 - X_2} = \frac{5.3}{35 - 25.4} = 0.552 = 55.2\%$$

أي أن 44.8 بالمئة من العمل طرح من دون فائدة خلال عملية تمدد البخار.

<u>المثال التطبيقي 1-8 – الإكسرجي المدمر خلال عملية تحريك غاز.</u>

خزان معزول يحتوي على $(2\ lbm)$ من الهواء ذات البارامترات $[20psia, 70°F]$. يدار خلط داخل الخزان بواسطة قوى خارجية حتى تصل درجة حرارة الخزان إلى [130°F] إذا كان الوسط الخارجي ذا درجة حرارة $(T_o = 70°F)$ حدد 1) الإكسرجي المدمر و2) العمل العكوس خلال عملية الخلط.

الفرضيات: يمكن اعتبار الهواء غازاً مثالياً ذا حرارة نوعية ثابتة عند درجة حرارة الغرفة 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة و3) لاعمل للحدود لأن الخزان صلب و4) الخزان معزول ولايوجد تبادل للحرارة.

التحليل: الإكسرجي المدمر خلال هذه العملية يمكن أن يحدد من معادلة توازن الإكسرجي أو مباشرة من علاقة الإكسرجي مع توليد الإنتروبي. سنأخذ الإنتروبي في هذه الحالة.

$$(S_{in} - S_{out}) + S_{gen} = \Delta S_{sys} = (S_2 - S_1)$$

بما أن الأعمال وكميات الحرارة غير موجودة فتصبح المعادلة بالشكل التالي

$$0 + S_{gen} = m\left(c_v ln\frac{T_2}{T_1} + Rln\frac{V_2}{V_1}\right)$$

الخزان صلب أي الحجم ثابت

$$S_{gen} = m * c_v ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$X_{destroyed} = T_{out} * S_{gen}$$

$$X_{destroyed} = 530R * 2lbm * \left(0.172\ \frac{Btu}{lbm°\mathrm{F}}\right)\left(ln\frac{590R}{530R}\right)$$

$$X_{destroyed} = 19.6\ Btu$$

2) يمكن حساب العمل العكوس من التغير في الإكسرجي لعملية عكوسة بالعلاقة

$$W_{rev,in} = X_2 - X_1$$

$$W_{rev,in} = \Delta X = (U_2 - U_1) + P_{out}(V_2 - V_1) - T_{out}(S_2 - S_1)$$

$$W_{rev,in} = (U_2 - U_1) - T_{out}(S_2 - S_1)$$

$$W_{rev,in} = m * c_v * (T_2 - T_1) - T_{out}(S_2 - S_1)$$

$$W_{rev,in} = m * c_v * (T_2 - T_1) - X_{destroyed}$$

$$W_{rev,in} = \left\{2lbm * 0.172\ \frac{Btu}{lbm°\text{F}} * (130 - 70)°\text{F}\right\} - 19.6Btu$$

$$W_{rev,in} = 1.0Btu$$

نجد أن وحدة حرارية واحدة قادرة على تحريك العملية السابقة أي رفع درجة حرارة الهواء من 70 إلى 130 فهرنهايت إذا كانت العملية عكوسة.

المثال التطبيقي 1-9 – سقوط كتلة حديد ساخنة في ماء.

بفرض أننا وضعنا كتلة من الحديد $(5kg)$ بدرجة حرارة (350℃) في حوض معزول يحتوي على $(100kg)$ من الماء وبدرجة حرارة (30℃). بفرض أن الماء المتبخر يعود إلى الحوض بعد التكثيف ودرجة حرارة المحيط (20℃) وضغط المحيط هو ضغط نظامي، حدد 1) درجة الحرارة النهائية و2) إكسرجي الحالة الابتدائية والنهائية للحوض وقطعة الحديد و3) العمل المهدور خلال هذه العملية.

الفرضيات: 1) الماء والحديد مواد غير قابلة للانضغاط 2) الحرارة النوعية ثابتة عند درجة حرارة الغرفة و3) الطاقة الحركية والكامنة مهملة و4) لايوجد أعمال أخرى و5) الحوض معزول.

التحليل: لمعرفة درجة الحرارة النهائية نأخذ توازن الطاقة فنجد

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{sys}$$

$$0 = \Delta U = (\Delta U)_{iron} + (\Delta U)_{water}$$

$$0 = \Big(mc\big(T_f - T_i\big)\Big)_{iron} + \Big(mc\big(T_f - T_i\big)\Big)_{water}$$

$$0 = \left(5kg * 0.45\frac{kJ}{kg°\text{C}}(T_f - 350)°\text{C}\right)_{iron} + \left(100\ kg * 4.18\frac{kJ}{kg°\text{C}}(T_f - 30)°\text{C}\right)_{water}$$

$$T_f = 31.7°\text{C}$$

2) لمعرفة إكسرجي الحالة الابتدائية نستخدم المعادلة التالية

$$X_1 = m[(u_1 - u_{out}) - T_{out}(s_1 - s_{out}) + P_{out}(v_1 - v_{out})]$$

$$X_1 = m * c * (T_1 - T_{out}) - T_{out} * m * c * ln\frac{T_1}{T_{out}} + 0$$

$$X_1 = m * c * \left(T_1 - T_{out} - T_{out} * ln\frac{T_1}{T_{out}}\right)$$

$$X_1 = m * c * \left(T_1 - T_{out}\left(1 + ln\frac{T_1}{T_{out}}\right)\right)$$

حيث (T_1) درجة حرارة المادة (حديد أو ماء) و(T_{out}) درجة حرارة المحيط. الإكسرجي الابتدائي للحديد $(T_1 = 623\ K)$ هو

$$X_{1,iron} = 5kg * 0.45\frac{kJ}{kgK}\left(623 - 293\left(1 + ln\frac{623}{293}\right)\right)$$

$$X_{1,iron} = 245.2\ kJ$$

والإكسرجي للماء داخل الحوض $(T_1 = 303\ K)$ هو

$$X_{1,water} = 100kg * 4.18\frac{kJ}{kgK}\left(303 - 293\left(1 + ln\frac{303}{293}\right)\right)$$

$$X_{1,water} = 69.8\ kJ$$

للنظام بشكل كامل

$$X_{1,total} = X_{1,water} + X_{1,iron}$$

$$X_{1,total} = 315\ kJ$$

إكسرجي الحالة النهائية نستخدم المعادلة التالية

$$X_2 = m[(u_2 - u_{out}) - T_{out}(s_2 - s_{out}) + P_{out}(v_2 - v_{out})]$$

$$X_2 = m * c * (T_2 - T_{out}) - T_{out} * m * c * ln\frac{T_2}{T_{out}} + 0$$

$$X_1 = m * c * \left(T_2 - T_{out}\left(1 + ln\frac{T_2}{T_{out}}\right)\right)$$

حيث (T_2) درجة حرارة كل من الحديد والماء المتساوية و(T_{out}) درجة حرارة المحيط. الإكسرجي النهائي للحديد والماء $(T_2 = 304.85\ K)$ هو

$$X_{2,iron} = 0.5\ kJ$$

$$X_{2,water} = 95.1\ kJ$$

الاختلاف بالأرقام ناتج عن الكتلة والحرارة النوعية للمواد المكونة للنظام.

$$X_{2,total} = X_{2,water} + X_{2,iron} = 95.6\ kJ$$

3) العمل المهدور هو نفس الإكسرجي المدمر في النظام ويعطى بالعلاقة

$$X_{destroyed} = (X_1 - X_2)$$

$$X_{destroyed} = 315 - 95.6 = 219.4\ kJ$$

يمكن حساب توليد الإنتروبي من العلاقة

$$X_{destroyed} = T_{out} * S_{gen}$$

$$S_{gen} = \frac{219.4}{293} = 0.7488\ \frac{kJ}{K}$$

المثال التطبيقي 1-10- العمل الكامن عند انتقال الحرارة بين خزانين.

بفرض أن لدينا خزانين من الهواء بحجم ثابت، يحتوي كل منهما على كتلة وقدرها $(30kg)$. درجة حرارة الخزان الأول هي $(900K)$ والثاني $(300K)$. وضع محرك حراري بينهما بحيث تتحرك الحرارة من المصدر العالي إلى المصدر المنخفض. حدد العمل الأعظمي ودرجة الحرارة النهائية للخزانات بفرض أن الحرارة النوعية ثابتة وتحسب عند درجة حرارة الغرفة.

الفرضيات: الهواء غاز مثالي بثابت وقدره $(0.287\ kJ/kgK)$ وحرارة نوعية بحجم ثابت عند درجة حرارة الغرفة $(0.718\ kJ/kgK)$.

التحليل: من القانون الأول في الترموديناميك نجد أن العمل الأعظمي

$$W_{max,out} = Q_H - Q_L$$

يجب حساب كمية الحرارة التي يعطيها المصدر العالي وكمية الحرارة التي يمتصها المصدر المنخفض. يجب الحصول على درجة الحرارة النهائية من أجل حساب كمية الحرارة. من توازن الإنتروبي نجد أن

$$(S_{in} - S_{out}) + S_{gen} = \Delta S_{sys}$$

نأخذ نظاماً حدوده الوسط المحيط ويحتوي على الخزانات والمحرك كاملاً لايوجد تبادل عمل أو حرارة.

$$0 + S_{gen} = \Delta S_{tank,source} + \Delta S_{tank,sink} + \Delta S_{heat\ engine}$$

نحصل على العمل الأعظمي عندما يكون توليد الإنتروبي مساوياً للصفر والعملية عكوسة في المحرك بالتعويض نجد

$$\Delta S_{tank,source} + \Delta S_{tank,sink} = 0$$

$$\left(mc_v ln\frac{T_2}{T_1} + mRln\frac{V_2}{V_1}\right)_{source} + \left(mc_v ln\frac{T_2}{T_1} + mRln\frac{V_2}{V_1}\right)_{sink} = 0$$

بما أن حجم الخزان ثابت تتحول المعادلة إلى

$$\left(ln\frac{T_2}{T_1}\right)_{source} + \left(ln\frac{T_2}{T_1}\right)_{sink} = 0$$

$$ln\left(\frac{T_2}{T_{source}} * \frac{T_2}{T_{sink}}\right) = 0$$

$$\frac{T_2}{T_{source}} * \frac{T_2}{T_{sink}} = 1$$

$$T_2 = \sqrt{T_{source} * T_{sink}}$$

$$T_2 = \sqrt{900 * 300}$$

$$T_2 = 519.6\ K$$

من معادلة انحفاظ الطاقة للمصدر نجد أن

$$-Q_{source,out} = \Delta U = mc_v(T_2 - T_{source})$$

$$Q_{source,out} = \Delta U = mc_v(T_{source} - T_2)$$

$$Q_{source,out} = 30kg * 0.718\ \frac{kJ}{kgK} * (900 - 519.6)K$$

$$Q_{source,out} = 8193\ kJ$$

معادلة انحفاظ الطاقة للمصرف

$$Q_{sink,in} = \Delta U = mc_v(T_2 - T_{sink})$$

$$Q_{sink,in} = 30kg * 0.718 \frac{kJ}{kgK} * (519.6 - 300)$$

$$Q_{sink,in} = 4731\ kJ$$

بالتعويض في معادلة القانون الأول نجد أن العمل المقدم هو

$$W_{max,out} = Q_H - Q_L$$

$$W_{max,out} = 8193 - 4731$$

$$W_{max,out} = 3463\ kJ$$

مناقشة:

هذا العمل هو أعظم عمل لأن توليد الإنتروبي مساوياً للصفر.

8.1 توازن الإكسرجي في الأنظمة المفتوحة.

تختلف الأنظمة المفتوحة عن الأنظمة المغلقة بوجود كتلة تتدفق عبر حدود النظام وهذا يترافق مع طاقة إضافية. يمكن أن نكتب معادلة توازن الإكسرجي للأنظمة المفتوحة بالشكل

$$\left\{\left(X_{heat}+X_{work}+X_{mass,in}\right)_{in}-\left(X_{heat}+X_{work}+X_{mass,out}\right)_{out}\right\} - X_{destroyed}=\Delta X_{system} \qquad (kJ)$$

بفرض أن كمية الحرارة تدخل النظام والعمل يخرج من النظام فإن المعادلة تتحول إلى

$$\left\{\left(X_{heat}+X_{mass,in}\right)-\left(X_{work}+X_{mass,out}\right)\right\} - X_{destroyed}=\left(X_2-X_1\right)_{cv} \qquad (kJ) \tag{30-1}$$

بالتعويض في قيم الإكسرجي للحرارة والعمل تتحول المعادلة إلى

$$\left\{\sum\left(1-\frac{T_{out}}{T_k}\right)Q_k-\left[W-P_{out}(V_2-V_1)\right] +\left(\sum_{in}m\psi-\sum_{out}m\psi\right)\right\}-X_{destroyed} = \left(X_2-X_1\right)_{cv} \quad (kJ) \tag{31-1}$$

أما بشكل معدل التغير والتي هي أكثر استعمالاً

$$\left\{\sum\left(1-\frac{T_{out}}{T_k}\right)\dot{Q}_k-\left[\dot{W}-P_{out}\frac{dV_{sys}}{dt}\right] +\left(\sum_{in}\dot{m}\psi-\sum_{out}\dot{m}\psi\right)\right\}-\dot{X}_{destroyed} = \frac{dX_{cv}}{dt} \quad (kW) \tag{32-1}$$

عندما يكون النظام المفتوح ذا جريان مستقر (لاتغيير مع الزمن) مثل العنفات أو الضواغط فيمكن أن نكتب المعادلة بالشكل

$$\left\{\sum\left(1-\frac{T_{out}}{T_k}\right)\dot{Q}_k-\dot{W}+\left(\sum_{in}\dot{m}\psi-\sum_{out}\dot{m}\psi\right)\right\} \qquad (33\text{-}1)$$
$$-\dot{X}_{destroyed}=0 \qquad (kW)$$

عندما يكون هناك مدخل واحد ومخرج واحد أي أن التدفقات متساوية تتحول المعادلة إلى

$$\left\{\sum\left(1-\frac{T_{out}}{T_k}\right)\dot{Q}_k-\dot{W}+\dot{m}(\psi_{in}-\psi_{out})\right\} \qquad (34\text{-}1)$$
$$-\dot{X}_{destroyed}=0 \quad (kW)$$

حيث أن

$$\psi_{in}-\psi_{out}=(h_{in}-h_{out})-T_{out}(s_{in}-s_{out})+\frac{V_{in}^2-V_{out}^2}{2}+g(z_{in}-z_{out})$$

يحسب العمل العكوس عندما يكون الإكسرجي المهدور مساوياً للصفر أي

$$\dot{W}=\sum\left(1-\frac{T_{out}}{T_k}\right)\dot{Q}_k+\dot{m}(\psi_{in}-\psi_{out}) \quad (kW) \qquad (35\text{-}1)$$

مع إهمال الطاقة الحركية والكامنة نجد أن المعادلة تتحول إلى

$$\dot{W}=\sum\left(1-\frac{T_{out}}{T_k}\right)\dot{Q}_k+\dot{m}\{(h_{in}-h_{out})-T_{out}(s_{in}-s_{out})\}$$

المثال التطبيقي 1-11- مردود القانون الثاني لعنفة بخارية.

تعمل عنفة بخارية بشكل مستقر على ضغط ($3MPa$) ودرجة حرارة (450℃) وبتدفق قدره ($8\ kg/s$) ويخرج البخار من العنفة بضغط ($0.2\ MPa$) ودرجة حرارة (150℃). تخسر العنفة كمية من الحرارة وقدرها ($300\ kW$) إلى الوسط الخارجي ذي الضغط ($100\ kPa$) ودرجة الحرارة (25℃) بفرض أن الطاقة الحركية والكامنة مهملة، حدد 1)

العمل الذي تقدمه العنفة 2) العمل الأعظمي الذي يمكن أن تقدمه العنفة 3) مردود القانون الثاني 4) الإكسرجي المدمر و5) إكسرجي البخار عند الدخول إلى العنفة.

الفرضيات: 1) الجريان مستقر و2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: من قانون انحفاظ الكتلة نجد أن التدفق ثابت بين المدخل والمخرج. مواصفات البخار عند الدخول والخروج تحسب من جداول بخار الماء. عند الحالة الأول ذات الضغط ودرجة الحرارة $[3MPa, 450℃]$ في حالة الدخول نجد أن

$$h_1 = 3344.9\ kJ/kg$$

$$s_1 = 7.0856\ kJ/kgK$$

عند الحالة الثانية ذات الضغط ودرجة الحرارة $[0.2MPa, 150℃]$ في حالة الخروج نجد أن

$$h_2 = 2769.1\ kJ/kg$$

$$s_2 = 7.281\ kJ/kgK$$

عند شروط الوسط المحيط (الخارجي) ذات الضغط ودرجة الحرارة $[100\ kPa, 25℃]$ نجد أن

$$h_{out} = h_{f@25} = 104.83\ kJ/kg$$

$$s_{out} = s_{f@25} = 0.3672\ kJ/kgK$$

1- العمل المقدم من العنفة يحسب من القانون الأول في الترموديناميك للعنفة

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{sys}/dt$$

بما أن الجريان المستقر نجد أن

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}h_1 = \dot{W}_{out} + \dot{Q}_{out} + \dot{m}h_2$$

$$\dot{W}_{out} = \dot{m}(h_1 - h_2) - \dot{Q}_{out}$$

$$\dot{W}_{out} = 8\frac{kg}{s} * (3344.9 - 2769.1)\frac{kJ}{kg} - 300kW$$

$$\dot{W}_{out} = 4306\ kW$$

2- العمل الأعظمي يمكن حسابه من توازن الإكسرجي على العنفة والمحيط بنظام حدوده المحيط

$$(\dot{X}_{in} - \dot{X}_{out}) - \dot{X}_{destroyed} = \frac{dX_{cv}}{dt}$$

يحسب العمل الأعظمي في الجريان مستقر عندما يكون الإكسرجي المهدور مساوياً للصفر

$$\dot{X}_{in} = \dot{X}_{out}$$

$$\dot{m}\psi_1 = \dot{W}_{rev,out} + \dot{X}_{heat} + \dot{m}\psi_2$$

بما أن النظام حدده المحيط فتكون كمية الحرارة المتبادلة مهملة

$$\dot{W}_{rev,out} = \dot{m}(\psi_1 - \psi_2)$$

$$\dot{W}_{rev,out} = \dot{m}\left[(h_1 - h_2) - T_o(s_1 - s_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)\right]$$

الطاقة الحركية والكامنة مهملة

$$\dot{W}_{rev,out} = \dot{m}[(h_1 - h_2) - T_o(s_1 - s_2)]$$

$$\dot{W}_{rev,out} = 8\frac{kg}{s} * (3344.9 - 2769.1)\frac{kJ}{kg} - 298K(7.0856 - 7.281)\frac{kJ}{kgK}$$

$$\dot{W}_{rev,out} = 5072\ kW$$

3- مردود القانون الثاني يحسب من العلاقة

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{W}_{rev,out}} = \frac{4306}{5072} = 0.849 \cong 84.9\%$$

أي أن 15% من العمل المفيد يهدر.

4- الفرق بين العمل المقدم والعمل العكوس هو الإكسرجي المهدور

$$\dot{X}_{destroyed} = \dot{W}_{rev,out} - \dot{W}_{out}$$

$$\dot{X}_{destroyed} = 5072 - 4306 = 776\ kW$$

يهدر خلال هذه العملية طاقة بمقدار $(776\ kW)$، يمكن حساب هذه القيمة أيضاً من خلال علاقة توليد الإنتروبي.

5- إكسرجي حالة الدخول هي

$$\psi_1 = [(h_1 - h_{out}) - T_{out}(s_1 - s_{out})]$$

$$\psi_1 = (3344.9 - 104.83)\frac{kJ}{kg} - 298K(7.0856 - 0.3672)\frac{kJ}{kgK}$$

$$\psi_1 = 1238\ kJ/kg$$

المثال التطبيقي 1-12- الإكسرجي المدمر خلال عملية خلط بخارين.

خزان بحجم $(200m^3)$ يحتوي على هواء عند ضغط $(100\ kPa)$ ودرجة حرارة $(300\ K)$. سنستخدم هذا الخزان في تخزين هواء مضغوط بضغط $(1\ MPa)$ ودرجة حرارة $(300\ K)$. يزود الهواء إلى الخزان بضغط $(P_o = 100\ kPa)$ ودرجة حرارة $(T_o = 300\ K)$، حدد العمل الأصغري الذي يجب تنفيذه خلال هذه العملية.

الفرضيات:1) الهواء غاز مثالي 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة 3) مواصفات الهواء ثابتة وتبقى كذلك بعد الضغط وخلال العملية الضغط.

التحليل: سنأخذ الخزان والضاغط بأنه النظام المدروس، هذا النظام مفتوح وغير مستقر لأن الكتلة تتغير مع الزمن خلال عملية الضخ. توجد فقط نقطة دخول واحدة ضمن هذا النظام.

العمل الأصغري المقدم من الضاغط هو العمل العكوس خلال هذه العملية والذي يمكن أن يحدد من خلال تطبيق معادلة توازن الإكسرجي على نظام مفتوح (الخزان والوسط المحيط) من العلاقة

$$(X_{in} - X_{out}) - X_{destroyed} = \Delta X_{system} \qquad (kJ)$$

$$(X_{in} - X_{out}) = \Delta X_{system}$$

$$(X_{in} - X_{out}) = X_2 - X_1$$

$$W_{rev,in} + m_1\psi_1 = m_2\phi_2 - m_1\phi_1$$

$$W_{rev,in} = m_2\phi_2$$

حيث (ψ_1, ϕ_1) هو الحالة الابتدائية للهواء في الخزان والهواء الداخل إلى الخزان والذي هو الحالة الميتة.

$$m_2 = \frac{P_2 V}{RT_2}$$

$$m_2 = \frac{1000kPa * 200m^3}{0.287\frac{kJ}{kgK} * 300K}$$

$$m_2 = 2323\ kg$$

$$\phi_2 = X_1 = [(u_2 - u_{out}) - T_{out}(s_2 - s_{out}) + P_{out}(v_2 - v_{out})]$$

بما أن الحرارة النهائية هي درجة الحرارة الابتدائية نفسها نجد

$$\phi_2 = P_{out}(v_2 - v_{out}) - T_{out}(s_2 - s_{out})$$

$$P_{out}(v_2 - v_{out}) = P_{out}\left(\frac{RT_2}{P_2} - \frac{RT_{out}}{P_{out}}\right) = P_{out}T_{out}\left(\frac{P_{out}}{P_2} - 1\right)$$

$$T_{out}(s_2 - s_{out}) = T_{out}\left(c_P ln\frac{T_2}{T_{out}} - Rln\frac{P_2}{P_{out}}\right) = -RT_{out}ln\frac{P_2}{P_{out}}$$

بالتعويض نجد

$$\phi_2 = P_{out}T_{out}\left(\frac{P_{out}}{P_2} - 1\right) - RT_{out}ln\frac{P_2}{P_{out}}$$

$$\phi_2 = RT_{out}\left(ln\frac{P_2}{P_{out}} + \frac{P_{out}}{P_2} - 1\right)$$

$$\phi_2 = 0.287\frac{kJ}{kgK} * 300K * \left(ln\frac{1000\ kPa}{100\ kPa} + \frac{100\ kPa}{1000\ kPa} - 1\right)$$

$$\phi_2 = 120.76\ kJ/kg$$

بالتعويض نجد أن

$$W_{rev,in} = m_2\phi_2$$

$$W_{rev,in} = 2323\ kg * 120.76\ kJ/kg$$

$$W_{rev,in} = 281\ MJ$$

ملخص فصل الإكسرجي (مقياس العمل الكامن)

- تعرف الحالة الميتة بأنها الحالة التي يكون فيها النظام قد وصل إلى حالة توازن حراري وميكانيكي (*Thermal & Mechanical Equilibrium*) مع المحيط (*Environment*) أي يكون النظام خالياً من الطاقة الحركية والكامنة ولايمكن أن يتفاعل كيميائياً (*Chemically Inert*) مع محيطه ولاتوجد فيه أي قوى مغناطيسية أو كهربائية أو أي قوى أخرى تجعله غير متوازن مع الوسط المحيط. شروط الحالة الميتة هي شروط الوسط المحيط بالنظام وبشكل عام توصف هذه الشروط بضغط جوي نظامي ($P_{out} = 1\ atm$) ودرجة الحرارة ($T_{out} = 25℃$) ويكون الإكسرجي عند هذه الشروط مساوياً للصفر.
- يعرف الإكسرجي بأنه العمل الأعظمي والذي يمكن أن يعطيه نظام ما بعملية عكوسة بين حالة ابتدائية معينة وشروط محيطه
- إكسرجي الطاقة الحركية في نظام ما

$$x_{ke} = ke = \frac{V^2}{2} \quad (kJ/kg)$$

- إكسرجي الطاقة الكامنة في نظام ما

$$x_{pe} = pe = gz \quad (kJ/kg)$$

- عمل المحيط

$$W_{surr} = P_{out}(V_2 - V_1) \quad (kJ)$$

- العمل المفيد (*Useful Work*)

$$W_{useful} = W - W_{surr} = W - P_{out}(V_2 - V_1) \quad (kJ)$$

- نعرف العمل العكوس (W_{rev}) بأنه العمل المفيد الأعظمي الذي يمكن إنتاجه أو إلى أنه العمل المفيد الأصغري الذي يمكن أن نزوده عندما يتحرك أي نظام بين حالة ابتدائية وحالة نهائية خلال عملية عكوسة.
- تعرف الضياعات *Irreversibility* إلى أنها الفرق بين العمل العكوس (W_{rev}) والعمل المفيد (W_{useful})

$$I = X_{destroyed} = T_{out}S_{gen} = W_{rev,out} - W_{useful,out} = W_{useful,in} - W_{rev,in}$$

- مردود القانون الثاني

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,rev}}$$

في الأجهزة المنتجة يكون

$$\eta_{II} = \frac{W_{useful}}{W_{rev}}$$

في الأجهزة المستهلكة يكون

$$\eta_{II} = \frac{W_{rev}}{W_{useful}}$$

في الأجهزة التبريدية يكون

$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}}$$

- إكسرجي في الأنظمة المغلقة

$$\phi = (u - u_{out}) + P_{out}(v - v_{out}) - T_{out}(s - s_{out}) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (kJ/kg)$$

- التغير في إكسرجي الأنظمة المغلقة

$$\Delta X = m(\phi_2 - \phi_1) \quad (kJ)$$

- إكسرجي في الأنظمة المفتوحة

$$\psi = (h - h_{out}) - T_{out}(s - s_{out}) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (kJ/kg)$$

- التغير في إكسرجي الأنظمة المفتوحة

$$\Delta X = m(\psi_2 - \psi_1) \quad (kJ)$$

- الإكسرجي المرافق لانتقال كمية معينة من الحرارة

$$X_{heat} = \left(1 - \frac{T_{out}}{T}\right) Q \quad kJ$$

- الإكسرجي المرافق لانتقال كمية معينة من العمل

$$X_{work} = W - W_{sur}$$

$$X_{work} = W - P_{out}(V_2 - V_1) \ (kJ)$$

- الإكسرجي المرافق لتدفق كمية معينة من الكتلة

$$X_{mass} = m\psi \ (kJ)$$

- مبدأ تناقص الإكسرجي أو الإكسرجي المهدور

$$\Delta X_{isolated} = (X_2 - X_1)_{isolated} \leq 0$$

- توازن الإكسرجي في الأنظمة المغلقة

$$(X_{in} - X_{out}) - X_{destroyed} = \Delta X_{system} \qquad (kJ)$$

$$\left\{\sum \left(1 - \frac{T_{out}}{T_k}\right) Q_k - [W - P_{out}(V_2 - V_1)]\right\} - T_{out} S_{gen} = X_2 - X_1 \ \ (kJ)$$

$$(\dot{X}_{in} - \dot{X}_{out}) - \dot{X}_{destroyed} = \frac{\Delta X_{system}}{dt} \qquad (kW)$$

$$\left\{\sum \left(1 - \frac{T_{out}}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \left[\dot{W} - P_{out} \frac{dV_{sys}}{dt}\right]\right\} - T_{out} \dot{S}_{gen} = \frac{dX_{sys}}{dt} \quad (kW)$$

- توازن الإكسرجي في الأنظمة المفتوحة

$$\left\{\sum \left(1 - \frac{T_{out}}{T_k}\right) Q_k - [W - P_{out}(V_2 - V_1)] + \left(\sum_{in} m\psi - \sum_{out} m\psi\right)\right\} - X_{destroyed} = (X_2 - X_1)_{cv} \quad (kJ)$$

$$\left\{\sum \left(1 - \frac{T_{out}}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \left[\dot{W} - P_{out} \frac{dV_{sys}}{dt}\right] + \left(\sum_{in} \dot{m}\psi - \sum_{out} \dot{m}\psi\right)\right\} - \dot{X}_{destroyed} = \frac{dX_{cv}}{dt} \quad (kW)$$

في الجريان المستقر والعمل الأعظمي ويوجد فقط مدخل ومخرج واحد

$$\dot{W} = \sum \left(1 - \frac{T_{out}}{T_k}\right) \dot{Q}_k + \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) \quad (kW)$$

مسائل غير محلولة لفصل
الإكسرجي (مقياس العمل الكامن)

1. خزان حراري جوفي بدرجة حرارة $(1500\ K)$ يمكن أن يعطي كمية من الحرارة قدرها $(150000\ kJ/h)$. حدد قيمة الإكسرجي للمصدر الحراري بفرض أن درجة حرارة المحيط (25℃).

2. محرك حراري يستقبل كمية من الحرارة من مصدر حراري مرتفع (منبع حراري) بقيمة $(700\ kJ/s)$ وبدرجة حرارة $(1500\ K)$ ويطرح كمية معينة من الحرارة إلى مصرف حراري بدرجة حرارة $(320\ K)$. العمل الذي يقدمه المحرك يقدر $(320\ kW)$ ودرجة حرارة الوسط الخارجي هي (25℃). حدد 1) الطاقة العكوسة 2) العمل الضائع 3) مردود القانون الثاني لهذا المحرك.

3. محرك حراري يطرح كمية من الحرارة إلى مصرف حراري بدرجة حرارة $(530\ R)$ وبمردود 36% ومردود القانون الثاني للمحرك نفسه هو 60%. حدد درجة حرارة المصدر الذي يزود هذه الحرارة.

4. حدد العمل المفيد الذي يمكن أن نحصل عليه من مصدر حراري يحتوي على $(100\ kJ)$ وبدرجة حرارة $(800\ K)$ بفرض أن درجة حرارة المحيط هي (25℃).

5. نظام أسطوانة – مكبس يحتوي على $(5\ kg)$ من وسيط التشغيل $(134A)$ بالشروط التالية $[P=0.7\ MPa, T=60℃]$. يبرد الوسيط بضغط ثابت إلى أن يتحول إلى سائل بدرجة حرارة (24℃). إذا كانت شروط الوسط الخارجي هي $[P=100\ kPa, T=24℃]$ حدد 1) إكسرجي الحالة الابتدائية والنهائية لوسيط التشغيل و2) الإكسرجي المدمر خلال تلك العملية.

6. يملأ مشع بكمية ($20\,L$) من بخار الماء المحمص ذي الشروط [P=200 kPa, T=200°C] وتغلق صمامات الدخول والخروج. بعد فترة معينة نلاحظ أن درجة حرارة المشع انخفضت إلى (80°C) نتيجة تبادل الحرارة مع الغرفة الموجود فيها ذات درجة الحرارة (21°C). بفرض أن الوسط المحيط بالغرفة ذو درجة حرارة (0°C) حدد 1) كمية الحرارة المتبادلة مع الغرفة 2) كمية الحرارة الأعظمية التي يمكن تبادلها مع الغرفة بفرض أن المشع هو المصدر المرتفع لمحرك تبريدي على شكل مضخة حرارية.

7. خزان صلب معزول يحتوي على (6 lbm) من خليط ماء – بخار بضغط (35 psia). في الحالة الأولى يكون ثلاثة أرباع الكتلة ماء أما الباقي فهو بخار. تم تشغيل مقاومة كهربائية ضمن الخزان لتحويل كامل السائل إلى بخار. بفرض أن الوسط المحيط بالخزان ذو شروط [P=14.7 psia, T=75] حدد 1) الإكسرجي المدمر و2) مردود القانون الثاني لهذه العملية.

8. يتم خنق بخار ضمن صمام خنق من الشروط [P=8 MPa, T=450°C] إلى [P= 6MPa] حدد العمل الضائع خلال هذه العملية.

9. يتم ضغط هواء ضمن ضاغط وبشكل مستقر من الشروط [P=100 kPa, T=17°C] إلى الشروط [P=600 kPa, T=167°C] وبتدفق (2.1 kg/min) بفرض أن استطاعة الضاغط هي (8 kW) حدد 1) الزيادة في إكسرجي الهواء و2) الإكسرجي المدمر خلال هذه العملية بفرض أن الوسط المحيط ذو درجة حرارة (17°C).

الفصل الثاني
Chapter Two

ترموديناميك الضواغط
Compressor Thermodynamics

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
C	السرعة المطلقة لدافع الضاغط النابذي	m/s
C_u	مسقط السرعة المطلقة على مماس الدافع النابذي	m/s
C_r	مسقط السرعة المطلقة على حامل قطر الدافع النابذي	m/s
c_p	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت	$kJ/kg\ K$
h	الإنتالبي النوعية	kJ/kg
HP	استطاعة الضاعظ	hp
k	العامل الأدياباتي	لابعدي
m	الكتلة	kg
$\dot{m}$	التدفق الكتلي	kg/sec
MEP	نسبة الضغط الوسطي الفعال	kPa أو bar
MEP_{isoth}	نسبة الضغط الوسطي الفعال الإيزوثرمية	kPa أو bar
n	العامل البوليتروبي	لابعدي
P	الضغط	kPa أو bar
P_a	ضغط الهواء الحر	kPa أو bar
P_o	ضغط الركود	kPa أو bar

P_f	الضغط النهائي للضاغط ذات الريش المنزلقة	kPa أو bar
R	ثابت وسيط التشغيل (الغاز)	$kJ/kg\ K$
r_p	نسبة الضغط	لابعدي
r_v	نسبة الانضغاط	لابعدي
S	الإنتروبي	kJ/K
T	درجة الحرارة	K أو ℃
T_o	درجة حرارة الركود	K أو ℃
U	السرعة المماسية لدافع الضاغط النابذي	m/s
V	الحجم	m^3
V_{max}	الحجم الأعظمي	m^3
V_{min}	الحجم الأصغري	m^3
V_{BDC}	الحجم عند النقطة الميتة السفلى	m^3
V_{TDC}	الحجم عند النقطة الميتة العليا	m^3
V_s	حجم المسح	m^3
V_c	حجم الخلوص	m^3
V_{FAD}	حجم الهواء الحر الممتص	m^3
V_a	حجم الهواء بشروط الهواء الحر	m^3
V_{roots}	حجم الهواء المسلم في الضاغط ذات الريش المستقيمة	m^3

$\dot{V}$	التدفق الحجمي	m^3/s
v	الحجم النوعي	m^3/kg
v_{min}	الحجم النوعي عند النقطة الميتة السفلى	m^3/kg
v_{max}	الحجم النوعي عند النقطة الميتة العليا	m^3/kg
W	السرعة الحلزونية للدافع الضاغط النابذي	m/s
$W_{c,isoth}$	عمل الضاغط الإيزوثرمي	kJ
$W_{c,act}, W_a$	عمل الضاغط الحقيقي	kJ
$W_{c,poly}$	عمل الضاغط البوليتروبي	kJ
$W_{c,adia}$	عمل الضاغط الأدياباتي	kJ
W_{net}	عمل الضاغط الصافي	kJ
W_{LP}	عمل الضاغط في المرحلة المنخفضة	kJ
$W_{c,HP}$	عمل الضاغط في المرحلة المرتفعة	kJ
W_c	عمل الضاغط المتعدد المراحل الكلي	kJ
W_{isen}	عمل الضاغط الإيزونتروبي	kJ
W_{revo}	عمل الضاغط لدورة واحدة	kJ
W_{roots}	عمل الضاغط ذي الريش المستقيمة	kJ
W_{vane}	عمل الضاغط ذي الريش المنزلقة	kJ
W_{cen}	عمل الضاغط النابذي	kJ

w_{net}	العمل الصافي في الدورة الغازية	kJ/kg
$\eta_{c,isoth}$	المردود الإيزوثرمي	لابعدي
η_{Roots}	مردود الضاغط ذات الريش المستقيمة	لابعدي
η_{vol}	المردود الحجمي	لابعدي

مقدمة الفصل.

الضواغط هي أجهزة هندسية تعمل على تحويل الطاقة الكهربائية المقدمة لها إلى عمل ميكانيكي يظهر على شكل ارتفاع في ضغط وسيط التشغيل العامل بهذه الأجهزة. تستعمل الضواغط بشكل أساسي في الدورات الغازية والتبريدية التي سوف تدرس لاحقاً. سندرس في هذا الفصل الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية *Positive Displacement Compressors* والضواغط الديناميكية *Dynamics Compressors*. تقسم الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية إلى ضواغط ترددية *Reciprocating Compressors* وضواغط دورانية *Rotary Compressors*. الضواغط الدورانية تقسم إلى ضواغط ذات الريش المستقيمة *Straight Lobe Compressors* أو تسمى *Roots Blowers* والضواغط ذات الريش المنزلقة *Vane Type Compressors* أو *Sliding Vane* والضواغط الحلزونية *Screw Type or Helical Type*. سندرس أيضاً الضواغط الديناميكية التي تتميز عن الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية بالتدفقات المستمرة التي تعطيها مثل الضواغط النابذية *Centrifugal Compressors* والمحورية *Axial Compressors*. سنقارن بين الدورة الحقيقية والمثالية للضواغط الترددية ثم نقوم بتحديد نسب الضغوط المثلى للضواغط الترددية المتعددة المراحل. سنضع الأسس الترموديناميكية لكافة أنواع الضواغط المدروسة ونعرف العمل الأصغري المقدم إلى الضاغط باستخدام عمليات انضغاط أدياباتية وإيزوثرمية وبوليتروبية. سنتعرف أيضاً على المردود الإيزوثرمي والمردود الحجمي للضواغط بكافة أنواعها.

<u>الفوائد العلمية من الفصل</u>

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ تصنيف الضواغط بطرق مختلفة.
- ✓ تحليل الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية مثل الضواغط الترددية.

- ✓ وضع الأسس الترمويدناميكية للضواغط الترددية أحادية المرحلة والمتعددة المراحل.
- ✓ تحديد المردود الإيزوثرمي والمردود الحجمي للضواغط إلى أنواعها.
- ✓ تحليل الضواغط الدورانية ذات الإزاحة الإيجابية مثل الضواغط ذات الريش المستقيمة والمنزلقة والحلزونية ووضع الأسس الترموديناميكية لها.
- ✓ تحليل الضواغط الديناميكية ذات التدفقات المستمرة مثل الضواغط النابذية والمحورية ووضع الأسس الترموديناميكية لها.

محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.2	الضواغط وأنواعها.	91
2.2	ترموديناميك الضواغط الترددية.	97
3.2	عمل الضاغط الترددي أو مايسمى العمل التقني.	98
1.3.2	العمل في العملية الإيزوبارية.	101
2.3.2	العمل في العملية الإيزوخورية.	103
3.3.2	العمل في العملية الإيزوثرمية.	104
4.3.2	العمل في العملية البوليتروبية.	105
5.3.2	العمل في العملية الأدياباتية.	106
6.3.2	مقارنة العمل التقني في العمليات الترموديناميكية.	
4.2	المردود الإيزوثرمي.	
5.2	المردود الحجمي.	
6.2	المقارنة بين الدورة المثالية والدورة الحقيقية للضاغط الترددي.	
7.2	الضواغط الترددية المتعددة المراحل.	
8.2	ترموديناميك الضواغط الدورانية.	
1.8.2	الضواغط ذات الريش المستقيمة.	
2.8.2	الضواغط الحلزونية.	
3.8.2	الضواغط ذات الريش المنزلقة.	
9.2	ترموديناميك الضواغط النابذية.	

ملخص الفصل.

مسائل غير محلولة.

نهاية الفصل.

1.2 الضواغط وأنواعها.

الضاغط هو محرك *Engine* يمتص كمية من الطاقة الكهربائية ويحولها إلى طاقة ميكانيكية تعطى إلى وسيط التشغيل على شكل ضغط. الضواغط التي تستعمل الهواء كوسيط تشغيل تسمى بالضواغط الهوائية *Air Compressors*. تستخدم الضواغط في الكثير من التطبيقات الهندسية مثل الأجهزة الميكانيكية الهوائية والتي تعمل على الهواء *Pneumatic Tools* وأجهزة تنظيف السطوح وأجهزة البخ الحراري والضواغط الموجودة في محركات الطائرات والضواغط الموجودة في أجهزة التكييف (مبردات) والضواغط الموجودة في المحطات الغازية. تشبه الضواغط في عملها المراوح المحورية أو النابذية ولكن تختلف عنها بقيم نسب الضغط *Pressure Ratio* التي تعطيها. تعرف نسبة الضغط بأنها النسبة بين ضغط الخروج إلى ضغط الدخول بغض النظر عن عدد المراحل التي يمر بها وسيط التشغيل. نسبة الضغط في المراوح المحورية *Axial Fans* هي (1.1) وفي المراوح النابذية *Blowers* هي بين (4 – 1.1) أما في الضواغط الهوائية فهي أكبر من (4). يبين الشكل (1–2) الضواغط وأنواعها.



الشكل (1–2) أنواع الضواغط.

يمكن أن تصنف الضواغط بعدة أشكال

i.بالاعتماد على نوعية العمل *Principle of Operation*.

✓ الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية *Positive Displacement Compressors*. في هذه الضواغط يكون وسيط التشغيل محصوراً ضمن مكان معين ذي حدود صلبة (مثلاً أسطوانة) تكون إحدى هذه السطوح الصلبة (مثلاً سطح المكبس) قابلة للتحرك في اتجاه واحد فقط من أجل 1) رفع ضغط وسيط التشغيل إلى الضغط المطلوب و2) عدم السماح لهذا الوسيط بالتحرك في الاتجاه المعاكس. تقسم الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية إلى:

- الضواغط المكبسية الترددية *Reciprocating Compressors*.

تتألف الضواغط المكبسية الترددية كما في الشكل (2-2) من أسطوانة – مكبس حيث يؤدي تحرك المكبس في اتجاه معين إلى رفع ضغط وسيط التشغيل إلى الضغط المطلوب. تعطي الضواغط المكبسية الترددية نسب ضغوط عالية جداً ولكن تكون قدرتها على تسليم كميات كبيرة من وسيط الشتغيل محدودة أو صغيرة.

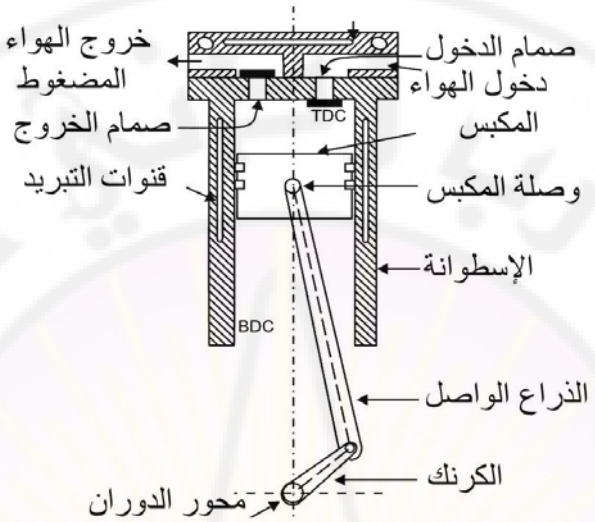
- الضواغط الدورانية *Rotary Compressors*.

تتألف الضواغط الدورانية من جزء دوار تؤدي حركته باتجاه معين إلى رفع ضغط وسيط التشغيل وتقسم هذه الضواغط إلى:

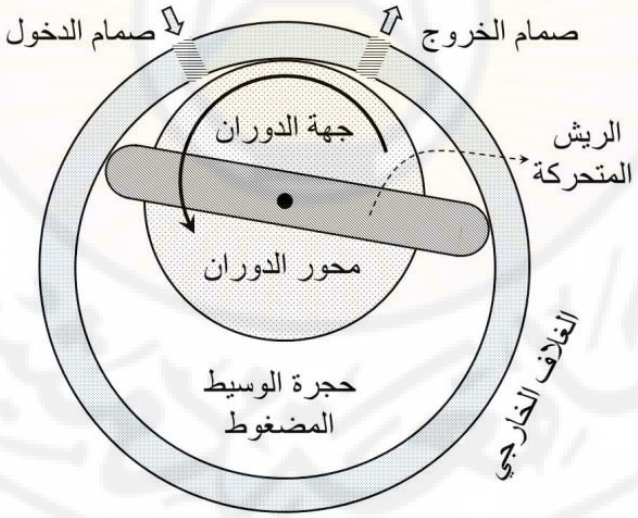
a) ضواغط بريش منزلقة *Sliding Vanes* كما في الشكل (3-2).

b) ضواغط الريش (الفص) المستقيمة *Straight Lobe Compressors* كما في الشكل (4-2).

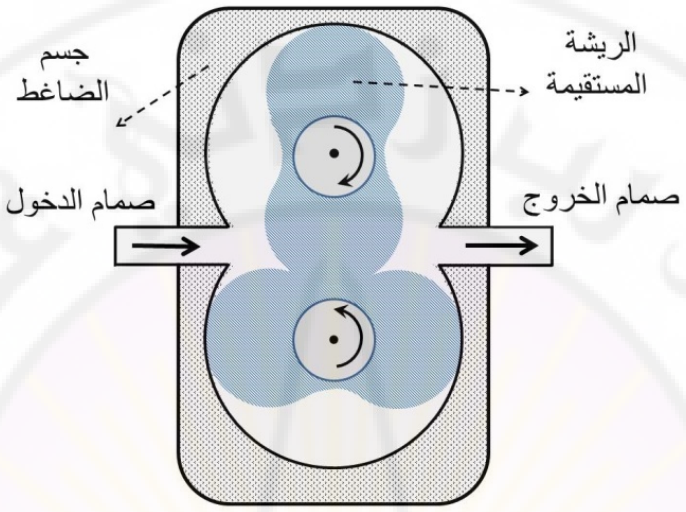
c) ضواغط الريش (الفص) الحلزونية *Helical Lobe Compressors* أو تسمى الضواغط الحلزونية *Screw Compressors* كما في الشكل (5-2). هي أمثلة عن الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية.



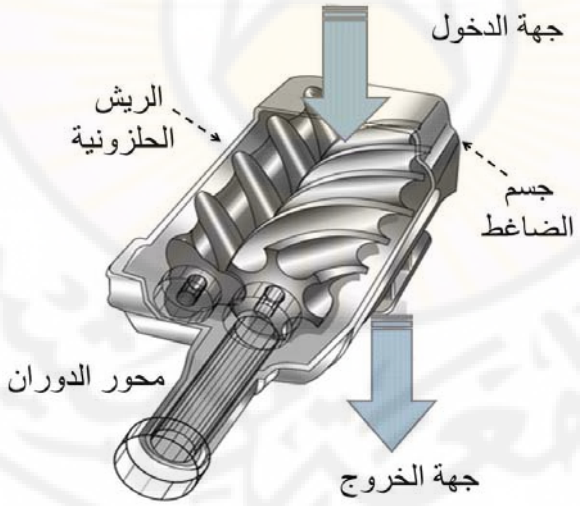
الشكل (2-2) الضواغط الترددية.



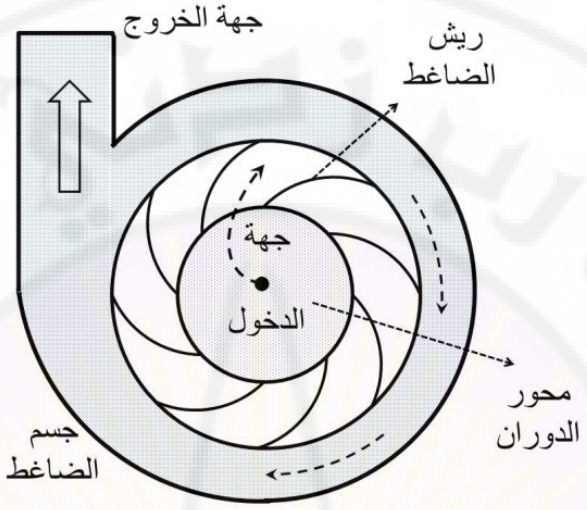
الشكل (2-3) ضواغط بريش منزلقة.



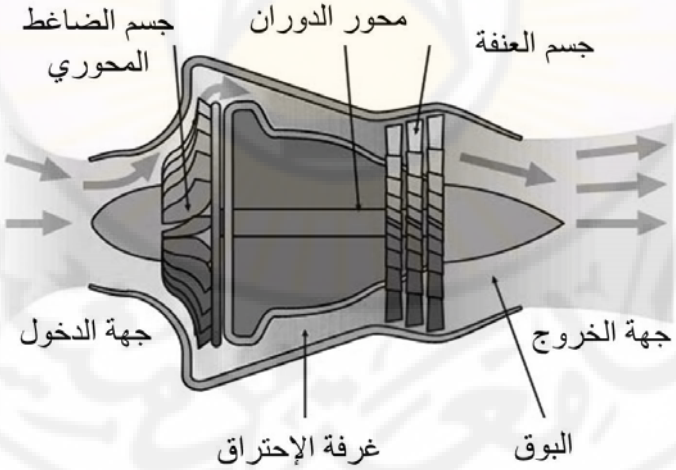
الشكل (4–2) ضواغط بريشة (فص) مستقيم.



الشكل (5–2) الضواغط الحلزونية.



الشكل (2-6) ضاغط نابذي (عنفي).



الشكل (2-7) الضواغط المحورية.

- ✓ الضواغط الديناميكية *Dynamic Compressors* أو تسمى الضواغط ذات التدفق المستمر *Continuous Flow Compressors*.

تقوم الضواغط الديناميكية وبشكل مستمر على رفع ضغط تدفق معين من وسيط التشغيل ضمن مكان محصورة بحدود صلبة. تقسم هذه الضواغط إلى:

a) ضواغط نابذية *Centrifugal Compressors* كما في الشكل (6−2) أو تسمى بالضواغط العنفية.

b) ضواغط محورية التدفق *Axial Flow Compressors* كما في الشكل (7−2) كما في محركات الطائرات.

c) ضواغط ذات جريات مختلطة *Mixed Flow Compressors* التي تجمع بين الحالتين السابقتين.

ii. بالاعتماد على عدد مراحل العمل *Number of Stages*.

تصنف الضواغط أيضاً بحسب عدد مراحل العمل والذي يحدده الضغط الأعظمي المطلوب لوسيط التشغيل عند خروجه من الضاغط. قد تكون الضواعط بمرحلة عمل واحدة *Single Stage* حيث تصل نسبة الضغط إلى (5) أو متعدة المراحل *Multi-Stage* حيث تصل نسبة الضغط إلى أكبر من (5). القيم الأعظمية لضغط الخروج تتبع لعدد المراحل في الضاغط فالضواغط ذات المرحلة الواحدة تعطي $(5\ bar)$ والضواغط ذات المرحلتين تعطي ضغوطاً بين $[5 - 35\ bar]$ والضواغط ذات ثلاثة مراحل تعطي ضغوطاً بين $[35 - 85\ bar]$ والضواغط بأربعة مراحل تعطي ضغوطاً أكبر من $(85\ bar)$.

iii. بالاعتماد على استطاعة الضاغط *Capacity of Compressors*.

تُعرف استطاعة الضاغط بالتدفق الحجمي لوسيط التشغيل عبر الضاغط. فالضواغط ذات الاستطاعة المنخفضة يكون تدفقها الحجمي أقل من $(0.15\ m^3/s)$ والضواغط ذات

الاستطاعة المتوسطة تعطي تدفقات حجمية بين $[0.15\ m^3/s - 5\ m^3/s]$ والضواعط ذات الاستطاعة المرتفعة تعطي تدفقات حجمية أكبر من $(5\ m^3/s)$.

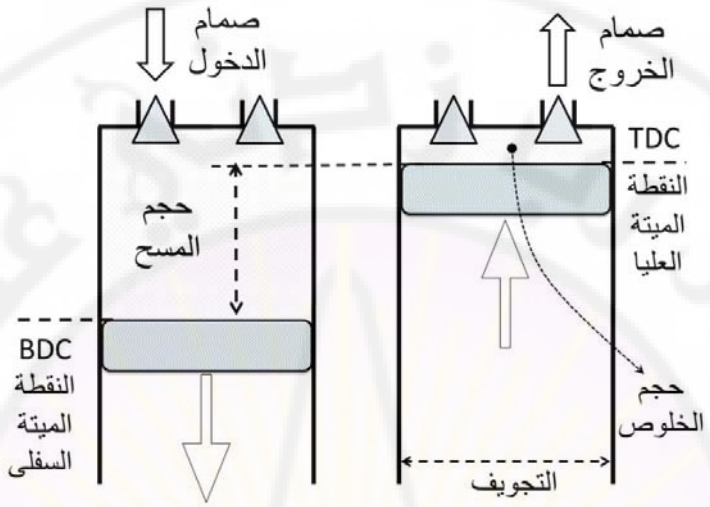
iv. بالاعتماد على ضغط الخروج *Highest Pressure Developed*.

يمكن تصنيف الضواغط أيضاً بحسب ضغط وسيط التشغيل الخارج من الضاغط. ضواغط تعطي ضغوطاً منخفضة تصل إلى $(1\ bar)$ وضواغط تعطي ضغوطاً متوسطة تقع ضمن المجال $[1\ bar - 8\ bar]$ وضواغط تعطي ضغوطاً مرتفعة بين $[8\ bar - 10\ bar]$ وضواغط تعطي ضغوطاً مرتفعة جداً أعلى من $(10\ bar)$.

2.2 ترموديناميك الضواغط الترددية *Reciprocating Compressors*.

سنقوم باعتماد **الهواء** كوسيط تشغيل في كافة الضواغط الترددية لسهولة إيجاد البارامترات الترموديناميكية للهواء. سنقوم باعتبار الهواء غازاً مثالياً ضمن أي ضاغط.

يتردد المكبس الموجود في أسطوانة الضاغط الترددي بين نقطتين ثابتتين. النقطة الأول تسمى النقطة الميتة العليا *Top Dead Center (TDC)* ويشكل المكبس عند وصوله إلى هذه النقطة مع غطاء الأسطوانة **أصغر** حجم ممكن يسمى بحجم الخلوص *Clearance Volume* (V_c) كما في الشكل (8−2). في الدورات النظرية يهمل حجم الخلوص ولكن هذا الحجم لايمكن إهماله في الدورات الحقيقية. ضغط الهواء عند وصول المكبس إلى النقطة الميتة العليا والموافق لحجم الخلوص نظرياً يسمى **بضغط التفريغ** وهو **أعلى ضغط** متشكل ضمن الأسطوانة. النقطة الثانية تسمى النقطة الميتة السفلى *Bottom Dead Center (BDC)* ويشكل المكبس عند وصوله إلى هذه النقطة مع جدران الأسطوانة أكبر حجم ممكن يسمى بحجم المسح *Swept Volume,* (V_s) أو حجم الامتصاص. ضغط الهواء عند وصول المكبس إلى النقطة الميتة السفلى والموافق لحجم المسح نظرياً بضغط الهواء الممتص وهو أخفض ضغط متشكل ضمن الأسطوانة ويسمى **بضغط الإمتصاص**.



الشكل (8−2) نقاط الموجودة في الضاغط الترددي
والشوط وحجم الخلوص.

يدخل الهواء عبر صمام الدخول *Intake Valve* إلى الأسطوانة ويخرج مضغوطاً عن طريق صمام الخروج *Exhaust Valve*. تسمى المسافة بين النقطة الميتة العليا والسفلى أيضاً بشوط المحرك *Stroke* أو حجم الإزاحة *Displacement Volume* ويعطى بالرمز (V_D) ويسمى قطر الأسطوانة بالتجويف *Bore*.

3.2 عمل الضاغط الترددي أو مايسمى العمل التقني *(Technical Work)*.

العمل المقدم إلى الأجهزة الهندسية ذات الجريانات المستقرة العكوسة هو عمل خارجي يختلف عن عمل الحدود في الأنظمة المغلقة ذات الحدود المتغيرة وعمل التدفق في الأنظمة المفتوحة. يسمى هذا العمل بالعمل التقني *Technical Work*. لحساب هذا العمل التقني نبدأ من القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة العكوسة

$$\delta q_{rev} - \delta w_{tech,rev,out} = dh + dke + dpe \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\delta\dot{Q}_{rev} - \delta\dot{W}_{tech,rev,out} = \dot{m} * dh + dKE + dPE \quad (kW)$$

كمية الحرارة بحسب تعريف الإنتروبي وعلاقة (Tds) تعطى بالشكل

$$\delta q_{rev} = Tds$$

من علاقة (Tds) نجد أن

$$Tds = dh - vdP$$

بتعويض علاقة (Tds) في معادلة كمية الحرارة (δq_{rev}) نجد أن

$$\delta q_{rev} = dh - vdP$$

بتعويض كمية الحرارة في القانون الأول نجد أن

$$-\delta w_{tech,rev,out} = vdP + dke + dpe$$

بالمكاملة بين حالتين نجد

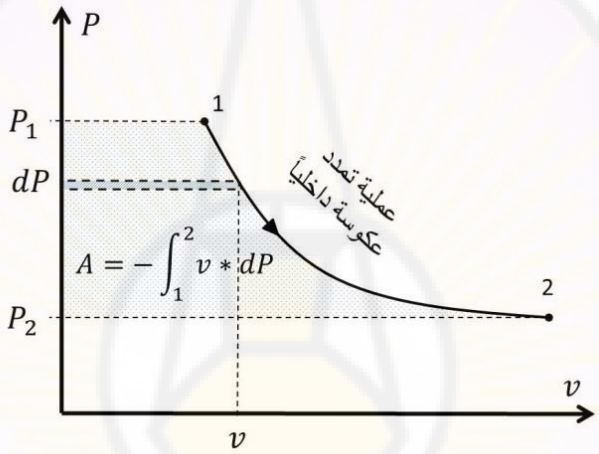
$$w_{tech,rev,out} = -\int_1^2 vdP - \Delta ke - \Delta pe \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \tag{1-2}$$

بأخذ الإشارة السالبة وبحسب عرف الإتجاه على أن العمل السابق مقدم إلى النظام وبإهمال الطاقة الحركية والكامنة تتحول المعادلة (1−2) إلى

$$w_{tech,rev,in} = \int_1^2 vdP \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \tag{2-2}$$

$$\dot{W}_{tech,rev,in} = \dot{m} * \int_1^2 vdP \qquad (kW)$$

العلاقة (2−2) تسمى العمل التقني في الجريانات المستقرة وهي أقل عمل ممكن تزويده إلى الأجهزة الهندسية. نلاحظ من العلاقة بأن العمل التقني العكوس يزداد مع ازدياد الحجم النوعي (نقصان الكثافة) مع إهمال الطاقة الحركية والكامنة لذلك نعمل على تخفيض الحجم النوعي للوسيط من أجل تقليل العمل اللازم في عملية ما. يمكن حساب العمل التقني من مخطط $(P-v)$ بحساب المستحة المحصورة بين العملية ومحور الضغوط كما في الشكل (9−2).



الشكل (9−2) العمل التقني.

لكي نقوم على حساب العمل التقني في العلاقة السابقة يجب أن يتوفر لدينا علاقة (تابع) الحجم النوعي بدلالة الضغط قبل أن نقوم بحساب قيمة التكامل في العلاقة السابقة.

1.3.2 العمل في العملية الإيزوبارية.

عندما يكون الضغط ثابتاً يكون العمل التقني يساوي الصفر ولا معنى لهذه العملية على الإطلاق.

$$w_{tech,rev,in} = \int_1^2 vdP = 0$$

2.3.2 العمل في العملية الإيزخورية.

عندما يكون وسيط التشغيل غير قابل للانضغاط (الحجم النوعي ثابتاً) مثل الماء فيمكن إخراج الحجم النوعي إلى خارج التكامل وتتحول العلاقة إلى

$$w_{rev,in} = v * (P_2 - P_1) \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (3\text{-}2)$$

يسمى هذا العمل في العلاقة السابقة بضاغط المضخة *Pump Head*. بمكاملة العلاقة (2−1) وبجعل العمل معدوماً كما في الجريان في الأبواق أو النواشر أو الأنابيب فتتحول المعادلة إلى المعادلة المعروفة في ميكانيك السؤائل والتي تسمى بمعادلة برنولي *Bernoulli Equation*

$$\frac{(P_2 - P_1)}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) = 0 \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (4\text{-}2)$$

المثال التطبيقي 2−1 – ضغط سائل بالمقارنة مع ضغط غاز.

حدد العمل اللازم لضغط بخار ماء بشكل إيزونتروبي بين الحالة $(100\,kPa)$ و $(1\,MPa)$ بفرض أن البخار الخارج من العملية هو 1) ماء مشبع و2) بخار مشبع.

الفرضيات. 1) جريان مستقر 2) نهمل الطاقة الحركية والكامنة 3) العملية إيزونتروبية.

التحليل: العمل التقني بسحب العلاقة السابقة هو

$$w_{rev,out} = -v * (P_2 - P_1)$$

ولكن العمل هو عمل مقدم إلى المضخة وبالتالي

$$w_{rev,in} = v(P_2 - P_1)$$

الحالة الأولى سائلاً مشبعاً.

يبقى وسيط التشغيل على شكل سائل مشبع ضمن المضخة وبالتالي

$$v_{1@100kPa} = 0.001043\ m^3/kg$$

ولا تغيير في الحجم النوعي عند خروجه من المضخة أي يبقى سائلاً مشبعاً. بالتعويض في علاقة العمل التقني نجد أن العمل المقدم هو

$$w_{rev,in,liquid} = (0.001043\ m^3/kg) * (1000 - 100)kPa$$

$$w_{rev,in,liquid} = 0.94\ kJ/kg$$

الحالة الثانية بخاراً مشبعاً.

يكون وسيط التشغيل بخاراً مشبعاً وبالتالي يجب تحديد بارامترات كلتا الحالتين. باعتبار أن العملية إيزونتروبية نجد أن

$$Tds = dh - vdP$$

$$dh = vdP$$

بالتعويض في العمل نجد أن

$$w_{rev,in,vapor} = \int_1^2 vdP = \int_1^2 dh$$

$$w_{rev,in,vapor} = h_2 - h_1$$

عند دخول البخار إلى المضخة بالبارامترات التالية $(100\ kPa, Sat\ Vapor)$ تكون قيمة الإنتالبي المأخوذة من جداول الإشباع بدلالة الضغط هي

$$h_1 = h_g = 2675\ kJ/kg$$

$$s_1 = s_g = 7.3589\ kJ/kgK$$

عند خروج البخار من الضخة بالبارمترات التالية $(1\ MPa,\ s_2 = s_1)$ نجد من الجداول أن البخار هو بخار محمص وقيمة الإنتالبي هي

$$h_2 = 3194.5\ kJ/kg$$

$$s_2 = s_1 = 7.3589\ kJ/kgK$$

$$T_2 = 366.65\ ℃$$

وبالتالي يكون العمل التقني

$$w_{rev,in,vapor} = (3194.5 - 2675)$$

$$w_{rev,in,vapor} = 519.5\ kJ/kg$$

مناقشة.

نلاحظ أيضاً أن العمل اللازم لرفع ضغط البخار هو 500 مرة العمل اللازم لرفع ضغط السائل بين حدود ضغط متساوية.

3.3.2 العمل في العملية الإيزوثرمية.

بإعتبار أن وسائط التشغيل التي تستخدم في الضواغط هي غازات مثالية كالهواء فيمكن إستخدام علاقة الحالة أو الغاز المثالي في حساب العمل التقني للضاغط كما يلي

$$Pv = RT$$

$$v = \frac{RT}{P}$$

بتعويض العلاقة السابقة في معادلة العمل التقني (2−2) نجد أن

$$w_{tech,rev,in} = \int_1^2 vdP = \int_1^2 \frac{RT}{P} dP$$

بالمكاملة بين الحالة الإبتدائية والنهائية للعملية الإيزوثرمية نجد أن علاقة العمل التقني تتحول إلى

$$w_{isoth,rev,in} = RT\ ln\frac{P_2}{P_1} \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (5\text{-}2)$$

4.3.2 العمل في العملية البوليتروبية.

بإستخدام العلاقة البوليتروبية في إستخراج العلاقة بين الضغط والحجم النوعي نجد أن

$$P * v^n = const$$

بتعويض العلاقة السابقة في معادلة العمل التقني (2−2) نجد أن

$$w_{tech,rev,in} = \int_1^2 vdP = \int_1^2 \frac{const}{P^{(1/n)}} dP = \int_1^2 const * P^{-(1/n)} * dP$$

بالمكاملة بين الحالة الإبتدائية والنهائية للعملية الإيزوثرمية نجد أن علاقة العمل التقني تتحول إلى

$$w_{poly,rev,in} = \frac{n-1}{n}(P_2v_2 - P_1v_1) \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (6\text{-}2)$$

بإخراج الضغط والحجم النوعي في الحالة الإبتدائية من العلاقة السابقة وبأخذ العلاقات البوليتروبية العامة

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$$

نجد أن العلاقة (6−2) تتحول إلى

$$w_{poly,rev,in} = \frac{n}{n-1} * P_1 v_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad \left(\frac{kJ}{kg} \right) \qquad (7\text{-}2)$$

تسمى النسبة بين ضغط التفريغ وضغط الامتصاص بنسبة الضغط *Pressure Ratio,* (r_p) وتعطى بالعلاقة

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} \qquad (8\text{-}2)$$

تسمى النسبة بين حجم المسح وحجم الخلوص بنسبة الانضغاط *Compression Ratio,*(r_v) وهي وتعطى بالعلاقة

$$r_v = \frac{v_1}{v_2} = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_s}{V_c} = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}} \qquad (9\text{-}2)$$

بإستخدام نسبة الضغط في معاجلة العمل التقني في العملية البوليتروبية نجد أن المعادجلة تتحول إلى

$$w_{poly,rev,in} = \frac{n}{n-1} * P_1 v_1 \left[\left(r_p \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad \left(\frac{kJ}{kg} \right) \qquad (10\text{-}2)$$

5.3.2 العمل في العملية الأدياباتية.

علاقة العمل في العملية الأدياباتية هو نفسه في العلاقة البوليتروبية ولكن يختلف الثابت من (n) إلى (k) اي تصبح العلاقة من الشكل

$$w_{adia,rev,in} = \frac{k}{k-1} * P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad \left(\frac{kJ}{kg} \right) \qquad (11\text{-}2)$$

أو بالشكل

$$w_{adia,rev,in} = \frac{k}{k-1} * P_1 V_1 \left[(r_p)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad \left(\frac{kJ}{kg} \right) \qquad (12\text{-}2)$$

6.3.2 مقارنة العمل التقني في العمليات الترموديناميكية.

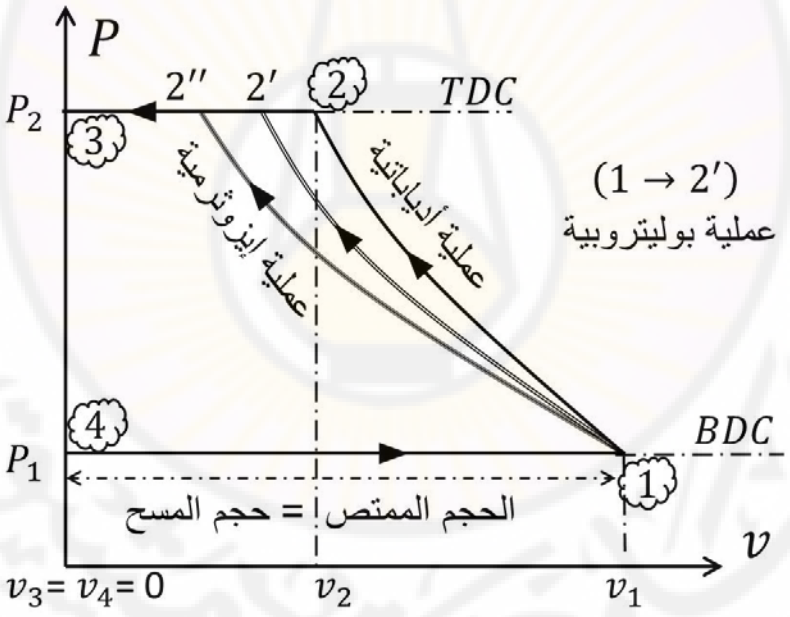
نلاحظ من العمليات الترموديناميكية السابقة أن العمل في العملية الإيزوثرمية أقل من العمل في العملية البوليتروبية كما أن العمل في العملية البوليتروبية أقل من العمل في العمل الأدياباتية (للهواء مثلا $k = 1.4 > n = 1.3$).

$$w_{adia,rev,in} > w_{poly,rev,in} > w_{isoth,rev,in}$$

يبين الشكل (2−10) العمليات الترموديناميكية التي تحدث في الضاغط ممثلة على مخطط $(P - v)$.

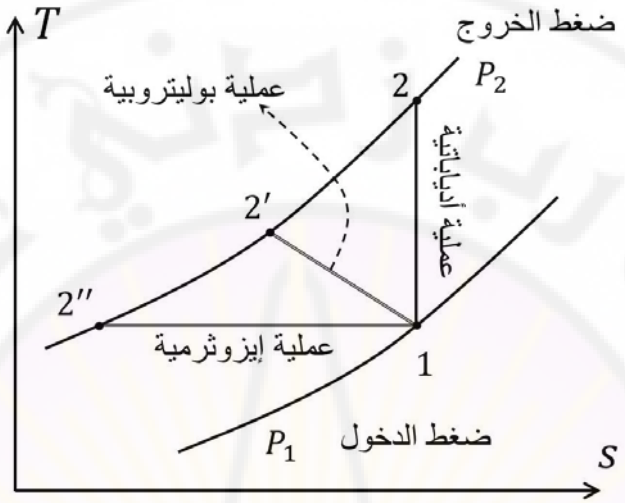
- ✓ تمثل العملية $(1 \rightarrow 2)$ عملية انضغاط أدياباتية *Adiabatic Compression* وهي العملية الأكبر من حيث المساحة.
- ✓ تمثل العملية $(1 \rightarrow 2')$ عملية انضغاط بوليتروبية *Polytropic Compression*.
- ✓ تمثل العملية $(1 \rightarrow 2'')$ عملية انضغاط إيزوثرمية *Isothermic Compression*.
- ✓ تمثل العملية $(1 \rightarrow 4)$ عملية دخول (سحب) الهواء إلى أسطوانة الضاغط.
- ✓ تمثل العملية $(2 \rightarrow 3)$ عملية طرح الهواء المضغوط إلى خارج الضاغط.

يمكن حساب عمل الانضغاط من مخطط $(P-v)$ من خلال حساب المساحة المحصورة بين محور الحجم النوعي ومنحني أي عملية من العمليات السابقة. نلاحظ أن أيضاً أن العمل الأصغري الذي يبذله الضاغط هو المساحة المحصورة تحت عملية الانضغاط إيزوثرمية أي العملية $(2'' \rightarrow 1)$ ومحور الضغط والعمل الأعظمي الذي يبذله الضاغط هو المساحة المحصورة تحت عملية الانضغاط أدياباتية أي العملية $(2 \rightarrow 1)$ ومحور الضغط. لايمكن تحقيق عملية الانضغاط الإيزوثرمية في الضواغط الحقيقية لأن مكبس الأسطوانة يتحرك بسرعات عالية جداً فلذلك، ومن أجل دراسة هذه الضواغط، نأخذ عملية الانضغاط الأدياباتية أو عملية الانضغاط البوليتروبية بثابت بوليتروبي للهواء يتراوح بين $[n = 1.25 - 1.35]$.



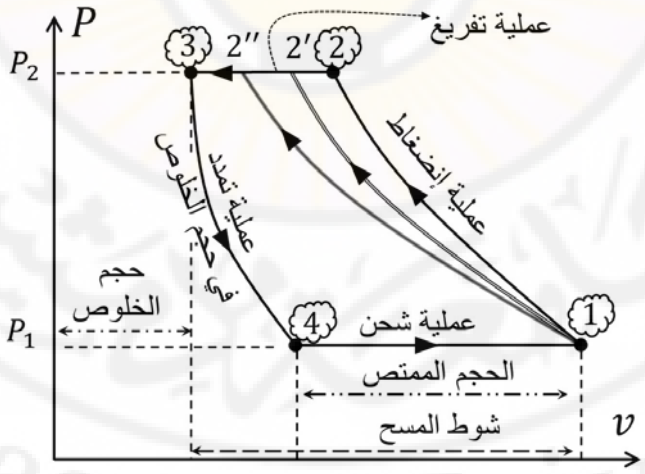
الشكل (10–2) العمليات الترموديناميكية في الضاغط الترددي بدون حجم الخلوص.

يبين الشكل (11–2) العمليات الترموديناميكية التي تحدث في الضاغط ممثلة على مخطط $(T-s)$.



الشكل (11–2) عمليات الانضغاط الترموديناميكية على مخطط $(T-s)$.

يبين الشكل (12–2) العمليات الترموديناميكية التي تحدث في الضاغط ممثلة على مخطط $(P-v)$ وتأثير حجم الخلوص على هذه الدورة.



الشكل (12–2) العمليات الترموديناميكية في الضاغط الترددي مع حجم الخلوص.

4.2 المردود الإيزوثرمي *Isothermal Efficiency*.

من أجل المقارنة بين الدورات الحقيقية والدورات المثالية في الضواغط الترددية نقوم باستخدام المردود الإيزوثرمي والذي يعرف بأنه النسبة بين العمل الإيزوثرمي (العمل الأصغري) إلى العمل الحقيقي (العمل البوليتروبي) ويعطى بالعلاقة

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,act}} \qquad (13\text{-}2)$$

يتراوح العمل الحقيقي $(W_{c,act})$ بين العمل الأدياباتي والعمل الإيزوثرمي أي أن العمل الحقيقي هو عمل بوليتروبي يتراوح فيه ثابت البوليتروب بين $(1 < n < k)$. بتعويض العمل الإيزوثرمي والعمل البوليتروبي في علاقة المردود الإيزوثرمي نجد أن

$$\eta_{c,isoth} = \frac{n-1}{n} * \frac{ln(r_p)}{(r_p)^{\frac{n-1}{n}} - 1} \qquad (14\text{-}2)$$

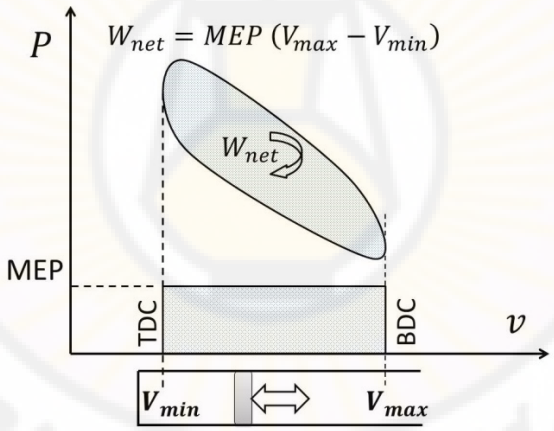
نلاحظ أن قيم المردود الإيزوثرمي **تتراوح** بين قيم عملية الانضغاط الأدياباتية $(n = k)$ وقيم عملية الانضغاط الإيزوثرمية $(n > 1)$ التي يكون عندها قيمة المردود 100%. يمكن أن نرفع من قيم المردود بالاقتراب من العملية الإيزوثرمية قدر المستطاع ويتم ذلك عن طريق:

- تبريد جسم الأسطوانة بواسطة وسيط تبريد هوائي من خلال استخدام ريش أو زعانف *Fins* على جسم الأسطوانة من الخارج.
- تبريد جسم الأسطوانة بواسطة وسيط تبريد مائي *Water Jacket* محيط بجسم الأسطوانة.
- حقن الماء في نهاية عملية الانضغاط لتبريد الهواء المضغوط الداخل إلى الأسطوانة وهذا يحتاج إلى تصاميم معقدة لجسم الأسطوانة.
- يمكن استخدام تقنية التبريد البيني *Intercooling* في الضواغط المتعددة المراحل حيث يتم تبريد الهواء الخارج من المرحلة السابقة قبل دخوله إلى المرحلة التالية.

هناك نسبة أخرى تستخدم في المحركات الترددية في حساب العمل الصافي وهي نسبة الضغط الوسطي الفعال *Mean Effective Pressure (MEP)* كما هو واضح في الشكل (13−2). تعرف نسبة الضغط الوسطي الفعال بنسبة العمل الصافي إلى حجم الهواء في الأسطوانة. هذه النسبة هي نسبة افتراضية إذا طبقت على مكبس المحرك الترددي وعلى طول شوطه تُنتج كمية العمل نفسها التي تنتجه دورة حقيقة. تعطى علاقة نسبة الضغط الوسطي الفعال بدلالة العمل الحقيقي بالشكل

$$W_{net} = MEP * \text{الشوط} * \text{مساحة المكبس}$$

$$W_{net} = MEP * \text{حجم الإزاحة}$$



الشكل (13−2) نسبة الضغط الوسطي الفعال في المحركات الترددية.

وبالتالي فإن

$$MEP = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{w_{net}}{v_{max} - v_{min}} \quad (kPa) \qquad (15\text{-}2)$$

تستخدم هذه النسبة للمقارنة بين المحركات الترددية ذات القياس نفسه وكلما كانت هذه النسبة أكبر كان العمل المستخرج من المحرك أكبر. استطاعة الضاغط تعطى بالعلاقة

$$HP = MEP * \dot{V} \quad (kW)$$

يجب الأخذ بعين أن $(1\ hp = 0.7457\ kW)$

المثال التطبيقي 2-2 – ضاغط ترددي بمرحلة واحدة.

ضاغط ترددي يضغط هواء حر من الحالة الأولى ذات البارامترات $[P_1 = 1\ bar, T_1 =$ 17°C] إلى الحالة الثانية ذات الضغط $[P_2 = 6\ bar]$. باعتبار أن الضاغط بمرحلة واحدة ويدور بسرعة $(N = 120\ RPM)$ وبفرض أن قطر الأسطوانة هو $(24\ cm)$ وشوطها $(36\ cm)$ أوجد 1) نسبة الضغط الوسطي الفعال 2) استطاعة الضاغط عندما تكون عملية الانضغاط إيزوثرمية وأدياباتية وبوليتروبية بعامل بوليتروبي يساوي (1.3) ثم احسب 3) المردود الإيزوثرمي عندما يعمل الضاغط بشكل بوليتروبي وأدياباتي.

الفرضيات: 1) وسيط التشغيل هو الهواء الذي يعمل على شكل غاز مثالي 2) حجم الخلوص مهمل والضاغط مثالي.

التحليل: نسب الضغط بين الدخول والخروج هي

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{6}{1} = 6$$

حجم المسح يساوي حجم الإزاحة باعتبار أن حجم الخلوص يساوي الصفر

$$\dot{V} = V * N_{rev}$$

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * L$$

$$V = \frac{\pi}{4} * (0.24m)^2 * (0.36m)$$

$$V = 0.01628\ m^3$$

بالتعويض نجد أن التدفق الحجمي

$$\dot{V} = \frac{\pi}{4} * D^2 * L * N_{rev}$$

$$\dot{V} = 0.01628 m^3 * \left(120 \frac{round}{min}\right)$$

$$\dot{V} = 1.954\ m^3/min$$

1- في **عملية الانضغاط الإيزوثرمية** يمكن حساب العمل الإيزوثرمي من العلاقة

$$W_{c,isoth} = P_1 V_1 ln(r_p)$$

$$W_{c,isoth} = 100\ kPa * 0.01628 m^3 * ln(6)$$

$$W_{c,isoth} = 2.917\ kJ$$

نسبة الضغط الوسطي الفعال تعطى بالعلاقة

$$MEP = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}}$$

نسبة الضغط الوسطي الفعال لعملية الانضغاط الإيزوثرمية حيث $(V_{min} = 0)$ هي

$$MEP_{isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{V}$$

$$MEP_{isoth} = \frac{2.917\ kPa * m^3}{0.01628\ m^3}$$

$$MEP_{isoth} = 179.175\ kPa$$

أو يمكن حسابها من العلاقة

$$MEP_{isoth} = \frac{P_1 V_1 ln(r_p)}{V_1}$$

$$MEP_{isoth} = P_1 ln(r_p)$$

$$MEP_{isoth} = 100\ kPa * ln(6)$$

$$MEP_{isoth} = 179.175\ kPa$$

تعطى استطاعة الضاغط بالعلاقة

$$HP_{isoth} = MEP_{isoth} * \dot{V}$$

$$HP_{isoth} = 179.175\ kPa * \frac{1.954}{60}\frac{m^3}{s}$$

$$HP_{isoth} = 5.8351\ kW = 7.825\ hp$$

2- في **عملية الانضغاط البوليتروبية** يمكن حساب العمل البوليتروبي ذات العامل ($n = 1.3$) من العلاقة

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left[(r_p)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$W_{c,poly} = \frac{1.3}{0.3} * 100kPa * 0.01628m^3 * \left[(6)^{\frac{0.3}{1.3}} - 1 \right]$$

$$W_{c,poly} = 3.6125\ kJ$$

نسبة الضغط الوسطي الفعال للعملية البوليتروبية هو

$$MEP_{poly} = \frac{W_{c,poly}}{V_1}$$

$$MEP_{poly} = \frac{3.6125\ kJ}{0.01625\ m^3}$$

$$MEP_{poly} = 221.89\ kPa$$

أو من العلاقة

$$MEP_{poly} = \frac{\frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left[(r_p)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}{V_1}$$

$$MEP_{poly} = \frac{n}{n-1} * P_1 \left[(r_p)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$MEP_{poly} = 221.89\ kPa$$

تعطى استطاعة الضاغط بالعلاقة

$$HP_{poly} = MEP_{poly} * \dot{V}$$

$$HP_{poly} = 221.89\ kPa * \frac{1.954}{60} \frac{m^3}{s}$$

$$HP_{poly} = 7.226\ kW = 9.69\ hp$$

3- في **عملية الانضغاط الأدياباتية** يمكن حساب العمل الأدياباتي من العلاقة

$$W_{c,adia} = \frac{k}{k-1} * P_1 V_1 \left[(r_p)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$W_{c,adia} = \frac{1.4}{0.4} * 100kPa * 0.01628m^3 * \left[(6)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right]$$

$$W_{c,adia} = 3.802\ kJ$$

نسبة الضغط الوسطي الفعال للعملية الأدياباتية هو

$$MEP_{adia} = \frac{W_{c,adia}}{V_1}$$

$$MEP_{adia} = \frac{3.802\ kJ}{0.01625\ m^3}$$

$$MEP_{adia} = 233.98\ kPa$$

أو من العلاقة

$$MEP_{adia} = \frac{\frac{k}{k-1} * P_1 V_1 \left[\left(r_p\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{V_1}$$

$$MEP_{adia} = \frac{k}{k-1} * P_1 \left[\left(r_p\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$MEP_{adia} = 233.98\ kPa$$

تعطى استطاعة الضاغط بالعلاقة

$$HP_{adia} = MEP_{adia} * \dot{V}$$

$$HP_{adia} = 233.89\ kPa * \frac{1.954}{60} \frac{m^3}{s}$$

$$HP_{adia} = 7.617\ kW = 10.22\ hp$$

يعطى المردود الإيزوثرمي من العلاقة

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,act}}$$

من أجل عمل حقيقي يساوي العمل البوليتروبي يكون المردود

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,poly}}$$

$$\eta_{c,isoth} = 0.8075\ or\ 80.75\%$$

من أجل عمل حقيقي يساوي عمل أدياباتي يكون المردود من الشكل

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,adia}}$$

$$\eta_{c,isoth} = 0.7657\ or\ 76.57\%$$

مناقشة:

	العمل المقدم (kJ)	الضغط الوسطي الفعال (kPa)	الاستطاعة (kW)	المردود
العملية الإيزوثرمية	2.917	179.175	5.8351	100
العملية البوليتروبية	3.6125	221.89	7.226	80.75
العملية الأدياباتية	**3.802**	233.98	**7.617**	**76.57**

نلاحظ من الجدول السابق أن العمل المقدم للضاغط في عملية الانضغاط الأدياباتية والذي يساوي $(W_{c,adia} = 3.802\ kJ)$ هو أكبر عمل لذلك يمثل العمل الحقيقي للضاغط والذي يوافق استطاعة مقدمة بقيمة $(7.617\ kW)$ ومردود (76.57).

المثال التطبيقي 2–3 – ضاغط ترددي بعملية بوليتروبية.

ضاغط ترددي يضغط هواء حراً من الحالة $[P_1 = 1\ bar, T_1 = 20°C]$ بعملية بوليتروبية ذات عامل بوليتروبي $[n = 1.2]$ حتى ضغط تفريغ $[P_2 = 12\ bar]$، باعتبار أن الضاغط بمرحلة واحدة ونسبة طول الشوط إلى قطر الأسطوانة هي $[L/D = 1.8]$ وحجم المسح هو $(1\ m^3)$. أوجد المردود الإيزوثرمي وقطر الأسطوانة في هذا الضاغط.

الفرضيات: 1) وسيط التشغيل هو الهواء والذي يعمل على شكل غاز مثالي 2) حجم الخلوص مهمل والضاغط مثالي.

التحليل: يحسب المردود الإيزوثرمي خلال عملية انضغاط بوليتروبية حقيقية من الشكل

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,poly}}$$

العمل البوليتروبي يحسب من العلاقة

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left[(r_p)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

تحسب نسبة الضغط من العلاقة

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{12}{1} = 12$$

بالتعويض نجد

$$W_{c,poly} = \frac{1.2}{0.2} * 100kPa * 1m^3 \left[(12)^{\frac{0.2}{1.2}} - 1 \right]$$

$$W_{c,poly} = 307.851\ kJ$$

أو من العلاقة

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * mR[T_2 - T_1]$$

تحسب الكتلة من معادلة الغاز المثالي

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1}$$

$$m = \frac{100kPa * 1m^3}{0.287\ \frac{kJ}{kgK} * 293K}$$

$$m = 1.18918\ kg$$

بما أن العملية بوليتروبية فإن درجة الحرارة النهائية هي

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$T_2 = 443.334\ K$$

$$W_{c,poly} = \frac{1.2}{0.2} * 1.18918\ kg * 0.287 \frac{kJ}{kgK} [443.334 - 293]K$$

$$W_{c,poly} = 307.849\ kJ$$

العمل الإيزوثرمي يحسب من العلاقة

$$W_{c,isoth} = P_1 V_1 ln(r_p)$$

أو من العلاقة

$$W_{c,isoth} = mRT_1 ln(r_p)$$

بالتعويض نجد أن

$$W_{c,isoth} = 100kPa * 1m^3 * ln12$$

$$W_{c,isoth} = 248.491\ kJ$$

بالتعويض في المردود الإيزوثرمي نجد أن

$$\eta_{c,isoth} = \frac{248.49}{307.849} = 0.8071\ or\ 80.71\ \%$$

قطر الأسطوانة يحسب من حجم المسح والذي يساوي $(1m^3)$

$$\left[\frac{\pi}{4} * (D\ m)^2 * (L\ m)\right] = 1\ m^3$$

وبما أن نسبة الشوط إلى القطر هي $[L/D = 1.8]$ أي ان $[L = 1.8D]$ وبالتعويض نجد

$$\left[\frac{\pi}{4} * (D\ m)^2 * (1.8D\ m)\right] = 1m^3$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4}{1.8 * \pi}}$$

$$D = 0.891\ m = 89.1\ cm$$

5.2 المردود الحجمي *Volumetric Efficiency*.

يعرف المردود الحجمي على أنه النسبة بين حجم الهواء الحقيقي الحر الممتص في الضاغط إلى حجم المسح ويعطى بالعلاقة

$$\eta_{vol} = \frac{V_{FAD}}{V_s} = \frac{V_a}{V_s} \qquad (16\text{-}2)$$

(V_{FAD}) هو حجم الهواء الحر الممتص *Free Air Delivery (FAD)* والذي يعرف إلى أنه حجم الهواء الممتص تحت شروط الهواء الحر. شروط الهواء الحر هي [$1\ atm, 15℃$ 1]. تم اختيار شروط الهواء الحر لمقارنة المردود الحجمي للضواغط الترددية عند شروط موحدة. باستخدام معادلة الغاز المثالي نجد حجم الهواء الحر الممتص بالعلاقة

$$\frac{P_a * V_a}{T_a} = \frac{P_1 * (V_1 - V_4)}{T_1} = \frac{P_2 * (V_2 - V_3)}{T_2}$$

وبالتالي فإن حجم الهواء الحر الممتص لدورة واحدة (شوط واحد) يعطى بالعلاقة

$$V_a = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1}(V_1 - V_4) \qquad (17\text{-}2)$$

أما حجم المسح فيعرف بالفرق بين الحجم في الحالة (1) والحجم عند الحالة (3) كما في العلاقة

$$V_s = V_1 - V_3 \qquad (18\text{-}2)$$

بتعويض المعادلة (17−2) و (18−2) في معادلة المردود الحجمي نجد أن

$$\eta_{vol} = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1}\frac{(V_1 - V_4)}{(V_1 - V_3)}$$

ولكن

$$V_1 = V_c + V_s$$

$$V_3 = V_c$$

حيث (V_c) حجم الخلوص و بالتعويض نجد

$$\eta_{vol} = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1} * \left\{1 + \frac{V_c}{V_s} - \frac{V_4}{V_s}\right\}$$

بضرب وتقسيم النسبة (V_4/V_s) بحجم الخلوص نجد

$$\frac{V_4}{V_s} = \frac{V_c}{V_s} * \frac{V_4}{V_c}$$

$$\frac{V_4}{V_s} = \left(\frac{1}{r_v}\right) * \frac{V_4}{V_c}$$

ولكن العملية بين $(3 \rightarrow 4)$ عملية بوليتروبية

$$\frac{V_4}{V_c} = \frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{1/n} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/n}$$

تتحول معادلة المردود الحجمي إلى

$$\eta_{vol} = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1} * \left\{1 + \frac{1}{r_v} - \frac{1}{r_v}\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/n}\right\}$$

ويمكن كتابتها بالشكل

$$\eta_{vol} = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1} * \left\{1 + \frac{1}{r_v} - \frac{1}{r_v}\left(r_p\right)^{1/n}\right\} \qquad (19\text{-}2)$$

تعتمد قيمة المردود الحجمي على درجة حرارة وضغط المحيط (P_a, T_a) ودرجة حرارة وضغط الامتصاص (P_1, T_1) ونسبة الانضغاط (r_v) وضغط التفريغ (P_2) وبالتالي نسبة الضغط(r_p) ويزداد المردود الحجمي بتناقص نسبة الضغط (P_2/P_1). تتراوح قيم المردود الحجمي بين 60% و 90% عملياً.

المثال التطبيقي 2-4 – ضاغط ترددي مع حجم خلوص.

ضاغط ترددي بمرحلة واحدة يعطي تدفق $(10\ m^3/min)$ عند شروط الهواء الحر التالية $[P_a = 1\ bar, T_a = 27°C]$ وبنسبة ضغط $[r_p = 7]$. الشروط عند نهاية عملية الامتصاص هي $[P_1 = 0.97\ bar, T_1 = 35°C]$. يدرو الضاغط بسرعة $[240\ RPM]$ بحجم خلوص قدره 5% من حجم المسح. باعتبار أن نسبة طول الشوط إلى قطر الأسطوانة هي $[L/D = 1.2]$ أوجد 1) المردود الحجمي 2) أبعاد الأسطوانة و3) المردود الإيزوثرمي للضاغط باعتبار أن عملية الانضغاط هي عملية بوليتروبية بعامل $[n = 1.25]$.

الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء الذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: يحسب المردود الحجمي من العلاقة

$$\eta_{vol} = \frac{V_{FAD}}{V_s} = \frac{V_a}{V_s}$$

$$V_a = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1}(V_1 - V_4)$$

شروط الهواء الحر هي $(T_a = 300K)$ والضغط $(P_a = 100\ kPa)$. الحجم (V_1) يحسب من حجم المسح

$$V_s = V_1 - V_3$$

ولكن حجم الخلوص هو

$$V_c = V_3 = 0.05 * V_s$$

أي أن

$$V_1 = 1.05\ V_s$$

الحجم V_4 يحسب من عملية التمدد البوليتروبية ($3 \rightarrow 4$) بالشكل

$$\frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{1/n} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/n}$$

$$V_4 = V_3 * \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/n}$$

$$V_4 = 0.05V_s * (7)^{\frac{1}{1.25}}$$

$$V_4 = 0.273\, V_s$$

بالتعويض نجد أن

$$V_a = \frac{0.97 * 300 * (1.05\, V_s - 0.273\, V_s)}{1 * 308}$$

$$V_a = 0.768\, V_s$$

بالتعويض في المردود الحجمي نجد أن

$$\eta_{vol} = \frac{0.768\, V_s}{V_s} = 0.768\ or\ 76.8\%$$

أبعاد الأسطوانة تحسب من التدفق الحجمي لدورة واحدة من العلاقة

$$V = \dot{V}/N$$

$$V = 10\frac{m^3}{min} * \frac{1}{240}\frac{min}{cycle}$$

$$V = 0.04166\, m^3 per\ cycle$$

حجم المسح يساوي حجم الأسطوانة في الدورة

$$0.04166m^3 = \left[\frac{\pi}{4} * (D\ m)^2 * (L\ m)\right]$$

بما أن $[L/D = 1.2]$ أي $[L = 1.2D]$

$$0.04166m^3 = \left[\frac{\pi}{4} * (D\ m)^2 * (1.2D\ m)\right]$$

$$D = 0.3536\ m = 35.36\ cm$$

المردود الإيزوثرمي يحسب من العلاقة

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,poly}}$$

العمل الإيزوثرمي يحسب من العلاقة

$$W_{c,isoth} = P_1 V_1 ln(r_p) = \dot{m} * R * T_1 * ln(r_p)$$

التدفق الكتلي يحسب من علاقة الغاز المثالي

$$\dot{m} = \frac{P_1 \dot{V}_1}{RT_1}$$

$$\dot{m} = \frac{100kPa * 10m^3/min}{0.287\ \frac{kJ}{kgK} * 300K}$$

$$\dot{m} = 23.23\ kg/min$$

بالتعويض نجد أن

$$W_{c,isoth} = \dot{m} R T_1 ln(r_p)$$

$$W_{c,isoth} = 23.23 \frac{kg}{min} * 0.287 \frac{kJ}{kgK} * 308K * ln7$$

$$W_{c,isoth} = 3995.81 \frac{kJ}{min} = 66.597\ kW$$

العمل البوليتروبي يحسب من العلاقة

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * \dot{m} * R * (T_2 - T_1)$$

تحسب T_2 من عملية الانضغاط البوليتروبية بالشكل

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{n-1/n}$$

$$T_2 = 300K * (7)^{0.25/1.25}$$

$$T_2 = 454.54\ K$$

$$W_{c,poly} = \frac{1.25}{0.25} * 23.23\frac{kg}{min} * 0.287\frac{kJ}{kgK} * (454.54 - 308)K$$

$$W_{c,poly} = 4884.917\frac{kJ}{min} = 81.415\ kW$$

المردود الإيزوثرمي هو

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,poly}}$$

$$\eta_{c,isoth} = \frac{66.597}{81.415} = 0.81799\ or\ 81.799\%$$

المثال التطبيقي 25 – ضاغط ترددي مع حجم خلوص وشروط مختلفة.

ضاغط ترددي هوائي بمرحلة واحدة يعطي $(5\ m^3/min)$ عند شروط الهواء الحر التالية $[P_a = 1.02\ bar, T_a = 27℃]$ يدرو الضاغط بسرعة $[200\ RPM]$ وبحجم خلوص قدره 5% من حجم المسح. يفرغ الهواء بضغط $[P_2 = 8\ bar]$ بعملية انضغاط بوليتروبي ذي عامل $[n = 1.3]$. تزداد درجة حرارة الهواء خلال عملية الامتصاص بمقدار $(\Delta T =$ 10℃). يظهر انخفاض في الضغط عند الامتصاص بمقدار $[\Delta P = 0.03\ bar]$ وانخفاض بالضغط عند التفريغ بمقدار $[\Delta P = 0.05\ bar]$. حدد المردود الحجمي واستطاعة الضاغط.

الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء والذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: يحسب المردود الحجمي من العلاقة

$$\eta_{vol} = \frac{V_{FAD}}{V_s} = \frac{V_a}{V_s}$$

أو من العلاقة

$$\eta_{vol} = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1} * \left\{1 + \frac{1}{r_v} - \frac{1}{r_v}\left(r_p\right)^{1/n}\right\}$$

شروط الهواء الحر هي $(T_a = 300K)$ والضغط $(P_a = 102\ kPa)$ وشروط الامتصاص هي $(T_1 = 310K)$ والضغط $(P_1 = 102 - 3 = 99\ kPa)$ وشروط التفريغ هي ذات ضغط $(P_2 = 800 + 5 = 805\ kPa)$.

$$1/r_v = V_c/V_s$$

$$1/r_v = 0.05V_s/V_s$$

$$1/r_v = 0.05$$

بالتعويض نجد أن

$$\eta_{vol} = \frac{300K}{102kPa} * \frac{99kPa}{310} * \left\{1 + 0.05 - 0.05\left(\frac{805}{99}\right)^{1/1.3}\right\}$$

$$\eta_{vol} = 0.75079\ or\ 75.079\%$$

يحسب عمل الضاغط في العملية البوليتروبية بالشكل

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * P_1V_1\left[\left(r_p\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

الحجم عند الامتصاص يحسب من علاقة الغاز المثالي

$$\frac{P_1\dot{V}_1}{T_1} = \frac{P_a\dot{V}_a}{T_a}$$

$$V_1 = \frac{P_a \dot{V}_a}{T_a} * \frac{T_1}{P_1}$$

$$\dot{V}_1 = \frac{102kPa * 5m^3/min}{300K} * \frac{310K}{99kPa}$$

$$\dot{V}_1 = 5.3232\ m^3/min$$

أو

$$V_1 = \dot{V}_1/N$$

$$V_1 = \left(\frac{102kPa * 5m^3/min}{300K}\right) * \frac{310K}{99kPa} * \left(\frac{1\ min}{200\ cycle}\right)$$

$$V_1 = 0.0266m^3$$

بالتعويض نجد أن العمل يساوي

$$W_{c,poly} = \frac{1.3}{1.3-1} * 99kPa * \left(5.3232\frac{m^3}{60\ s}\right) * \left(\left(\frac{805}{99}\right)^{\frac{1.3-1}{1.3}} - 1\right)$$

$$W_{c,poly} = 23.672\ kW$$

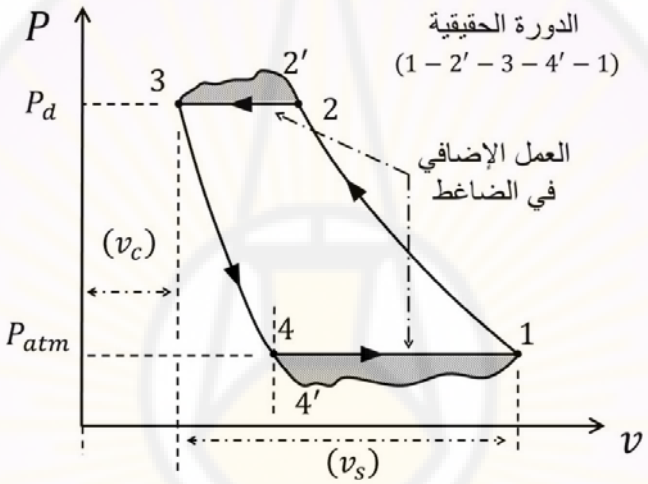
تحسب استطاعة الضاغط من العلاقة

$$HP_{c,poly} = \frac{23.672\ kW}{0.7457\ kW/hp} = 31.744\ hp$$

6.2 المقارنة بين الدورة المثالية والدورة الحقيقية للضاغط الترددي.

يبين الشكل (2−14) المقارنة بين الدورة الحقيقية $(1-2'-3-4'-1)$ والدورة المثالية للضاغط الترددي $(1-4-3-2-1)$. في الدورة الحقيقية تنتهي عملية الضغط $(2 \rightarrow 1)$ عند النقطة (2) وعندها يجب على صمام التفريغ أن يفتح بشكل تلقائي لتفريغ وسيط التشغيل ولكن هذا لايحدث في الدورة الحقيقية لذلك تستمر

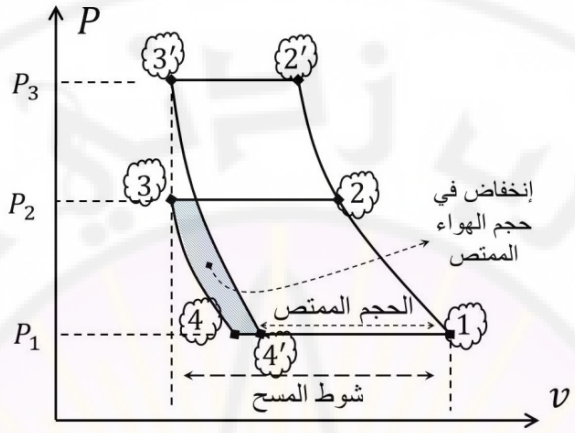
عملية الانضغاط إلى النقطة $(2')$ ويؤدي ذلك إلى زيادة العمل المطلوب كما هو ظاهر بالمنطقة المهشرة في الشكل $(3 - 2' - 2)$. أيضاً تنتهي عملية التمدد $(4 \rightarrow 3)$ عند النقطة (4) وعندها يجب على صمام السحب أن يفتح بشكل تلقائي لسحب وسيط التشغيل الجديد في العملية $(1 \rightarrow 4)$ من أجل ضغطه ولكن هذا لايحدث لذلك تستمر عملية التمدد إلى النقطة $(4')$.



الشكل (14–2) المقارنة بين الدورة الحقيقية والمثالية للضاغط الترددي.

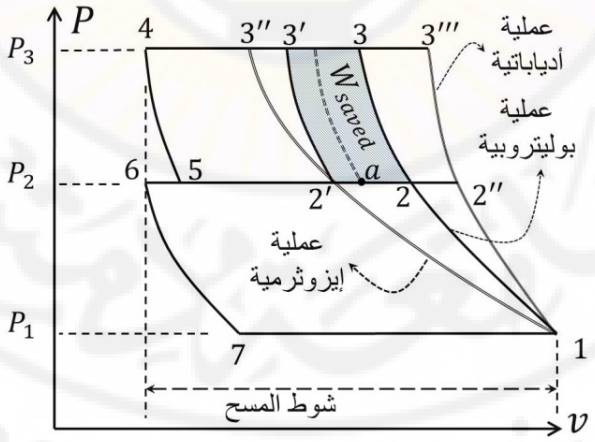
7.2 الضواغط الترددية المتعددة المراحل *Multistage Compression*.

إن الهدف الرئيسي من استخدام الضواغط الترددية المتعددة المراحل هو رفع ضغط التفريغ والتخلص من تناقص المردود الحجمي. يبين الشكل (15–2) إرتفاع ضغط التفريغ من $(P_2 \rightarrow P_3)$ عند الإنتقال من الضاغط $(1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1)$ إلى الضاغط $(1 \rightarrow 2' \rightarrow 3' \rightarrow 4' \rightarrow 1)$ وتناقص المردود الحجمي نتيجة إنخفض حجم الإمتصاص من $(4 \rightarrow 1)$ إلى $(4' - 1)$.



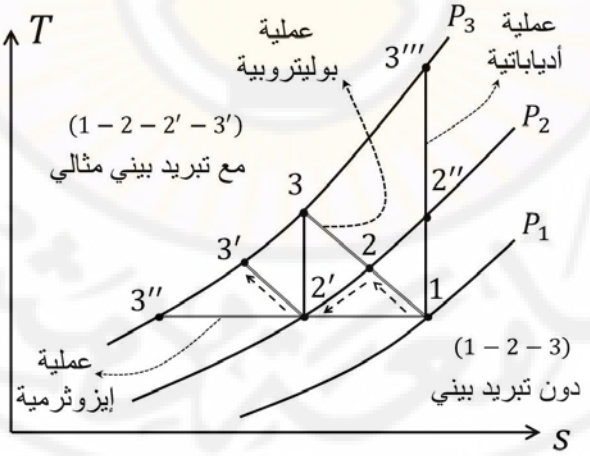
الشكل (15–2) زيادة ضغط التفريغ من الحالة (2) إلى $(2')$.

يبين الشكل (16–2) ضاغطاً ترددياً بمرحلتين فقط مع تبريد بيني مثالي *Ideal Intercooling*. المرحلة الأولى في الضاغط الترددي تسمى بمرحلة الضغط المنخفض*Low Pressure Stage (LP)* وتسمى المرحلة الثانية بمرحلة الضغط العالي *High Pressure Stage (HP)*.



الشكل (16–2) التبريد البيني في ضاغط ترددي بمرحلتين فقط على مخطط $(P-v)$

تمثل المرحلة الأولى في الشكل (2-16) ذات الضغط المنخفض (LP) على مخطط ($P-v$) بالدورة ($1-7-6-2-1$) حيث أن حجم الخلوص لهذا الضاغط يمثل بالخط الأفقي ($7-6$) وتمثل المرحلة الثانية ذات الضغط العالي (HP) على مخطط ($P-v$) بالدورة ($2-5-4-3-2$) حيث أن حجم الخلوص لهذا الضاغط يمثل بالخط الأفقي ($5-6$) ومن دون تبريد بيني بين الضواغط. يسبب التبريد البيني المثالي بين المرحلتين انخفاض درجة حرارة الهواء الخارج في المرحلة الأولى من النقطة (2) إلى النقطة ($2'$) ذات الضغط الثابت (P_2) والتي تقع على خط عملية الانضغاط الإيزوثرمي ($3''-2'-1$). عندما يعود الهواء المضغوط الخارج من المرحلة الأولى ويدخل إلى المرحلة الثانية فإنه ينضغط عبر العملية البوليتروبية ($3'-2'$) ويخرج عند النقطة ($3'$) بدلاً من خروجه من دون تبريد بيني مثالي عند النقطة (3) أي أن عملية التبريد البيني المثالي قد أدت إلى تخفيض في العمل المستهلك بمقدار المساحة المهشرة المبينة في ($2-3-3'-2'-2$). إذا كان التبريد البيني غير مثالي أي تمت عملية تبريد الهواء إلى نقطة **أعلى** من ($2'$) كما في النقطة (a) فإن المساحة السابقة تنخفض.



الشكل (2-17) التبريد البيني في ضاغط ترددي بمرحلتين فقط على مخطط ($T-s$)

يبين الشكل (17–2) التبريد البيني المثالي على مخطط $(T-s)$. عملية الانضغاط المثالي من دون تبريد بيني مثالي وبمرحلة واحدة هي $(3-2-1)$ أما عملية الانضغاط المثالي بمرحلتين مع تبريد بيني مثالي هي $(3'-2'-2-1)$. الفرضيات المستخدمة في إيجاد الشكل الرياضي للعمل هي

- ✓ لا يوجد انخفاض في الضغط في عملية التفريغ والامتصاص.
- ✓ الضغوط تبقى ثابتة في كل المراحل.
- ✓ التبريد البيني هو تبريد مثالي أي يبرد الهواء الخارج من الضاغط في أي مرحلة إلى درجة حرارة المحيط (العملية الإيزوثرمية).
- ✓ الكتلة ثابتة ومتساوية في كل مرحلة.
- ✓ الهواء غاز مثالي.

يعطى العمل في المرحلة الأولى ذات الضغط المنخفض بالعلاقة

$$W_{LP} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (kJ)$$

يعطى العمل في المرحلة الثانية ذات الضغط المرتفع حيث $(P_2 = P_{2'})$ بالعلاقة

$$W_{HP} = \frac{n}{n-1} * P_2 V_{2'} \left(\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (kJ)$$

من أجل **تبريد بيني مثالي** بين المرحلتين ولأن النقاط تقع على العملية الإيزوثرمية واحدة كما في الشكل (17–2) فيكون

$$P_1 V_1 = P_2 V_{2'} = P_3 V_{3''}$$

بالتعويض في علاقة عمل المرحلة الثانية للضاغط

$$W_{HP} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

العمل الكلي للضاغط يساوي مجموع الأعمال للمرحلة الأولى والثانية

$$W_c = W_{LP} + W_{HP}$$

$$W_c = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) + \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

بالعمل على ترتيب الحدود نجد أن العمل الكلي يساوي

$$W_c = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right) \qquad (20\text{-}2)$$

من أجل إيجاد قيمة الضغط الأوسط (P_2) والمناسب للحصول على أقل عمل ممكن في ضاغط ترددي بمرحلتين، نأخذ مشتق العمل الكلي في المعادلة $(20-2)$ بالنسبة إلى الضغط(P_2) ونساويه بالصفر فنجد الحل التالي

$$P_2 = \sqrt{P_1 * P_3} \qquad (21\text{-}2)$$

تبين المعادلة $(21-2)$ أن الضغط المتوسط بين المرحلتين الأولى والثانية في الضاغط الترددي والذي يحقق العمل الأصغري للضاغط يساوي جذر جداء ضغط الامتصاص (P_1) وضغط التفريغ (P_3). يمكن كتابة العلاقة السابقة بالشكل

$$P_2^2 = P_1 * P_3$$

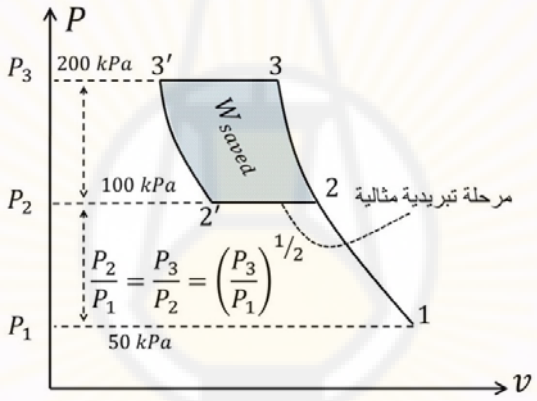
أو

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} = const \qquad (22\text{-}2)$$

تقول المعادلة (2–22) إنه يمكننا أن نحصل على العمل الأصغري في ضاغط ترددي بمرحلتين عندما تكون نسب الضغوط متساوية بين مراحل الضاغط كما هو واضح في الشكل (2–18). بتعويض الضغط (P_2) بحسب المعادلة (2–21) في المعادلة (2–22) نجد نسبة الضغط في المرحلة الأولى تساوي جذر نسبة الضغط الكلي للضاغط الترددي.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_3}{P_1}\right)^{1/2} \qquad (23\text{-}2)$$

وبالتالي يمكن أن نحصل على العمل الأصغري مع الأخذ بعين الاعتبار أن الضغط المتوسط يحقق المعادلة (2–23) يعطى بالشكل



الشكل (2–18) العمل الأصغري لضاغط بمرحلتين.

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(2\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 2\right)$$

$$W_{c,min} = 2 * \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 * \left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right)$$

بإستخدام العلاقة (2–23) في العلاقة السابقة نجد أن العمل الكلي يساوي

$$W_{c,min} = 2 * \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 * \left(\left(\frac{\boldsymbol{P_3}}{\boldsymbol{P_1}} \right)^{\frac{n-1}{2*n}} - 1 \right)$$

بمقارنة عمل ضاغط بمرحلتين مع ضاغط بمرحلة واحد نجد أن **نسبة الضغط العامة** *General Pressure Ratio* تتجول إلى الشكل التالي

$$\left(\frac{\boldsymbol{P_{i+1}}}{\boldsymbol{P_1}} \right)^{\boldsymbol{1/i}} \qquad (24\text{-}2)$$

لضاغط متعدد المراحل (i) وضغط تفريغ (P_{i+1}) وضغط إمتصاص (P_1). نجد أيضاً من العلاقة (24−2) أن نسب الضغوط المثلى تكون كما يلي

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_4}{P_3} = \cdots = \frac{P_{i+1}}{P_i} = const = \left(\frac{P_{i+1}}{P_1} \right)^{1/i}$$

تؤدي هذه العلاقة إلى تساوي الضغوط في كل مرحلة من مراحل الضاغط المتعدد المراحل أي

$$W_c = W_1 = W_2 = \cdots = W_i$$

$$W_{c,min} = \sum_{1}^{i} W_i$$

وإذا كانت عمليات الانضغاط بوليتروبية بين مراحل الضاغط الترددي فإن

$$\left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \frac{T_{i+1}}{T_i}$$

فتصبح نسبة الضغوط المثلى هي

$$\left(\frac{P_{i+1}}{P_1} \right)^{\frac{1}{i}} = \left(\frac{T_{i+1}}{T_1} \right)^{\frac{n}{i*(n-1)}} \qquad (25\text{-}2)$$

في التبريد البيني المثالي وعلى خط عملية الانضغاط الإيزوثرمية تكون

$$P_1V_1 = P_2V_{2'} = P_3V_{3'} = \cdots = P_{(i)}V_{(i)'}$$

فيكون العمل الأصغري الذي يمكن صرفه على الضاغط الترددي المتعدد المراحل بالشكل

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1} * P_1V_1\left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \cdots \ldots . + \left(\frac{P_{i+1}}{P_i}\right)^{\frac{n-1}{n}} - i\right)$$

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1} * P_1V_1\left(i * \left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{i*n}} - i\right)$$

وبالتالي

$$W_{c,min} = i * \frac{n}{n-1} * P_1V_1\left(\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{i*n}} - 1\right) \quad (kJ) \qquad (26\text{-}2)$$

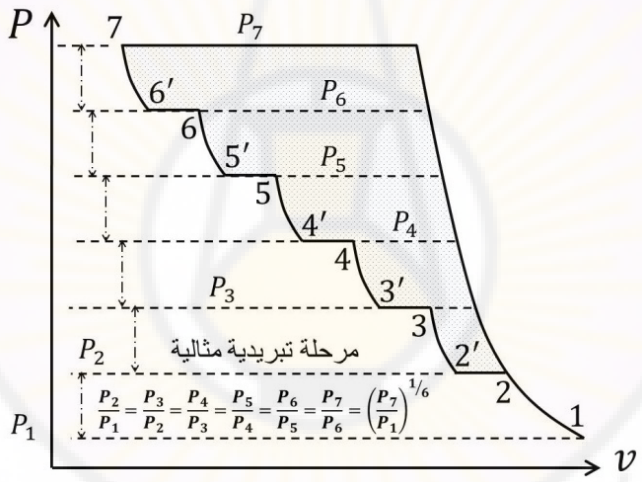
لأي مرحلة من مراحل الضاغط بالنسبة إلى نسبة الضغط العامة يعطى العمل الأصغري بالعلاقة

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1} * P_1V_1\left(\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{i*n}} - 1\right) \quad (kJ) \qquad (a\text{-}27\text{-}2)$$

أو للمرحلة نفسها بالشكل

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1} * P_i V_i \left(\left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (kJ) \qquad \text{(b-27-2)}$$

نلاحظ أن الأعمال متساوية بين مراحل الضاغط عندما يكون التبريد البيني مثالي فمثلاً إذا كان لدينا ضاغط ترددي بست مراحل $(i = 6)$ كما هو في الشكل (19−2) حيث تدل المنطقة المهشرة إلى العمل المسترجع.



الشكل (19−2) العمل الأصغري لضاغط بعدة مراحل.

تكون نسبة الضغط المثلى

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_4}{P_3} = \frac{P_5}{P_4} = \frac{P_6}{P_5} = \frac{P_7}{P_6} = \frac{P_{i+1}}{P_i} = \left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{1/i} = \left(\frac{P_7}{P_1}\right)^{1/6}$$

والعمل الأصغري للضاغط

$$W_{c,min} = 6 * \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_7}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{6*n}} - 1 \right)$$

والعمل الأصغري **في المرحلة الثالثة فقط** يحسب من لمعادلة (27−2) كما يلي

$$W_{c,3,min} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_7}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{6*n}} - 1 \right)$$

أو

$$W_{c,3,min} = \frac{n}{n-1} * P_3 V_{3'} \left(\left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

والعمل الأعظمي **في المرحلة الخامسة فقط** يحسب من العلاقة (27−2) كما يلي

$$W_{c,5,min} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_7}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{6*n}} - 1 \right)$$

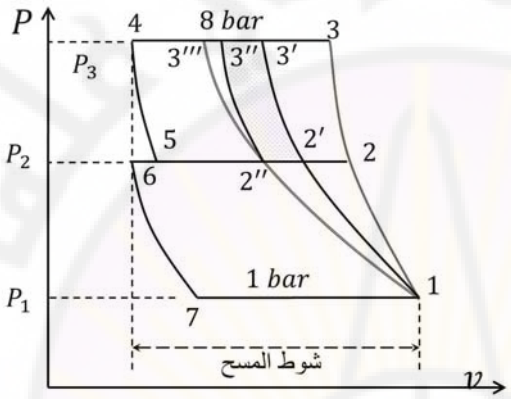
أو

$$W_{c,5,min} = \frac{n}{n-1} * P_5 V_{5'} \left(\left(\frac{P_6}{P_5} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_6}{P_5} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

المثال التطبيقي 2−6 – ضاغط ترددي بمرحلتين.

ضاغط ترددي هوائي بمرحلتين وتبريد بيني مثالي بين المراحل. يضغط الهواء ذات الشروط $[P_1 = 1\ bar, T_1 = 27℃]$ وبتدفق $(4\ m^3/min)$ إلى ضغط $[P_3 = 8\ bar]$ بعملية انضغاط بوليتروبي ذات عامل بوليتروبي وقدره $[n = 1.2]$ قارن 1) عمل

الضاغط هذا بضاغط ذي مرحلة واحدة و2) العمل المثالي مع العمل غير المثالي (تبريد بيني غير مثالي) عند درجة حرارة ($T = 30℃$).



الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء والذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: يبين الشكل المرافق العمليات على الضاغط كما يلي:

العملية $(1-2-3)$عملية بوليتروبية دون تبريد مثالي.

العملية $(1-2-2'-3')$ هي عملية انضغاط بمرحلتين وتبريد بيني غير مثالي.

العملية $(1-2-2''-3'')$ هي عملية انضغاط بمرحلتين وتبريد بيني مثالي.

العملية $(1-2''-3''')$ هي عملية انضغاط إيزوثرمي.

يحسب العمل في العملية البوليتروبية $(1-2-3)$ ومن دون تبريد مثالي كما يلي

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * P_1\dot{V}_1\left(\left(\frac{P_3}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right)$$

$$W_{c,poly} = \frac{1.2}{0.2} * 100kPa * 4\frac{m^3}{min}\left(\left(\frac{8}{1}\right)^{\frac{0.2}{1.2}} - 1\right)$$

$$W_{c,poly} = 994.113\frac{kJ}{min} = \mathbf{22.22\ hp}$$

نسبة الضغط الأمثل لضاغط بمرحلتين يعطى بالعلاقة

$$\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{1}{i}}$$

حيث $(i = 2)$ وبالتالي

$$P_2 = \left(\frac{P_3}{P_1}\right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{8} = 2.83\ bar$$

أي أن الضغط الأول وهو ضغط الامتصاص (سحب) هو $(1\ bar)$ والضغط الثاني وهو التفريغ للمرحلة الأول والامتصاص للمرحلة الثانية $(2.83\ bar)$ والضغط الثالث وهو التفريغ للمرحلة الثانية $(8\ bar)$ يحسب العمل في ضاغط بمرحلتين وتبريد بيني مثالي من العلاقة

$$W_{c\,(1-2-2''-3'')} = i * \frac{n}{n-1} * P_1\dot{V}_1\left(\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n*i}} - 1\right)$$

$$W_{c\,(1-2-2''-3'')} = 2 * \frac{1.2}{0.2} * 100kPa * 4\frac{m^3}{min} * \left(\left(\frac{8}{1}\right)^{\frac{0.2}{2*1.2}} - 1\right)$$

$$W_{c\,(1-2-2''-3'')} = 908.19\frac{kJ}{min}$$

$$W_{c\,(1-2-2''-3'')} = \mathbf{20.29}\ hp$$

يحسب العمل في ضاغط بمرحلتين وتبريد بيني غير مثالي من العلاقة

$$W_{c\,(1-2-2'-3')} = W_{LP(1-2)} + W_{HP(2'-3')}$$

$$W_{c\,(1-2-2'-3')} = \left(\frac{n}{n-1} * P_1V_1\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]\right) + \left(\frac{n}{n-1} * P_2V_{2'}\left[\left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]\right)$$

يحسب الحجم في المرحلة الثانية بعلاقة الغاز المثالي بالشكل

$$\frac{P_1\dot{V}_1}{T_1} = \frac{P_{2'}\dot{V}_{2'}}{T_{2'}}$$

$$\dot{V}_{2'} = \frac{P_1\dot{V}_1}{T_1} * \frac{T_{2'}}{P_2}$$

$$\dot{V}_{2'} = \frac{100kPa * 4m^3/min}{300K} * \frac{(273+30)K}{283kPa}$$

$$\dot{V}_{2'} = 1.43\ m^3/min$$

بالتعويض نجد أن

$$W_{c\,(1-2-2'-3')} = \left(\frac{1.2}{0.2} * 100 * 4\frac{m^3}{min}\left(\left(\frac{283}{100}\right)^{\frac{0.2}{1.2}} - 1\right)\right) + \left(\frac{1.2}{0.2} * 283 * 1.43\frac{m^3}{min}\left(\left(\frac{800}{283}\right)^{\frac{0.2}{1.2}} - 1\right)\right)$$

$$W_{c\,(1-2-2'-3')} = 454.3 + 459.2 = 913.5\frac{kJ}{min} = \mathbf{20.42}\ hp$$

الادخار في الطاقة باستخدام مرحلتين بتبريد بيني مثالي بدلاً من مرحلة واحدة هو

$$\frac{22.22\ hp - 20.29\ \ hp}{22.22\ hp} = 8.686\ \%$$

الفرق بين الانضغاط بمرحلتين بتبريد بيني مثالي وغير مثالي

$$\frac{20.42\ hp - 20.29\ hp}{20.42\ hp} = 0.636\ \%$$

المثال التطبيقي 2−7 – ضاغط ترددي بأربع مراحل.

ضاغط ترددي هوائي بأربع مراحل وتبريد بيني مثالي. الشروط ابتدائية للهواء قبل عملية الانضغاط هي $[P_1 = 1bar, T_1 = 27℃]$. تدفق الضاغط $(2\ m^3/min)$ ضغط تفريغ الهواء هو $[P_5 = 150\ bar]$ عملية انضغاط هي عملية بوليتروبي ذات عامل بوليتروبي $[n = 1.25]$ حدد الضغوط المثلى بين المراحل والعمل اللازم للضاغط.

الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء والذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: نسبة الضغط الأمثل هي

$$\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{1}{i}} = \left(\frac{P_5}{P_1}\right)^{\frac{1}{4}} = 3.5$$

أي أن نسب الضغوط

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_4}{P_3} = \frac{P_5}{P_4} = 3.5$$

ضغط الامتصاص (سحب) $[P_1 = 1\ bar]$، الضغط بين المرحلة الأولى والمرحلة الثانية هو

$$\frac{P_2}{P_1} = 3.5$$

$$P_2 = P_{2'} = 3.5 = bar$$

الضغط بين المرحلة الثانية والمرحلة الثالثة هو

$$\frac{P_3}{P_2} = 3.5$$

$$P_3 = 3.5 * 3.5$$

$$P_3 = P_{3'} = 12.25\ bar$$

الضغط بين المرحلة الثالثة والرابعة هو

$$\frac{P_3}{P_2} = 3.5$$

$$P_3 = 12.25 * 3.5$$

$$P_3 = P_{3'} = 42.875\ bar$$

ضغط التفريغ $[P_5 = 150\ bar]$ وبالتالي فإن قيم الضغوط تكون بالشكل

$$P_1 = 1\ bar$$

$$P_2 = P_{2'} = 3.5\ bar$$

$$P_3 = P_{3'} = 12.25\ bar$$

$$P_4 = P_{4'} = 42.87\ bar$$

$$P_5 = 150\ bar$$

يحسب العمل الأصغري بالعلاقة

$$W_{c,min} = W_I + W_{II} + W_{III} + W_{IV}$$

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1}\left(P_1V_1\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right] + P_2V_{2'}\left[\left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right] + P_3V_{3'}\left[\left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right] + P_4V_{4'}\left[\left(\frac{P_5}{P_4}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]\right)$$

ولكن

$$P_1V_1 = P_2V_{2'} = P_3V_{3'} = P_4V_{4'}$$

لأن عملية التبريد البيني مثالية وكافة النقاط تقع على خط العملية الإيزوثرمية أي

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1}P_1V_1\left(\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{P_5}{P_4}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 4\right]\right)$$

وبما أن الضغوط متساوية

$$W_{c,min} = 4 * \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left(\left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \right)$$

يمكن أن نبدل

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_5}{P_1} \right)^{\frac{1}{4}}$$

نجد علاقة العملية الأصغري بالشكل

$$W_{c,min} = 4 * \frac{n}{n-1} \left(P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_5}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{4*n}} - 1 \right] \right)$$

$$W_{c,min} = 4 * \frac{1.25}{0.25} * 100kPa * 2\frac{m^3}{min} * \left[(3.5)^{\frac{0.25}{1.25*4}} - 1 \right]$$

$$W_{c,min} = 258.566\ kJ/min$$

مناقشة: العمل في المرحلة الثالثة هو

$$W_{c,3,min} = \frac{n}{n-1} P_3 V_{3'} \left(\left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

وبتبديل

$$\frac{P_4}{P_3} = \left(\frac{P_5}{P_1} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$P_1 V_1 = P_3 V_{3'}$$

نجد أن

$$W_{c,3,min} = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_5}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{4*n}} - 1 \right)$$

بالتعويض نجد العمل الأصغري للمرحلة الثالثة هي

$$W_{c,3,min} = \frac{1.25}{0.25} * 100kPa * 2\frac{m^3}{min} * \left[(3.5)^{\frac{0.25}{1.25*4}} - 1\right]$$

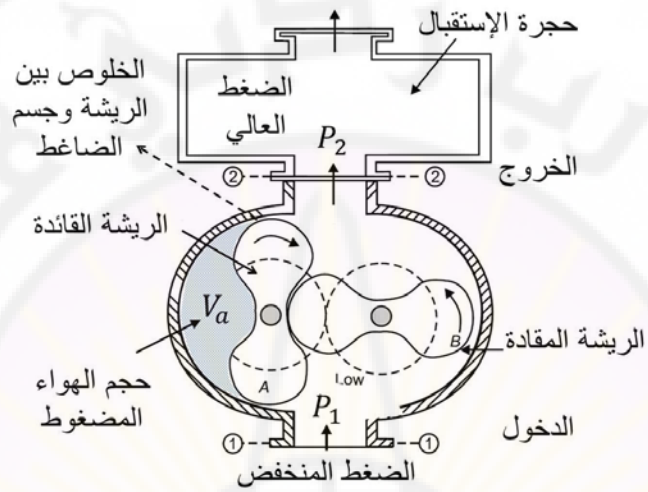
$$W_{c,3,min} = 64.6415\frac{kJ}{min} = \frac{W_{c,min}}{4}$$

نلاحظ أن العمل الأصغري لكل مرحلة من مراحل الضاغط له القيمة نفسها أي أن الأعمال متساوية لذلك يكفي أن نجد أي عمل أصغري لأية مرحلة فقط.

7.2 ترموديناميك الضواغط الدورانية *Rotary Compressors*.

الضواغط الدورانية هي الضواغط التي تقوم بفعل عملية الضغط بواسطة حركة دورانية وبسرعة عالية قد تصل إلى $(40{,}000\ RPM)$. تقوم الضواغط الدورانية بتسليم كمية كبيرة من الهواء قد تصل إلى $(FAD = 3000\ m^3/min)$ وبضغوط تفريغ قد تصل إلى $(10\ bar)$. نلاحظ أن الضواغط الدورانية تعطي تدفقات كبيرة ومستمرة وبضغوط صغيرة نسبياً بالمقارنة مع الضواغط الترددية. يمكن أن نصنف الضواغط الدورانية بحسب تدفق وسيط التشغيل فقد تكون ذات إزاحة إيجابية (تدفق غير مستمر) أو تكون ذات تدفق مستمر كما في الشكل (1−2) السابق. الضواغط الدورانية ذات الإزاحة الإيجابية (ذات تدفق غير مستمر) هي الضواغط ذات الريش المستقيمة *Roots Blower* أو تسمى أيضاً *Straight Lobe Compressors* والضواغط ذات الريش المنزلقة *Vane Type* والضواغط الحلزونية *Screw Type or Helical Type*. أما الضواغط الدورانية ذات التدفقات المستمرة فهي الضواغط النابذية *Centrifugal Type* والضواغط المحورية *Axial Type*.

1.7.2الضواغط ذات الريش المستقيمة.



الشكل (20−2) الشكل التفصيلي للضواغط ذات الريش المستقيمة والخلوص بين الريشة وجسم الضاغط.

يبين الشكل (20−2) الشكل التفصيلي للضواغط ذات الريشتين المستقيمتين. يتألف هذا الضاغط من ريشة قائدة (A) وريشة مقادة (B) يقسمان الضاغط إلى حجرتين ذات ضغط مرتفع ومنخفض. يدخل الهواء الحر ويحتجز بين الريشة (A) القائدة وجسم الضاغط بحجم قدره (V) كما هو واضح بالشكل ويرفع ضغطه من (P_1) نتيجة حركة الريشة (A) مع عقارب الساعة إلى الضغط (P_2). حجم الهواء المسلم في دورة واحدة هو أربع مرات الحجم (V) عندما يكون هناك ريشتان فقط أما إذا كان عدد الريش ثلاثة فحجم الهواء الحر المسلم يصبح 6 مرات. يعطى مردود الضاغط ذي الريش المستقيمة بالنسبة بين العمل الإيزونتروبي إلى العمل الحقيقي أي أن

$$\eta_{Roots} = \frac{W_{isen}}{W_a} \qquad (28\text{-}2)$$

يحسب العمل الحقيقي للضاغط ذي الريش المستقيمة ذات الحجم الثابت (V) من المعادلة

$$W = (P_2 - P_1) * V_a$$

العمل في دورة واحدة يكون

$$W_a = W_{revo} = (P_2 - P_1) * (4V_a)$$

باعتبار أن $(V_{roots} = 4V_a)$ يمكن كتابة العلاقة السابقة بالشكل

$$W_a = W_{revo} = (P_2 - P_1) * V_{roots}$$

أي أن

$$W_a = W_{revo} = P_1 \left(\frac{P_2}{P_1} - 1\right) V_{roots} \quad (kJ) \qquad (29\text{-}2)$$

العمل الإيزونتروبي (أدياباتي عكوس) للضاغط ذي الريش المستقيمة

$$W_{isen} = \frac{k}{k-1} P_1 * V_{roots} \left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad (kJ) \qquad (30\text{-}2)$$

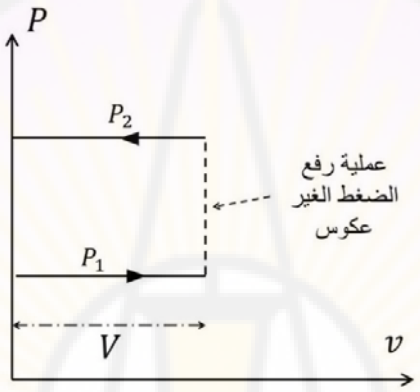
حيث أن (k) وهو العامل الأدياباتي، بالتعويض في علاقة مردود الضاغط نجد أن

$$\eta_{Roots} = \frac{\frac{k}{k-1} P_1 * V_{roots} \left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{P_1 \left(\frac{P_2}{P_1} - 1\right) V_{roots}}$$

بأخذ نسبة الضغط $(r_P = P_2/P_1)$ نجد أن المردود يتحول إلى

$$\eta_{Roots} = \frac{k}{k-1}\frac{\left((r_P)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)}{(r_P - 1)} \qquad (31\text{-}2)$$

نلاحظ أن المردود ينخفض مع زيادة نسبة الضغط ويرتفع عند انحفاظها والسبب في ذلك الخلوص الموجود بين الريشة وجسم الضاغط كما هو واضح في الشكل (21−2).



الشكل (21−2) العملية في الضاغط ذات الريش المستقيمة على مخطط $(P - v)$.

تتراوح تدفقات الضواغط ذات الريش المستقيمة بين $(0.15 - 1500\ m^3/min)$ حجم هواء حر وبنسب ضغوط تفريغ تتراوح بين $[1 - 3.5\ bar]$. أما مردود الضواغط ذات الريش المستقيمة فتتراوح بين 50% و60% ويمكن الوصول إلى 80% عند نسب ضغوط منخفضة.

<u>المثال التطبيقي 2−8 – ضاغط دوراني بريش مستقيمة.</u>

يقوم ضاغط دوراني هوائي بريش مستقيمة بتسليم $(0.5\ m^3/s)$ بشروط الهواء الحر التالية $[P_1 = 1bar, T_1 = 27°C]$ ويفرغ الهواء بضغط $[P_2 = 2\ bar]$. حدد الاستطاعة اللازمة له ومردود الضاغط.

الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء والذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: تعطى علاقة العمل بالشكل

$$W_{roots} = (P_2 - P_1) * \dot{V}_1$$

$$W_{roots} = (2-1) * 100\ kPa * 0.5\ m^3/s$$

$$W_{roots} = 50\ kW = 67.05\ hp$$

العمل الإيزونتروبي يعطى بالعلاقة

$$W_{isen} = \frac{k}{k-1} P_1 * V_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

$$W_{isen} = \frac{1.4}{1.4-1} * 100kPa * 0.5 \frac{m^3}{s} * \left(\left(\frac{2}{1} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right)$$

$$W_{isen} = 38.33\ kW = 51.4\ hp$$

المردود يحسب من العلاقة

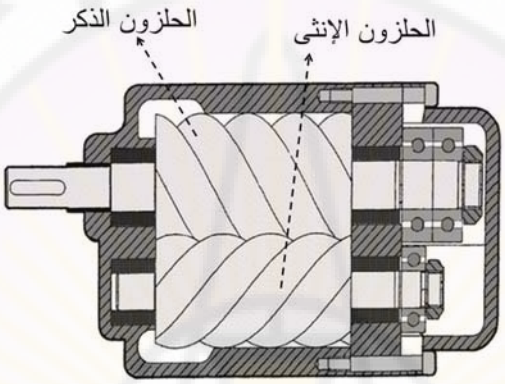
$$\eta_{Roots} = \frac{W_{isen}}{W_a}$$

$$\eta_{Roots} = \frac{38.33}{50} = 0.7666\ or\ 76.66\%$$

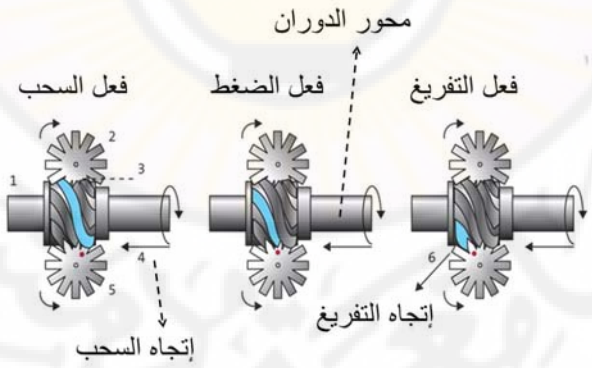
2.7.2الضواغط الحلزونية.

تشبه الضواغط الحلزونية في عملها الضواغط ذات الريش المستقيمة حيث تحتوي على ريش محلزنة كما في الشكل (2–5) السابق. يبين الشكل (2–22) الضواغط الحلزونية الثنائية المحاور *Twin Screw* حيث يحتوي الضاغط على حلزون ذكر قائد وحلزون أنثى مقاد حيث يكون محور الحلزون القائد مرتبطاً بمحور دوران المحرك الكهربائي. يبين الشكل (2–23) الضواغط الحلزونية الأحادية المحاور *Single Screw*.

كما يبين عملية السحب والضغط والتفريغ في هذه الأنواع من الضواغط. تستطيع هذه الضواغط إعطاء تدفقات حجمية تتراوح بين $(200 - 20{,}000\ m^3/h)$ وبضغط تفريغ يصل إلى $(3\ bar)$ للضواغط أحادية المحاور و $(13\ bar)$ للضواغط الثنائية المحاور.

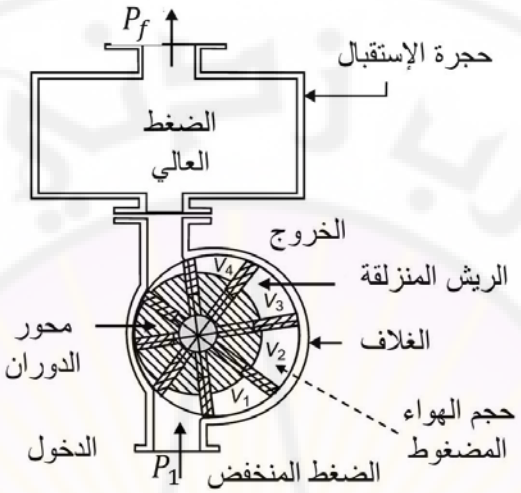


الشكل (22-2) تفصيل الضواغط الحلزونية الثنائية *Twin Screw*.



الشكل (23-2) تفصيل الضواغط الحلزونية الأحادية *Single Screw*.

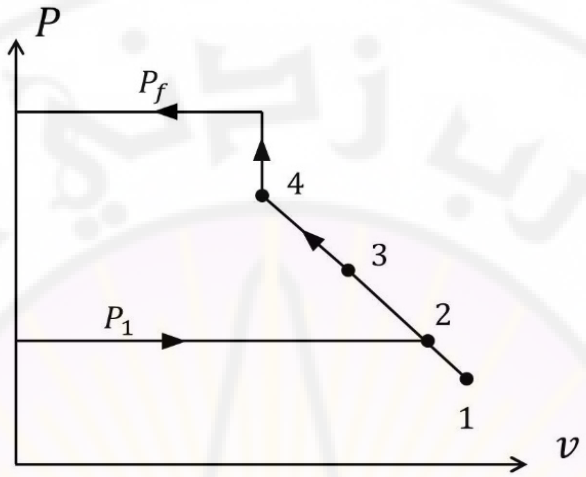
3.7.2 الضواغط ذات الريش المنزلقة.



الشكل (24−2) تفصيل الضواغط ذات الريش المنزلقة مع حجوم الهواء المضغوطة على محيط جسم الضاغط.

يبين الشكل (24−2) تفاصيل الضاغط ذي الريش المنزلقة. تتوضع الريش على محيط محور الدوران غير المركزي ضمن أقنية مستطيلة تحتوي في نهايتها على نوابض لتسهيل حركة الريشة على جدران جوف الضاغط. تتكون الريش من مواد غير معدنية وفي أغلب الأحيان تكون من مواد كربونية مركبة *Carbon Composites* أو من مواد مقاومة للاحتكاك وتبقى على اتصال تام مع جسم الضاغط للتقليل من التسرب بين حجيرات الضاغط المتشكلة. يبين الشكل (25−2) العملية الترموديناميكية للضاغط على مخطط $(P-v)$. يدخل الهواء الحر بضغط جوي نظامي من الحالة (1) ويزداد ضغطه تدريجياً مع حركة محور الدوران حتى يصل إلى الضغط المطلوب فيتم تفريغه عند الحالة (2). يعطى العمل في هذا الضاغط ولدورة واحدة في العلاقة

$$W_{vane} = n * (W_c + W_{final})$$



الشكل (25-2) العمليات للضواغط ذات الريش المنزلقة على مخطط $(P-v)$.

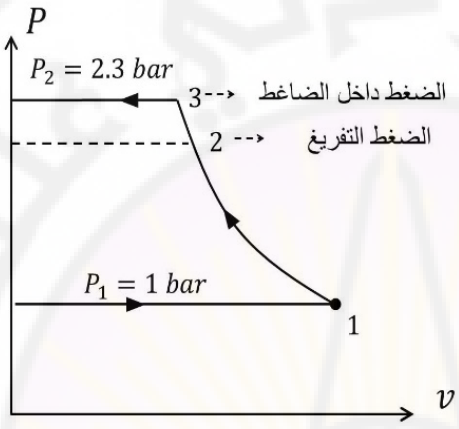
وبالتالي

$$W_{vane} = \left[n\left(\frac{k}{k-1}\right) P_1 * V_1 \left(\left(\frac{P_4}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] + \left[n(P_f - P_4) V_4 \right] \quad (kJ) \qquad (32\text{-}2)$$

حيث (n) عدد الريش الموجود على جسم محور الدوران. نلاحظ أن العمل يتألف من عملين الأول هو عمل الانضغاط ضمن حجيرات الضاغط والثاني هو في قسم حجرة الاستقبال حيث يزداد الضغط من (P_4) إلى (P_f). تستطيع الضواغط ذات الريش المنزلقة إعطاء تدفقات حجمية تصل إلى $(150\ m^3/min)$ وبنسب ضغط تفريغ تصل إلى $(8\ bar)$ وبمردود 75%.

المثال التطبيقي 2−9 – ضاغط دوراني بريش منزلقة.

يقوم ضاغط دوراني هوائي بريش منزلقة بتسليم $(0.6\ m^3/s)$ بشروط الهواء الحر التالية $[P_1 = 1bar, T_1 = 27°C]$ ويضغط الهواء إلى ضغط $[P_2 = 2.3\ bar]$. يلاحظ أن هناك انخفاضاً في الحجم بمقدار 30% عند البدء بعملية التفريغ. حدد الاستطاعة اللازمة له ومردود الضاغط.



الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء الذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: على مخطط $(P - v)$ نجد أن الضغط عند النقطة (3) هو الضغط داخل الضاغط والضغط عند النقطة (2) هو ضغط التفريغ أي أن

$$V_2 = 0.7V_1$$

والضغط يكون عند النقطة (2) يعطى بالعملية الأدياباتية التالية

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k$$

$$P_2 = 100\ kPa * \left(\frac{1}{0.7}\right)^{1.4}$$

$$P_2 = 165\ kPa$$

عمل الضاغط يعطى

$$W_{vane} = n\left(\frac{k}{k-1}\right)P_1 * V_1\left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) + n(P_3 - P_2)V_2$$

$$W_{vane} = 1\left(\frac{1.4}{1.4-1}\right)100kPa * 0.6\frac{m^3}{s}\left((165\ kPa)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1\right) + 1$$
$$* (230 - 165) * \left(0.7 * 0.6\frac{m^3}{s}\right)$$

$$W_{vane} = 59.6kW\ or\ 79.925\ hp$$

العمل الإيزونتروبي يعطى بالعلاقة

$$W_{isen} = \frac{k}{k-1}P_1 * V_1\left(\left(\frac{P_3}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)$$

$$W_{isen} = \frac{1.4}{1.4-1} * 100kPa * 0.6\frac{m^3}{s} * \left((230)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1\right)$$

$$W_{isen} = 56.42\ kW = 75.66\ hp$$

المردود يحسب من العلاقة

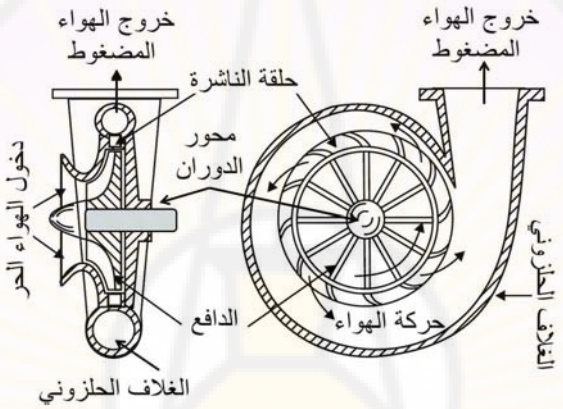
$$\eta_{Roots} = \frac{W_{isen}}{W_{vane}} = \frac{75.66}{79.925}$$

$$\eta_{Roots} = 0.9466\ or\ 94.66\%$$

8.2 ترموديناميك الضواغط النابذية *Centrifugal Compressors*.

يتألف الضاغط النابذي من غلاف حلزوني *Volute Casing* ودافع *Impeller* وحلقة ناشرة *Diffuser Ring* لتوجيه الهواء إلى الغلاف كما في الشكل (26–2). مقطع الغلاف الحلزوني يتزايد تدريجياً حتى مقطع خروج الهواء وتحيط به الحلقة الناشرة. الدافع هو عبارة عن سطح دائري يحتوي على شفرات قطرية *Radial Blades* لتوجيه الهواء إلى الحلقة الناشرة. يدخل الهواء الحر إلى عين الدافع محورياً ويتدفق قطرياً ضمن الشفرات إلى الخارج نتيجة دوران محور الدافع. يكتسب الهواء الحر نتيجة حركته ضمن قنوات الشفرات سرعات عالية جداً وبالتالي ضغوطاً ودرجات حرارة عالية أيضا نتيجة تبادل

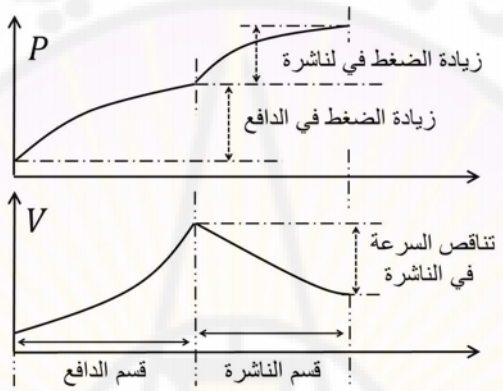
الطاقة الحركية بين المحور المدار والهواء. يدخل الهواء إلى الناشرة والتي تقوم على رفع ضغط الهواء أيضاً نتيجة تحويل جزء من الطاقة الحركية للهواء إلى طاقة ستاتيكية. يتحرك الهواء ضمن الغلاف الحلزوني إلى مخرج الضاغط. يمكن اعتبار ارتفاع ضغط الهواء عبر حركته ضمن الغلاف الحلزوني المتغيير المقطع مهملاً بالمقارنة مع ارتفاعه ضمن الدافع والناشرة كما هو واضح في الشكل (27−2).



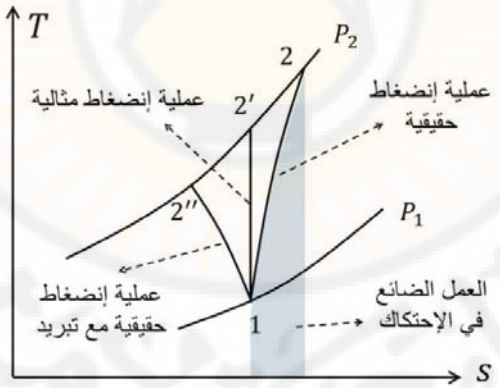
الشكل (26−2) الشكل التفصيلي لضاغط نابذي بدافع واحد.

تستعمل الضواغط النابذية في محركات الطائرات وغيرها من الأجهزة التي تحتاج إلى تدفقات كبيرة وبنسب ضغوط صغيرة. نسب الضغط المحققة في الضواغط النابذية تصل إلى (4) في ضاغط بدافع واحد و(12) في ضاغط بمجموعة دوافع. تدور هذه الضواغط بسرعة بين $[20{,}000 - 30{,}000\ RPM]$. يبين الشكل (28−2) عملية الانضغاط على مخطط $(T - s)$ حيث تمثل العملية $(1 - 2')$ عملية انضغاط حقيقي في الضاغط والعملية $(1 - 2)$ عملية انضغاط مثالية والعملية $(1 - 2'')$ عملية إتضغاط حقيقي مع تبريد للضاغط. عملية الانضغاط الحقيقية هي عملية بوليتروبية بعامل بوليتروبي بين $[n = 1.5 - 1.7]$ أكبر من عملية الانضغاط الأدياباتي للهواء ذات العامل الأدياباتي $[k = 1.4]$ ولكن عند تبريد الضاغط نجد أن العامل البوليتروبي ينخفض إلى قيمة أقل

من 1.4. لا يمكن إهمال الطاقة الحركية لوسيط التشغيل في الضواغط النابذية لأنه يتحرك بسرعات عالية جداً وذلك تبعاً لسرعة الدافع في الضاغط. لمعرفة السرعة المطلقة لدخول وخروج وسيط التشغيل يجب استخدام مثلثات السرع.



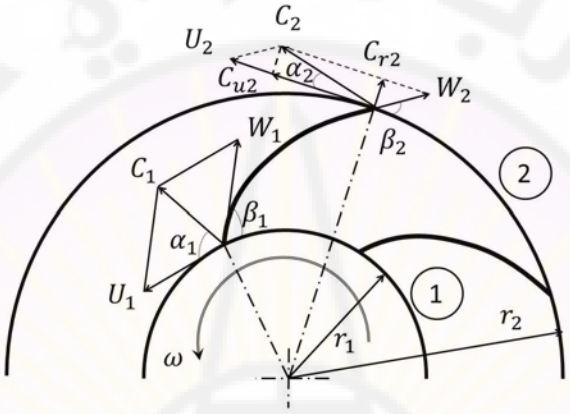
الشكل (27–2) تغييرات الضغط والسرعة في الضاغط النابذي.



الشكل (28–2) عملية الانضغاط في الضاغط النابذي على مخطط $(T - s)$.

يبين الشكل (29–2) مخطط مثلثات السرع على نقاط الدخول والخروج للدافع. نلاحظ من الشكل أن السرعة المطلقة *Absolute Velocity* والتي تعطى الرمز (C) تتألف من

سرعة مماسية (C_u) للدافع وسرعة قطرية (C_r) على امتداد قطر الدافع. السرع (W) هي السرعة الحلزونية *Whirl Velocity* والمماسة لشفرة الدافع والسرعة (U) هي السرعة المماسية للدافع أو تسمى السرعة الوسيطية للدافع.



الشكل (29−2) مثلثات السرع على قسم الدافع في الضاغط النابذي.

نحصل على العمل المقدم إلى الدافع بجداء القوة المماسية وبمسافة الانتقال في اتجاه القوة أي

$$W_{cen} = (m[W_2 - W_1]) * U_2$$

بإهمال السرعة (W_1) لأن الدخول محوري، تتحول المعادلة السابقة إلى معادلة عمل أويلر *Euler's Work* في الضواغط النابذية

$$W_{cen} = m * W_2 * U_2 \quad (kJ) \qquad (33\text{-}2)$$

إذا كانت الخروج قطرياً أيضاً يكون $(W_2 = U_2)$ وتتحول معادلة عمل أويلر إلى

$$W_{cen} = m * U_2^2 \quad (kJ) \qquad (34\text{-}2)$$

يمكن أيضاً حساب العمل المقدم إلى الدافع من القانون الأول في الترموديناميك. باعتبار أن الجريان مستقر بين الدخول والخروج ولايوجد تبادل حراري بين الدافع ووسيط التشغيل

أي أن عملية الانضغاط هي عملية أدياباتية والطاقة الكامنة مهملة في الدافع فإن تطبيق القانون الأول في الترموديناميك على الدافع يعطي العلاقة التالية

$$m\left(h_1+\frac{C_1^2}{2}\right)+W_{cen}=m\left(h_2+\frac{C_2^2}{2}\right) \qquad (35\text{-}2)$$

وبالتالي

$$W_{cen}=m\left(h_2+\frac{C_2^2}{2}\right)-m\left(h_1+\frac{C_1^2}{2}\right)$$

باعتبار أن وسيط التشغيل هو غاز مثالي أي

$$W_{cen}=m*c_p\left(T_2+\frac{C_2^2}{2c_p}\right)-mc_p\left(T_1+\frac{C_1^2}{2c_p}\right)$$

بأخذ خاصية درجة حرارة الركود *Stagnation Temperature* والتي يعبر عنها بأنها بارامتر تورموديناميكي يعبر عن درجة الحرارة الناتجة عن تخفيض سرعة الوسيط من سرعة ما إلى الصفر وبشكل إيزونتروبي

$$T_o=\left(T+\frac{C^2}{2c_p}\right)\quad (K) \qquad (36\text{-}2)$$

وبالتعويض في علاقة العمل المقدم إلى الدافع نجد أن

$$W_{cen}=m*c_p*(T_{o2}-T_{o1})\quad (kJ) \qquad (37\text{-}2)$$

وبالتالي

$$W_{cen}=mc_pT_{o1}\left(\frac{T_{o2}}{T_{o1}}-1\right)$$

بما أن العملية هي انضغاط أدياباتي نجد أن

$$T_{o2}=T_2\left(\frac{P_{o2}}{P_2}\right)^{k/k-1}$$

$$T_{o1} = T_1 \left(\frac{P_{o1}}{P_1}\right)^{k/k-1}$$

بالتعويض نجد أن

$$W_{cen} = mc_p T_{o1} \left(\frac{T_2 \left(\frac{P_{o2}}{P_2}\right)^{k/k-1}}{T_1 \left(\frac{P_{o1}}{P_1}\right)^{k/k-1}} - 1 \right)$$

أي أن

$$W_{cen} = m * c_p * T_{o1} * \left(\left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}}\right)^{k/k-1} - 1 \right) \quad (kJ) \qquad (38\text{-}2)$$

حيث(P_{o2}/P_{o1}) نسبة ضغط الركود في الدافع. بمساواة علاقة أويلر والعلاقة (38−2) نجد أن

$$m * U_2^2 = m * c_p * T_{o1} \left(\left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}}\right)^{k/k-1} - 1 \right)$$

أي أن نسبة ضغط الركود تتحول إلى

$$\frac{P_{o2}}{P_{o1}} = \left[\frac{U_2^2}{c_p * T_{o1}} + 1 \right]^{k-1/k} \qquad (39\text{-}2)$$

نجد من العلاقة (2−39) إلى أن نسب الضغوط تتعلق بسرعة الدافع المماسية.

<u>المثال التطبيقي 2−10 – ضاغط نابذي.</u>

يقوم ضاغط نابذي بامتصاص هواء بشروط $[P_1 = 1bar, T_1 = 27℃]$ وبسرعة دخول $(50\ m/s)$ تسليمه بتدفق $(18\ kg/s)$ وبنسبة ضغط $(4\ bar)$ ومردود إيزونتروبي (0.75). حدد درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط واستطاعة الضاغط.

الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء والذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: درجة الحرارة الساكنة عند الدخول هي

$$T_{o1} = \left(T_1 + \frac{C_1^2}{2c_p}\right)$$

$$T_{o1} = \left(300K + \frac{(50\ m/s)^2}{2 * 1003.2\ J/kgK}\right)$$

$$T_{o1} = 301.25\ K$$

من المردود الإيزونتروبي نجد أن

$$\eta_{isen} = \frac{W_{isen}}{W_a}$$

$$\eta_{isen} = \frac{mc_p(T_{o2'} - T_{o1})}{mc_p(T_{o2} - T_{o1})}$$

$$\eta_{isen} = \frac{(T_{o2'} - T_{o1})}{(T_{o2} - T_{o1})}$$

في العملية الإيزونتربية نجد أن

$$\frac{T_{o2'}}{T_{o1}} = \left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}}\right)^{k-1/k}$$

$$T_{o2'} = T_{o1} * \left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}}\right)^{k-1/k}$$

$$T_{o2'} = 300K * (4)^{1.4-1/1.4} = 447.66\ K$$

بالتعويض في علاقة المردود نجد أن

$$T_{o2} = \frac{(T_{o2'} - T_{o1})}{\eta_{isen}} + T_{o1}$$

$$T_{o2} = \frac{(447.66 - 301.25\ K)}{0.75} + 301.25\ K$$

$$T_{o2} = 496.46\ K$$

استطاعة الضاغط تحسب من العلاقة

$$W_{cen} = mc_p(T_{o2} - T_{o1})$$

$$W_{cen} = 18\frac{kg}{s} * 1.0032\frac{kJ}{kgK} * (496.46\ K - 301.25\ K)$$

$$W_{cen} = 65.28\ kW = 87.54\ hp$$

ملخص فصل ترموديناميك الضواغط.

- النسبة بين حجم المسح وحجم الخلوص هي نسبة الانضغاط *Compression Ratio* في الضواغط الترددية

$$r_v = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_s}{V_C} = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}}$$

- النسبة بين ضغط التفريغ إلى ضغط الامتصاص هي نسبة الضغط *Pressure Ratio* في الضواغط الترددية

$$r_P = \frac{P_2}{P_1}$$

- نستخدم المردود الإيزوثرمي للمقارنة بين الدورات الحقيقية والدورات المثالية في الضواغط الترددية. عرف المردود الإيزوثرمي إلى أنه النسبة بين العمل الإيزوثرمي (العمل الأصغري) إلى العمل الحقيقي (العمل البوليتروبي) في الضواغط الترددية

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,actual}}$$

العمل الحقيقي في العملية الأدياباتية هو

$$W_{c,adia} = \frac{k}{k-1} * mRT_1 \left[(r_P)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

العمل الحقيقي في العملية البوليتروبية هو

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * P_1V_1 \left[(r_P)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * mRT_1 \left[(r_P)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * mR[T_2 - T_1]$$

العمل المثالي الإيزوثرمي هو

$$W_{c,isoth} = P_1V_1 ln(r_P)$$

وبالتالي المردود الإيزوثرمي هو

$$\eta_{c,isoth} = \frac{n-1}{n} * \frac{ln(r_P)}{(r_P)^{\frac{n-1}{n}} - 1}$$

- نسبة الضغط الوسطي الفعال *Mean Effective Pressure (MEP)*

$$MEP = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{w_{net}}{v_{max} - v_{min}} \quad (kPa)$$

وتعطى استطاعة الضاغط بالعلاقة

$$HP = MEP * \dot{V} \quad (kW)$$

- حجم الهواء الحر الممتص *Free Air Delivery (FAD)* والذي يعرف إلى أنه حجم الهواء الممتص تحت شروط الهواء الحر. شروط الهواء الحر هي $[1\ atm, 15℃]$.
- يعرف المردود الحجمي إلى أنه النسبة بين حجم الهواء الحقيقي الحر الممتص في الضاغط وحجم المسح *Swept Volume* المردود الحجمي

$$\eta_{vol} = \frac{V_{FAD}}{V_s} = \frac{V_a}{V_s}$$

$$\eta_{vol} = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1} * \left\{ 1 + \frac{1}{r_v} - \frac{1}{r_v}\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{n}} \right\}$$

- نسب الضغط المثلى لضاغط ترددي متعدد المراحل هي

$$\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{1/i}$$

- عمل الضاغط الأصغري لضواغط ترددية متعددة المراحل

$$W_{c,min} = i * \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{i*n}} - 1 \right)$$

- العمل الحقيقي لضاغط ذي ريش مستقيمة

$$W_a = W_{revo} = (P_2 - P_1) * V_{roots} = P_1 \left(\frac{P_2}{P_1} - 1\right) V_{roots}$$

والإيزونتروبي هو

$$W_{isen} = \frac{k}{k-1} P_1 * V_{roots} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

والمردود

$$\eta_{Roots} = \frac{W_{isen}}{W_a}$$

- العمل الحقيقي لضاغط ذي ريش منزلقة

$$W_{vane} = n\left(\frac{k}{k-1}\right) P_1 * V_1 \left(\left(\frac{P_4}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) + n(P_f - P_4) V_4$$

- درجة الحرارة الساكنة

$$T_o = \left(T + \frac{C^2}{2c_p} \right)$$

- عمل الضاغط النابذي

$$W_{cen} = m * c_p * T_{o1} \left(\left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}} \right)^{k/k-1} - 1 \right)$$

نسبة ضغط الركود

$$\frac{P_{o2}}{P_{o1}} = \left[\frac{U_2^2}{c_p * T_{o1}} + 1 \right]^{k-1/k}$$

مسائل غير محلولة لفصل
ترموديناميك الضواغط

1. يدخل هواء إلى ضاغط ترددي هوائي بمرحلة واحدة بتدفق $(60\ m^3/hr)$ وبالشروط $[1.013\ bar, 15°C]$ ويخرج بضغط $[7\ bar]$. بفرض أن عملية الانضغاط هي عملية بوليتروبية بعامل 1.35 وبإهمال حجم الخلوص حدد 1) كتلة الهواء المفرغة (kg/min) 2) درجة حرارة التفريغ و3) استطاعة الضاغط والمردود الإيزوثرمي.
2. ضاغط ترددي بمرحلتين يدخل الهواء إلى المرحلة الأولى بالشروط $[1\ bar, 16°C]$ وتدفق $(12\ m^3/min)$. يفرغ الهواء في المرحلة الثانية بضغط $[7\ bar]$ مع تبريد بيني مثالي. بفرض أن عملية الانضغاط بوليتروبية بعامل 1.25 والضاغط يدرو بسرعة $[600\ RPM]$. بإهمال حجم الخلوص حدد 1) الضغط المتوسط (نسبة الضغوط المثلى) 2) حجم كل أسطوانة و3) العمل الكلي.
3. ضاغط ترددي ذو نسبة ضغط [7] وعملية الانضغاط هي بوليتروبية بعامل 1.35 وحجم خلوص 6.2 بالمئة من حجم الأسطوانة. إذا كان المردود الحجمي 0.8 ونسبة قطر الأسطوانة إلى الشوط هي $[D/L = 1.3]$ حدد أبعاد الأسطوانة.
4. يضغط ضاغط ترددي هواء إلى ضغط تفريغ $[6.5\ bar]$ فإذا فرضنا أن تدفق الضاغط $(0.5\ m^3/min)$ والضاغط يدرو بسرعة $[450\ RPM]$ والمردود الحجمي 0.75 والمردود الإيزوثرمي 0.76 حدد الضغط الوسطي الفعال واستطاعة الضاغط.
5. يضغط ضاغط ترددي بأربع مراحل هواء من الشروط $[1\ bar, 25°C]$ وإذا فرضنا أن نسبة ضغط التفريغ إلى ضغط الامتصاص هي [4.5] والتبريد البيني بين المراحل مثالي وعملية الانضغاط هي بوليتروبية بعامل (1.1) احسب عمل الضاغط الكلي.

الفصل الثاني
Chapter Two

ترموديناميك الضواغط
Compressor Thermodynamics

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
C	السرعة المطلقة لدافع الضاغط النابذي	m/s
C_u	مسقط السرعة المطلقة على مماس الدافع النابذي	m/s
C_r	مسقط السرعة المطلقة على حامل قطر الدافع النابذي	m/s
c_p	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت	$kJ/kg\ K$
h	الإنتالبي النوعية	kJ/kg
HP	استطاعة الضاعظ	hp
k	العامل الأدياباتي	لابعدي
m	الكتلة	kg
$\dot{m}$	التدفق الكتلي	kg/sec
MEP	نسبة الضغط الوسطي الفعال	kPa أو bar
MEP_{isoth}	نسبة الضغط الوسطي الفعال الإيزوثرمية	kPa أو bar
n	العامل البوليتروبي	لابعدي
P	الضغط	kPa أو bar
P_a	ضغط الهواء الحر	kPa أو bar
P_o	ضغط الركود	kPa أو bar

P_f	الضغط النهائي للضاغط ذات الريش المنزلقة	kPa أو bar
R	ثابت وسيط التشغيل (الغاز)	$kJ/kg\ K$
r_p	نسبة الضغط	لابعدي
r_v	نسبة الانضغاط	لابعدي
S	الإنتروبي	kJ/K
T	درجة الحرارة	K أو ℃
T_o	درجة حرارة الركود	K أو ℃
U	السرعة المماسية لدافع الضاغط النابذي	m/s
V	الحجم	m^3
V_{max}	الحجم الأعظمي	m^3
V_{min}	الحجم الأصغري	m^3
V_{BDC}	الحجم عند النقطة الميتة السفلى	m^3
V_{TDC}	الحجم عند النقطة الميتة العليا	m^3
V_s	حجم المسح	m^3
V_c	حجم الخلوص	m^3
V_{FAD}	حجم الهواء الحر الممتص	m^3
V_a	حجم الهواء بشروط الهواء الحر	m^3
V_{roots}	حجم الهواء المسلم في الضاغط ذات الريش المستقيمة	m^3

$\dot{V}$	التدفق الحجمي	m^3/s
v	الحجم النوعي	m^3/kg
v_{min}	الحجم النوعي عند النقطة الميتة السفلى	m^3/kg
v_{max}	الحجم النوعي عند النقطة الميتة العليا	m^3/kg
W	السرعة الحلزونية للدافع الضاغط النابذي	m/s
$W_{c,isoth}$	عمل الضاغط الإيزوثرمي	kJ
$W_{c,act}, W_a$	عمل الضاغط الحقيقي	kJ
$W_{c,poly}$	عمل الضاغط البوليتروبي	kJ
$W_{c,adia}$	عمل الضاغط الأدياباتي	kJ
W_{net}	عمل الضاغط الصافي	kJ
W_{LP}	عمل الضاغط في المرحلة المنخفضة	kJ
$W_{c,HP}$	عمل الضاغط في المرحلة المرتفعة	kJ
W_c	عمل الضاغط المتعدد المراحل الكلي	kJ
W_{isen}	عمل الضاغط الإيزونتروبي	kJ
W_{revo}	عمل الضاغط لدورة واحدة	kJ
W_{roots}	عمل الضاغط ذي الريش المستقيمة	kJ
W_{vane}	عمل الضاغط ذي الريش المنزلقة	kJ
W_{cen}	عمل الضاغط النابذي	kJ

w_{net}	العمل الصافي في الدورة الغازية	kJ/kg
$\eta_{c,isoth}$	المردود الإيزوثرمي	لابعدي
η_{Roots}	مردود الضاغط ذات الريش المستقيمة	لابعدي
η_{vol}	المردود الحجمي	لابعدي

مقدمة الفصل.

الضواغط هي أجهزة هندسية تعمل على تحويل الطاقة الكهربائية المقدمة لها إلى عمل ميكانيكي يظهر على شكل ارتفاع في ضغط وسيط التشغيل العامل بهذه الأجهزة. تستعمل الضواغط بشكل أساسي في الدورات الغازية والتبريدية التي سوف تدرس لاحقاً. سندرس في هذا الفصل الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية *Positive Displacement Compressors* والضواغط الديناميكية *Dynamics Compressors*. تقسم الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية إلى ضواغط ترددية *Reciprocating Compressors* وضواغط دورانية *Rotary Compressors*. الضواغط الدورانية تقسم إلى ضواغط ذات الريش المستقيمة *Straight Lobe Compressors* أو تسمى *Roots Blowers* والضواغط ذات الريش المنزلقة *Vane Type Compressors* أو *Sliding Vane* والضواغط الحلزونية *Screw Type or Helical Type*. سندرس أيضاً الضواغط الديناميكية التي تتميز عن الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية بالتدفقات المستمرة التي تعطيها مثل الضواغط النابذية *Centrifugal Compressors* والمحورية *Axial Compressors*. سنقارن بين الدورة الحقيقية والمثالية للضواغط الترددية ثم نقوم بتحديد نسب الضغوط المثلى للضواغط الترددية المتعددة المراحل. سنضع الأسس الترموديناميكية لكافة أنواع الضواغط المدروسة ونعرف العمل الأصغري المقدم إلى الضاغط باستخدام عمليات انضغاط أدياباتية وإيزوثرمية وبوليتروبية. سنتعرف أيضاً على المردود الإيزوثرمي والمردود الحجمي للضواغط بكافة أنواعها.

<u>الفوائد العلمية من الفصل</u>

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ تصنيف الضواغط بطرق مختلفة.
- ✓ تحليل الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية مثل الضواغط الترددية.

- ✓ وضع الأسس الترمويدناميكية للضواغط الترددية أحادية المرحلة والمتعددة المراحل.
- ✓ تحديد المردود الإيزوثرمي والمردود الحجمي للضواغط إلى أنواعها.
- ✓ تحليل الضواغط الدورانية ذات الإزاحة الإيجابية مثل الضواغط ذات الريش المستقيمة والمنزلقة والحلزونية ووضع الأسس الترموديناميكية لها.
- ✓ تحليل الضواغط الديناميكية ذات التدفقات المستمرة مثل الضواغط النابذية والمحورية ووضع الأسس الترموديناميكية لها.

محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.2	الضواغط وأنواعها.	91
2.2	ترموديناميك الضواغط الترددية.	97
3.2	عمل الضاغط الترددي أو مايسمى العمل التقني.	98
1.3.2	العمل في العملية الإيزوبارية.	101
2.3.2	العمل في العملية الإيزوخورية.	103
3.3.2	العمل في العملية الإيزوثرمية.	104
4.3.2	العمل في العملية البوليتروبية.	105
5.3.2	العمل في العملية الأدياباتية.	106
6.3.2	مقارنة العمل التقني في العمليات الترموديناميكية.	
4.2	المردود الإيزوثرمي.	
5.2	المردود الحجمي.	
6.2	المقارنة بين الدورة المثالية والدورة الحقيقية للضاغط الترددي.	
7.2	الضواغط الترددية المتعددة المراحل.	
8.2	ترموديناميك الضواغط الدورانية.	
1.8.2	الضواغط ذات الريش المستقيمة.	
2.8.2	الضواغط الحلزونية.	
3.8.2	الضواغط ذات الريش المنزلقة.	
9.2	ترموديناميك الضواغط النابذية.	

ملخص الفصل.

مسائل غير محلولة.

نهاية الفصل.

1.2 الضواغط وأنواعها.

الضاغط هو محرك *Engine* يمتص كمية من الطاقة الكهربائية ويحولها إلى طاقة ميكانيكية تعطى إلى وسيط التشغيل على شكل ضغط. الضواغط التي تستعمل الهواء كوسيط تشغيل تسمى بالضواغط الهوائية *Air Compressors*. تستخدم الضواغط في الكثير من التطبيقات الهندسية مثل الأجهزة الميكانيكية الهوائية والتي تعمل على الهواء *Pneumatic Tools* وأجهزة تنظيف السطوح وأجهزة البخ الحراري والضواغط الموجودة في محركات الطائرات والضواغط الموجودة في أجهزة التكييف (مبردات) والضواغط الموجودة في المحطات الغازية. تشبه الضواغط في عملها المراوح المحورية أو النابذية ولكن تختلف عنها بقيم نسب الضغط *Pressure Ratio* التي تعطيها. تعرف نسبة الضغط بأنها النسبة بين ضغط الخروج إلى ضغط الدخول بغض النظر عن عدد المراحل التي يمر بها وسيط التشغيل. نسبة الضغط في المراوح المحورية *Axial Fans* هي (1.1) وفي المراوح النابذية *Blowers* هي بين (4 – 1.1) أما في الضواغط الهوائية فهي أكبر من (4). يبين الشكل (1–2) الضواغط وأنواعها.



الشكل (1–2) أنواع الضواغط.

يمكن أن تصنف الضواغط بعدة أشكال

i.بالاعتماد على نوعية العمل *Principle of Operation*.

✓ الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية *Positive Displacement Compressors*. في هذه الضواغط يكون وسيط التشغيل محصوراً ضمن مكان معين ذي حدود صلبة (مثلاً أسطوانة) تكون إحدى هذه السطوح الصلبة (مثلاً سطح المكبس) قابلة للتحرك في اتجاه واحد فقط من أجل 1) رفع ضغط وسيط التشغيل إلى الضغط المطلوب و2) عدم السماح لهذا الوسيط بالتحرك في الاتجاه المعاكس. تقسم الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية إلى:

- الضواغط المكبسية الترددية *Reciprocating Compressors*.

تتألف الضواغط المكبسية الترددية كما في الشكل (2-2) من أسطوانة – مكبس حيث يؤدي تحرك المكبس في اتجاه معين إلى رفع ضغط وسيط التشغيل إلى الضغط المطلوب. تعطي الضواغط المكبسية الترددية نسب ضغوط عالية جداً ولكن تكون قدرتها على تسليم كميات كبيرة من وسيط الشتغيل محدودة أو صغيرة.

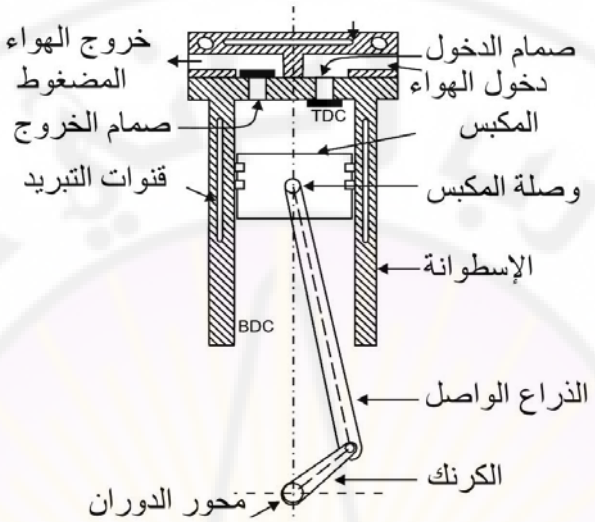
- الضواغط الدورانية *Rotary Compressors*.

تتألف الضواغط الدورانية من جزء دوار تؤدي حركته باتجاه معين إلى رفع ضغط وسيط التشغيل وتقسم هذه الضواغط إلى:

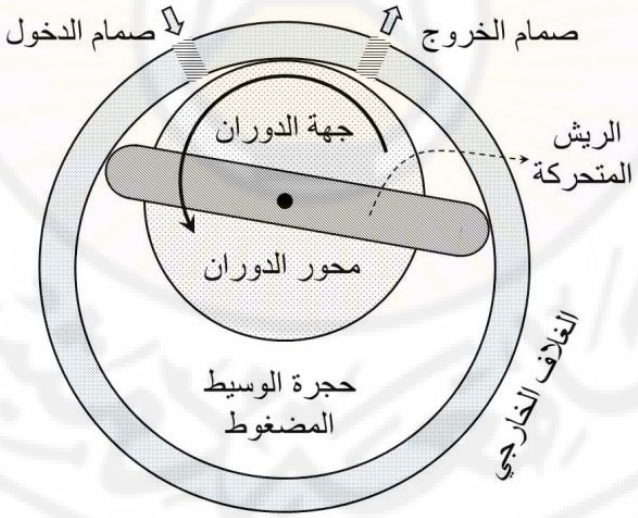
a) ضواغط بريش منزلقة *Sliding Vanes* كما في الشكل (3-2).

b) ضواغط الريش (الفص) المستقيمة *Straight Lobe Compressors* كما في الشكل (4-2).

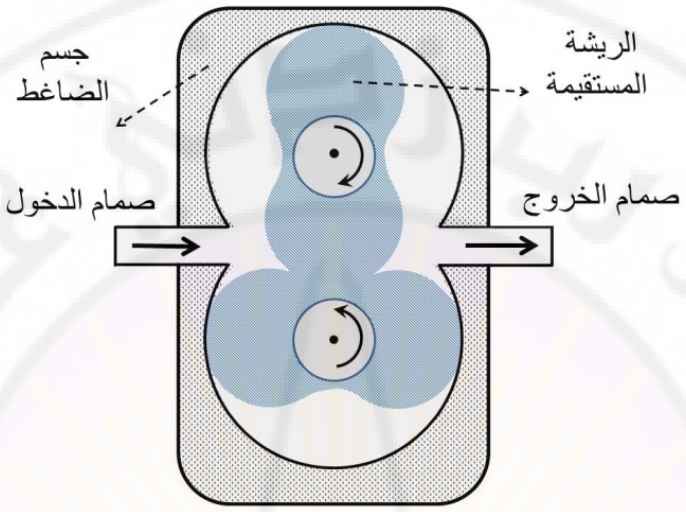
c) ضواغط الريش (الفص) الحلزونية *Helical Lobe Compressors* أو تسمى الضواغط الحلزونية *Screw Compressors* كما في الشكل (5-2). هي أمثلة عن الضواغط ذات الإزاحة الإيجابية.



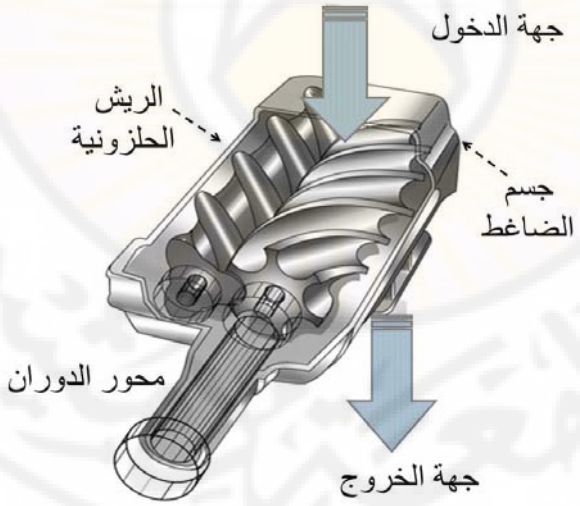
الشكل (2-2) الضواغط الترددية.



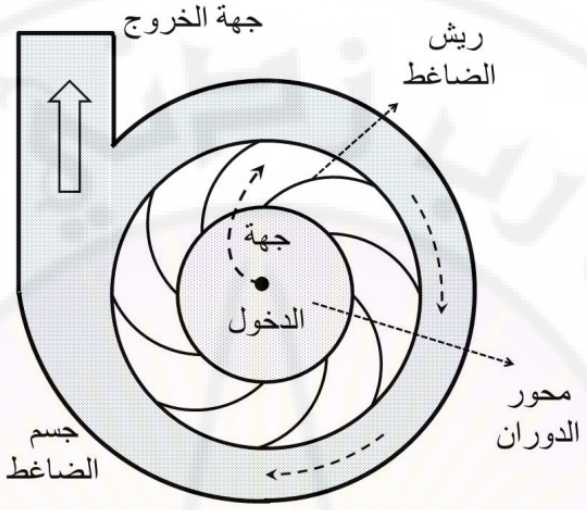
الشكل (2-3) ضواغط بريش منزلقة.



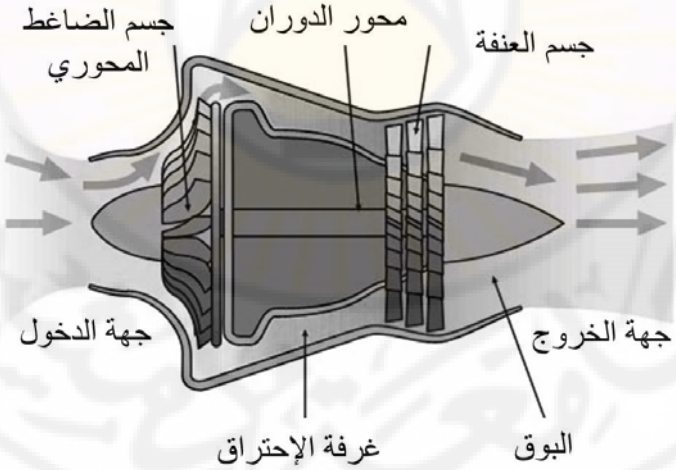
الشكل (4–2) ضواغط بريشة (فص) مستقيم.



الشكل (5–2) الضواغط الحلزونية.



الشكل (2-6) ضاغط نابذي (عنفي).



الشكل (2-7) الضواغط المحورية.

- ✓ الضواغط الديناميكية *Dynamic Compressors* أو تسمى الضواغط ذات التدفق المستمر *Continuous Flow Compressors*.

تقوم الضواغط الديناميكية وبشكل مستمر على رفع ضغط تدفق معين من وسيط التشغيل ضمن مكان محصورة بحدود صلبة. تقسم هذه الضواغط إلى:

a) ضواغط نابذية *Centrifugal Compressors* كما في الشكل (6−2) أو تسمى بالضواغط العنفية.

b) ضواغط محورية التدفق *Axial Flow Compressors* كما في الشكل (7−2) كما في محركات الطائرات.

c) ضواغط ذات جريات مختلطة *Mixed Flow Compressors* التي تجمع بين الحالتين السابقتين.

ii. بالاعتماد على عدد مراحل العمل *Number of Stages*.

تصنف الضواغط أيضاً بحسب عدد مراحل العمل والذي يحدده الضغط الأعظمي المطلوب لوسيط التشغيل عند خروجه من الضاغط. قد تكون الضواعط بمرحلة عمل واحدة *Single Stage* حيث تصل نسبة الضغط إلى (5) أو متعدة المراحل *Multi-Stage* حيث تصل نسبة الضغط إلى أكبر من (5). القيم الأعظمية لضغط الخروج تتبع لعدد المراحل في الضاغط فالضواغط ذات المرحلة الواحدة تعطي $(5\ bar)$ والضواغط ذات المرحلتين تعطي ضغوطاً بين $[5 - 35\ bar]$ والضواغط ذات ثلاثة مراحل تعطي ضغوطاً بين $[35 - 85\ bar]$ والضواغط بأربعة مراحل تعطي ضغوطاً أكبر من $(85\ bar)$.

iii. بالاعتماد على استطاعة الضاغط *Capacity of Compressors*.

تُعرف استطاعة الضاغط بالتدفق الحجمي لوسيط التشغيل عبر الضاغط. فالضواغط ذات الاستطاعة المنخفضة يكون تدفقها الحجمي أقل من $(0.15\ m^3/s)$ والضواغط ذات

الاستطاعة المتوسطة تعطي تدفقات حجمية بين $[0.15\ m^3/s - 5\ m^3/s]$ والضواعط ذات الاستطاعة المرتفعة تعطي تدفقات حجمية أكبر من $(5\ m^3/s)$.

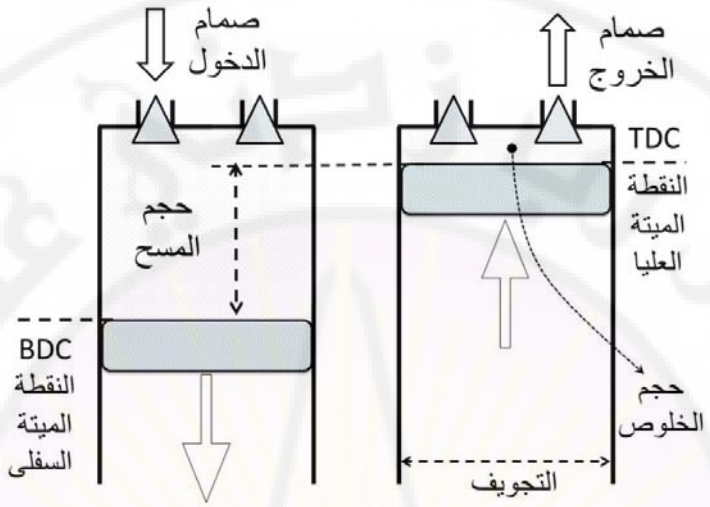
iv. بالاعتماد على ضغط الخروج *Highest Pressure Developed*.

يمكن تصنيف الضواغط أيضاً بحسب ضغط وسيط التشغيل الخارج من الضاغط. ضواغط تعطي ضغوطاً منخفضة تصل إلى $(1\ bar)$ وضواغط تعطي ضغوطاً متوسطة تقع ضمن المجال $[1\ bar - 8\ bar]$ وضواغط تعطي ضغوطاً مرتفعة بين $[8\ bar - 10\ bar]$ وضواغط تعطي ضغوطاً مرتفعة جداً أعلى من $(10\ bar)$.

2.2 ترموديناميك الضواغط الترددية *Reciprocating Compressors*.

سنقوم باعتماد **الهواء** كوسيط تشغيل في كافة الضواغط الترددية لسهولة إيجاد البارامترات الترموديناميكية للهواء. سنقوم باعتبار الهواء غازاً مثالياً ضمن أي ضاغط.

يتردد المكبس الموجود في أسطوانة الضاغط الترددي بين نقطتين ثابتتين. النقطة الأول تسمى النقطة الميتة العليا *Top Dead Center (TDC)* ويشكل المكبس عند وصوله إلى هذه النقطة مع غطاء الأسطوانة **أصغر** حجم ممكن يسمى بحجم الخلوص *Clearance Volume* (V_c) كما في الشكل (8−2). في الدورات النظرية يهمل حجم الخلوص ولكن هذا الحجم لايمكن إهماله في الدورات الحقيقية. ضغط الهواء عند وصول المكبس إلى النقطة الميتة العليا والموافق لحجم الخلوص نظرياً يسمى **بضغط التفريغ** وهو **أعلى ضغط** متشكل ضمن الأسطوانة. النقطة الثانية تسمى النقطة الميتة السفلى *Bottom Dead Center (BDC)* ويشكل المكبس عند وصوله إلى هذه النقطة مع جدران الأسطوانة أكبر حجم ممكن يسمى بحجم المسح *Swept Volume,* (V_s) أو حجم الامتصاص. ضغط الهواء عند وصول المكبس إلى النقطة الميتة السفلى والموافق لحجم المسح نظرياً بضغط الهواء الممتص وهو أخفض ضغط متشكل ضمن الأسطوانة ويسمى **بضغط الإمتصاص**.



الشكل (8−2) نقاط الموجودة في الضاغط الترددي
والشوط وحجم الخلوص.

يدخل الهواء عبر صمام الدخول *Intake Valve* إلى الأسطوانة ويخرج مضغوطاً عن طريق صمام الخروج *Exhaust Valve*. تسمى المسافة بين النقطة الميتة العليا والسفلى أيضاً بشوط المحرك *Stroke* أو حجم الإزاحة *Displacement Volume* ويعطى بالرمز (V_D) ويسمى قطر الأسطوانة بالتجويف *Bore*.

3.2 عمل الضاغط الترددي أو مايسمى العمل التقني *(Technical Work)*.

العمل المقدم إلى الأجهزة الهندسية ذات الجريانات المستقرة العكوسة هو عمل خارجي يختلف عن عمل الحدود في الأنظمة المغلقة ذات الحدود المتغيرة وعمل التدفق في الأنظمة المفتوحة. يسمى هذا العمل بالعمل التقني *Technical Work*. لحساب هذا العمل التقني نبدأ من القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة العكوسة

$$\delta q_{rev} - \delta w_{tech,rev,out} = dh + dke + dpe \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\delta\dot{Q}_{rev} - \delta\dot{W}_{tech,rev,out} = \dot{m} * dh + dKE + dPE \quad (kW)$$

كمية الحرارة بحسب تعريف الإنتروبي وعلاقة (Tds) تعطى بالشكل

$$\delta q_{rev} = Tds$$

من علاقة (Tds) نجد أن

$$Tds = dh - vdP$$

بتعويض علاقة (Tds) في معادلة كمية الحرارة (δq_{rev}) نجد أن

$$\delta q_{rev} = dh - vdP$$

بتعويض كمية الحرارة في القانون الأول نجد أن

$$-\delta w_{tech,rev,out} = vdP + dke + dpe$$

بالمكاملة بين حالتين نجد

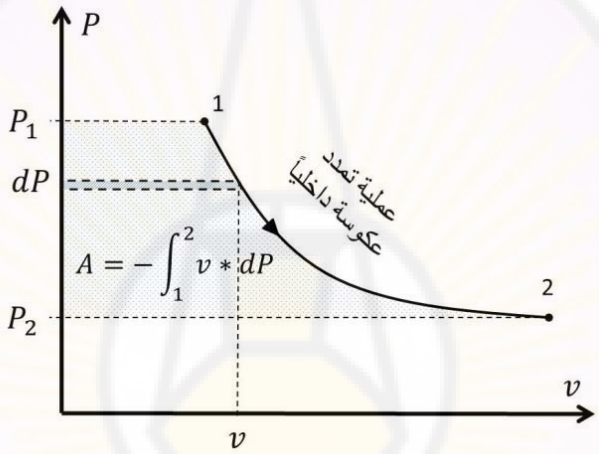
$$w_{tech,rev,out} = -\int_1^2 vdP - \Delta ke - \Delta pe \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \tag{1-2}$$

بأخذ الإشارة السالبة وبحسب عرف الإتجاه على أن العمل السابق مقدم إلى النظام وبإهمال الطاقة الحركية والكامنة تتحول المعادلة (1−2) إلى

$$w_{tech,rev,in} = \int_1^2 vdP \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \tag{2-2}$$

$$\dot{W}_{tech,rev,in} = \dot{m} * \int_1^2 vdP \qquad (kW)$$

العلاقة (2−2) تسمى العمل التقني في الجريانات المستقرة وهي أقل عمل ممكن تزويده إلى الأجهزة الهندسية. نلاحظ من العلاقة بأن العمل التقني العكوس يزداد مع ازدياد الحجم النوعي (نقصان الكثافة) مع إهمال الطاقة الحركية والكامنة لذلك نعمل على تخفيض الحجم النوعي للوسيط من أجل تقليل العمل اللازم في عملية ما. يمكن حساب العمل التقني من مخطط $(P-v)$ بحساب المستحة المحصورة بين العملية ومحور الضغوط كما في الشكل (9−2).



الشكل (9−2) العمل التقني.

لكي نقوم على حساب العمل التقني في العلاقة السابقة يجب أن يتوفر لدينا علاقة (تابع) الحجم النوعي بدلالة الضغط قبل أن نقوم بحساب قيمة التكامل في العلاقة السابقة.

1.3.2 العمل في العملية الإيزوبارية.

عندما يكون الضغط ثابتاً يكون العمل التقني يساوي الصفر ولا معنى لهذه العملية على الإطلاق.

$$w_{tech,rev,in} = \int_1^2 vdP = 0$$

2.3.2 العمل في العملية الإيزخورية.

عندما يكون وسيط التشغيل غير قابل للانضغاط (الحجم النوعي ثابتاً) مثل الماء فيمكن إخراج الحجم النوعي إلى خارج التكامل وتتحول العلاقة إلى

$$w_{rev,in} = v * (P_2 - P_1) \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (3\text{-}2)$$

يسمى هذا العمل في العلاقة السابقة بضاغط المضخة *Pump Head*. بمكاملة العلاقة (2−1) وبجعل العمل معدوماً كما في الجريان في الأبواق أو النواشر أو الأنابيب فتتحول المعادلة إلى المعادلة المعروفة في ميكانيك السؤائل والتي تسمى بمعادلة برنولي *Bernoulli Equation*

$$\frac{(P_2 - P_1)}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) = 0 \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (4\text{-}2)$$

المثال التطبيقي 2−1 – ضغط سائل بالمقارنة مع ضغط غاز.

حدد العمل اللازم لضغط بخار ماء بشكل إيزونتروبي بين الحالة $(100\,kPa)$ و $(1\,MPa)$ بفرض أن البخار الخارج من العملية هو 1) ماء مشبع و2) بخار مشبع.

الفرضيات. 1) جريان مستقر 2) نهمل الطاقة الحركية والكامنة 3) العملية إيزونتروبية.

التحليل: العمل التقني بسحب العلاقة السابقة هو

$$w_{rev,out} = -v * (P_2 - P_1)$$

ولكن العمل هو عمل مقدم إلى المضخة وبالتالي

$$w_{rev,in} = v(P_2 - P_1)$$

الحالة الأولى سائلاً مشبعاً.

يبقى وسيط التشغيل على شكل سائل مشبع ضمن المضخة وبالتالي

$$v_{1@100kPa} = 0.001043\ m^3/kg$$

ولا تغيير في الحجم النوعي عند خروجه من المضخة أي يبقى سائلاً مشبعاً. بالتعويض في علاقة العمل التقني نجد أن العمل المقدم هو

$$w_{rev,in,liquid} = (0.001043\ m^3/kg) * (1000 - 100)kPa$$

$$w_{rev,in,liquid} = 0.94\ kJ/kg$$

الحالة الثانية بخاراً مشبعاً.

يكون وسيط التشغيل بخاراً مشبعاً وبالتالي يجب تحديد بارامترات كلتا الحالتين. باعتبار أن العملية إيزونتروبية نجد أن

$$Tds = dh - vdP$$

$$dh = vdP$$

بالتعويض في العمل نجد أن

$$w_{rev,in,vapor} = \int_1^2 vdP = \int_1^2 dh$$

$$w_{rev,in,vapor} = h_2 - h_1$$

عند دخول البخار إلى المضخة بالبارامترات التالية $(100\ kPa, Sat\ Vapor)$ تكون قيمة الإنتالبي المأخوذة من جداول الإشباع بدلالة الضغط هي

$$h_1 = h_g = 2675\ kJ/kg$$

$$s_1 = s_g = 7.3589\ kJ/kgK$$

عند خروج البخار من الضخة بالبارمترات التالية $(1\ MPa,\ s_2 = s_1)$ نجد من الجداول أن البخار هو بخار محمص وقيمة الإنتالبي هي

$$h_2 = 3194.5\ kJ/kg$$

$$s_2 = s_1 = 7.3589\ kJ/kgK$$

$$T_2 = 366.65\ ℃$$

وبالتالي يكون العمل التقني

$$w_{rev,in,vapor} = (3194.5 - 2675)$$

$$w_{rev,in,vapor} = 519.5\ kJ/kg$$

مناقشة.

نلاحظ أيضاً أن العمل اللازم لرفع ضغط البخار هو 500 مرة العمل اللازم لرفع ضغط السائل بين حدود ضغط متساوية.

3.3.2 العمل في العملية الإيزوثرمية.

بإعتبار أن وسائط التشغيل التي تستخدم في الضواغط هي غازات مثالية كالهواء فيمكن إستخدام علاقة الحالة أو الغاز المثالي في حساب العمل التقني للضاغط كما يلي

$$Pv = RT$$

$$v = \frac{RT}{P}$$

بتعويض العلاقة السابقة في معادلة العمل التقني (2−2) نجد أن

$$w_{tech,rev,in} = \int_1^2 vdP = \int_1^2 \frac{RT}{P} dP$$

بالمكاملة بين الحالة الإبتدائية والنهائية للعملية الإيزوثرمية نجد أن علاقة العمل التقني تتحول إلى

$$w_{isoth,rev,in} = RT\ ln\frac{P_2}{P_1} \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (5\text{-}2)$$

4.3.2 العمل في العملية البوليتروبية.

بإستخدام العلاقة البوليتروبية في إستخراج العلاقة بين الضغط والحجم النوعي نجد أن

$$P * v^n = const$$

بتعويض العلاقة السابقة في معادلة العمل التقني (2−2) نجد أن

$$w_{tech,rev,in} = \int_1^2 vdP = \int_1^2 \frac{const}{P^{(1/n)}} dP = \int_1^2 const * P^{-(1/n)} * dP$$

بالمكاملة بين الحالة الإبتدائية والنهائية للعملية الإيزوثرمية نجد أن علاقة العمل التقني تتحول إلى

$$w_{poly,rev,in} = \frac{n-1}{n}(P_2v_2 - P_1v_1) \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (6\text{-}2)$$

بإخراج الضغط والحجم النوعي في الحالة الإبتدائية من العلاقة السابقة وبأخذ العلاقات البوليتروبية العامة

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$$

نجد أن العلاقة (6−2) تتحول إلى

$$w_{poly,rev,in} = \frac{n}{n-1} * P_1 v_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad \left(\frac{kJ}{kg} \right) \qquad (7\text{-}2)$$

تسمى النسبة بين ضغط التفريغ وضغط الامتصاص بنسبة الضغط *Pressure Ratio,* (r_p) وتعطى بالعلاقة

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} \qquad (8\text{-}2)$$

تسمى النسبة بين حجم المسح وحجم الخلوص بنسبة الانضغاط *Compression Ratio,*(r_v) وهي وتعطى بالعلاقة

$$r_v = \frac{v_1}{v_2} = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_s}{V_c} = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}} \qquad (9\text{-}2)$$

بإستخدام نسبة الضغط في معاجلة العمل التقني في العملية البوليتروبية نجد أن المعادجلة تتحول إلى

$$w_{poly,rev,in} = \frac{n}{n-1} * P_1 v_1 \left[\left(r_p \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad \left(\frac{kJ}{kg} \right) \qquad (10\text{-}2)$$

5.3.2 العمل في العملية الأدياباتية.

علاقة العمل في العملية الأدياباتية هو نفسه في العلاقة البوليتروبية ولكن يختلف الثابت من (n) إلى (k) اي تصبح العلاقة من الشكل

$$w_{adia,rev,in} = \frac{k}{k-1} * P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad \left(\frac{kJ}{kg} \right) \qquad (11\text{-}2)$$

أو بالشكل

$$w_{adia,rev,in} = \frac{k}{k-1} * P_1 V_1 \left[(r_p)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad \left(\frac{kJ}{kg} \right) \qquad (12\text{-}2)$$

6.3.2 مقارنة العمل التقني في العمليات الترموديناميكية.

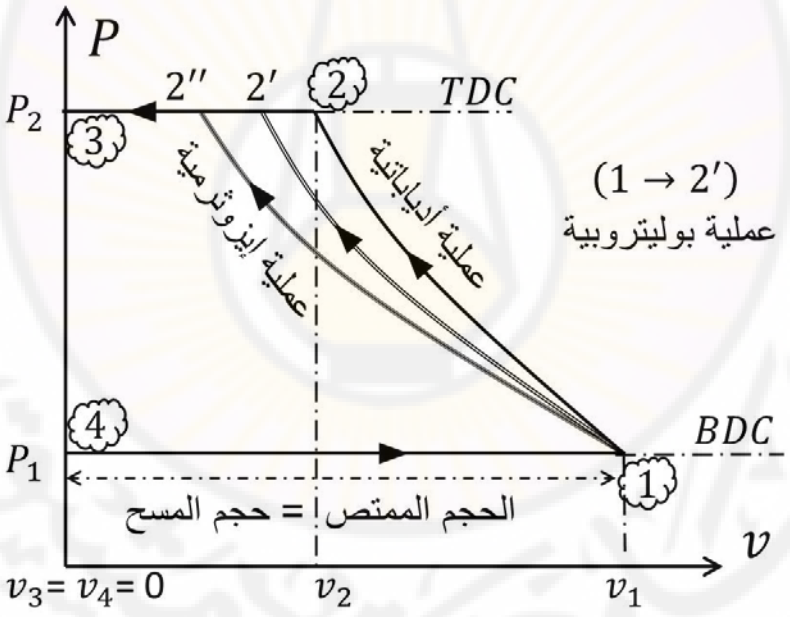
نلاحظ من العمليات الترموديناميكية السابقة أن العمل في العملية الإيزوثرمية أقل من العمل في العملية البوليتروبية كما أن العمل في العملية البوليتروبية أقل من العمل في العمل الأدياباتية (للهواء مثلا $k = 1.4 > n = 1.3$).

$$w_{adia,rev,in} > w_{poly,rev,in} > w_{isoth,rev,in}$$

يبين الشكل (2−10) العمليات الترموديناميكية التي تحدث في الضاغط ممثلة على مخطط $(P - v)$.

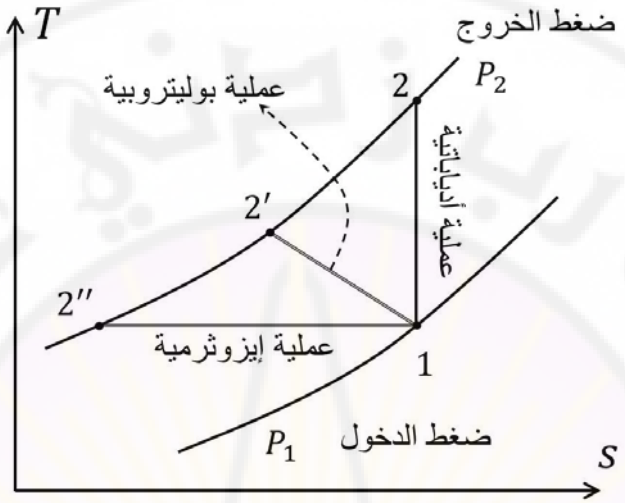
- ✓ تمثل العملية $(1 \rightarrow 2)$ عملية انضغاط أدياباتية *Adiabatic Compression* وهي العملية الأكبر من حيث المساحة.
- ✓ تمثل العملية $(1 \rightarrow 2')$ عملية انضغاط بوليتروبية *Polytropic Compression*.
- ✓ تمثل العملية $(1 \rightarrow 2'')$ عملية انضغاط إيزوثرمية *Isothermic Compression*.
- ✓ تمثل العملية $(1 \rightarrow 4)$ عملية دخول (سحب) الهواء إلى أسطوانة الضاغط.
- ✓ تمثل العملية $(2 \rightarrow 3)$ عملية طرح الهواء المضغوط إلى خارج الضاغط.

يمكن حساب عمل الانضغاط من مخطط $(P-v)$ من خلال حساب المساحة المحصورة بين محور الحجم النوعي ومنحني أي عملية من العمليات السابقة. نلاحظ أن أيضاً أن العمل الأصغري الذي يبذله الضاغط هو المساحة المحصورة تحت عملية الانضغاط إيزوثرمية أي العملية $(2'' \rightarrow 1)$ ومحور الضغط والعمل الأعظمي الذي يبذله الضاغط هو المساحة المحصورة تحت عملية الانضغاط أدياباتية أي العملية $(2 \rightarrow 1)$ ومحور الضغط. لايمكن تحقيق عملية الانضغاط الإيزوثرمية في الضواغط الحقيقية لأن مكبس الأسطوانة يتحرك بسرعات عالية جداً فلذلك، ومن أجل دراسة هذه الضواغط، نأخذ عملية الانضغاط الأدياباتية أو عملية الانضغاط البوليتروبية بثابت بوليتروبي للهواء يتراوح بين $[n = 1.25 - 1.35]$.



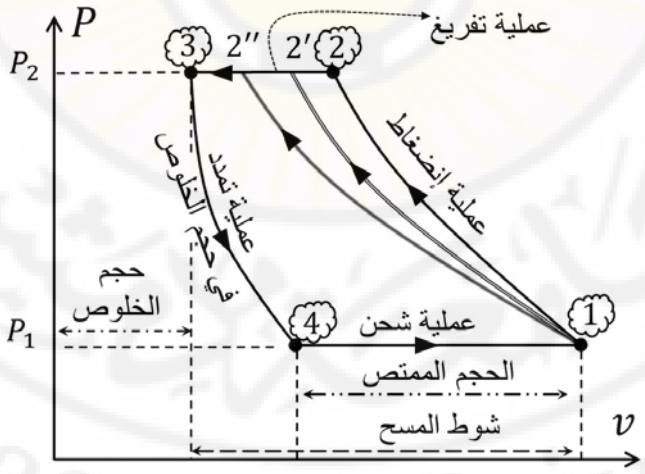
الشكل (10–2) العمليات الترموديناميكية في الضاغط الترددي بدون حجم الخلوص.

يبين الشكل (11–2) العمليات الترموديناميكية التي تحدث في الضاغط ممثلة على مخطط $(T-s)$.



الشكل (11–2) عمليات الانضغاط الترموديناميكية على مخطط $(T-s)$.

يبين الشكل (12–2) العمليات الترموديناميكية التي تحدث في الضاغط ممثلة على مخطط $(P-v)$ وتأثير حجم الخلوص على هذه الدورة.



الشكل (12–2) العمليات الترموديناميكية في الضاغط الترددي مع حجم الخلوص.

4.2 المردود الإيزوثرمي *Isothermal Efficiency*.

من أجل المقارنة بين الدورات الحقيقية والدورات المثالية في الضواغط الترددية نقوم باستخدام المردود الإيزوثرمي والذي يعرف بأنه النسبة بين العمل الإيزوثرمي (العمل الأصغري) إلى العمل الحقيقي (العمل البوليتروبي) ويعطى بالعلاقة

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,act}} \qquad (13\text{-}2)$$

يتراوح العمل الحقيقي $(W_{c,act})$ بين العمل الأدياباتي والعمل الإيزوثرمي أي أن العمل الحقيقي هو عمل بوليتروبي يتراوح فيه ثابت البوليتروب بين $(1 < n < k)$. بتعويض العمل الإيزوثرمي والعمل البوليتروبي في علاقة المردود الإيزوثرمي نجد أن

$$\eta_{c,isoth} = \frac{n-1}{n} * \frac{ln(r_p)}{(r_p)^{\frac{n-1}{n}} - 1} \qquad (14\text{-}2)$$

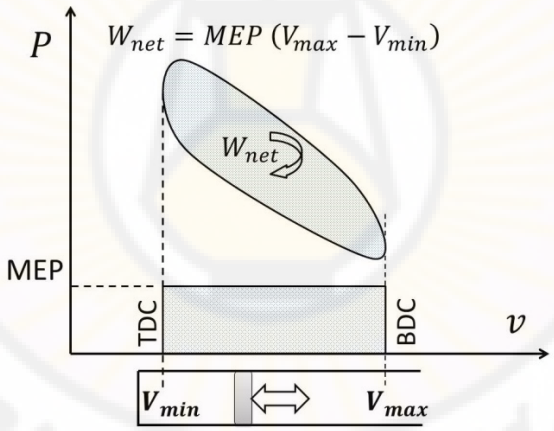
نلاحظ أن قيم المردود الإيزوثرمي **تتراوح** بين قيم عملية الانضغاط الأدياباتية $(n = k)$ وقيم عملية الانضغاط الإيزوثرمية $(n > 1)$ التي يكون عندها قيمة المردود 100%. يمكن أن نرفع من قيم المردود بالاقتراب من العملية الإيزوثرمية قدر المستطاع ويتم ذلك عن طريق:

- تبريد جسم الأسطوانة بواسطة وسيط تبريد هوائي من خلال استخدام ريش أو زعانف *Fins* على جسم الأسطوانة من الخارج.
- تبريد جسم الأسطوانة بواسطة وسيط تبريد مائي *Water Jacket* محيط بجسم الأسطوانة.
- حقن الماء في نهاية عملية الانضغاط لتبريد الهواء المضغوط الداخل إلى الأسطوانة وهذا يحتاج إلى تصاميم معقدة لجسم الأسطوانة.
- يمكن استخدام تقنية التبريد البيني *Intercooling* في الضواغط المتعددة المراحل حيث يتم تبريد الهواء الخارج من المرحلة السابقة قبل دخوله إلى المرحلة التالية.

هناك نسبة أخرى تستخدم في المحركات الترددية في حساب العمل الصافي وهي نسبة الضغط الوسطي الفعال *Mean Effective Pressure (MEP)* كما هو واضح في الشكل (13−2). تعرف نسبة الضغط الوسطي الفعال بنسبة العمل الصافي إلى حجم الهواء في الأسطوانة. هذه النسبة هي نسبة افتراضية إذا طبقت على مكبس المحرك الترددي وعلى طول شوطه تُنتج كمية العمل نفسها التي تنتجه دورة حقيقة. تعطى علاقة نسبة الضغط الوسطي الفعال بدلالة العمل الحقيقي بالشكل

$$W_{net} = MEP * \text{الشوط} * \text{مساحة المكبس}$$

$$W_{net} = MEP * \text{حجم الإزاحة}$$



الشكل (13−2) نسبة الضغط الوسطي الفعال في المحركات الترددية.

وبالتالي فإن

$$MEP = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{w_{net}}{v_{max} - v_{min}} \quad (kPa) \qquad (15\text{-}2)$$

تستخدم هذه النسبة للمقارنة بين المحركات الترددية ذات القياس نفسه وكلما كانت هذه النسبة أكبر كان العمل المستخرج من المحرك أكبر. استطاعة الضاغط تعطى بالعلاقة

$$HP = MEP * \dot{V} \quad (kW)$$

يجب الأخذ بعين أن $(1\ hp = 0.7457\ kW)$

المثال التطبيقي 2-2 – ضاغط ترددي بمرحلة واحدة.

ضاغط ترددي يضغط هواء حر من الحالة الأولى ذات البارامترات $[P_1 = 1\ bar, T_1 =$ 17°C] إلى الحالة الثانية ذات الضغط $[P_2 = 6\ bar]$. باعتبار أن الضاغط بمرحلة واحدة ويدور بسرعة $(N = 120\ RPM)$ وبفرض أن قطر الأسطوانة هو $(24\ cm)$ وشوطها $(36\ cm)$ أوجد 1) نسبة الضغط الوسطي الفعال 2) استطاعة الضاغط عندما تكون عملية الانضغاط إيزوثرمية وأدياباتية وبوليتروبية بعامل بوليتروبي يساوي (1.3) ثم احسب 3) المردود الإيزوثرمي عندما يعمل الضاغط بشكل بوليتروبي وأدياباتي.

الفرضيات: 1) وسيط التشغيل هو الهواء الذي يعمل على شكل غاز مثالي 2) حجم الخلوص مهمل والضاغط مثالي.

التحليل: نسب الضغط بين الدخول والخروج هي

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{6}{1} = 6$$

حجم المسح يساوي حجم الإزاحة باعتبار أن حجم الخلوص يساوي الصفر

$$\dot{V} = V * N_{rev}$$

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * L$$

$$V = \frac{\pi}{4} * (0.24m)^2 * (0.36m)$$

$$V = 0.01628\ m^3$$

بالتعويض نجد أن التدفق الحجمي

$$\dot{V} = \frac{\pi}{4} * D^2 * L * N_{rev}$$

$$\dot{V} = 0.01628 m^3 * \left(120 \frac{round}{min}\right)$$

$$\dot{V} = 1.954\ m^3/min$$

1- في **عملية الانضغاط الإيزوثرمية** يمكن حساب العمل الإيزوثرمي من العلاقة

$$W_{c,isoth} = P_1 V_1 ln(r_p)$$

$$W_{c,isoth} = 100\ kPa * 0.01628 m^3 * ln(6)$$

$$W_{c,isoth} = 2.917\ kJ$$

نسبة الضغط الوسطي الفعال تعطى بالعلاقة

$$MEP = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}}$$

نسبة الضغط الوسطي الفعال لعملية الانضغاط الإيزوثرمية حيث $(V_{min} = 0)$ هي

$$MEP_{isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{V}$$

$$MEP_{isoth} = \frac{2.917\ kPa * m^3}{0.01628\ m^3}$$

$$MEP_{isoth} = 179.175\ kPa$$

أو يمكن حسابها من العلاقة

$$MEP_{isoth} = \frac{P_1 V_1 ln(r_p)}{V_1}$$

$$MEP_{isoth} = P_1 ln(r_p)$$

$$MEP_{isoth} = 100\ kPa * ln(6)$$

$$MEP_{isoth} = 179.175\ kPa$$

تعطى استطاعة الضاغط بالعلاقة

$$HP_{isoth} = MEP_{isoth} * \dot{V}$$

$$HP_{isoth} = 179.175\ kPa * \frac{1.954}{60}\frac{m^3}{s}$$

$$HP_{isoth} = 5.8351\ kW = 7.825\ hp$$

2- في **عملية الانضغاط البوليتروبية** يمكن حساب العمل البوليتروبي ذات العامل ($n = 1.3$) من العلاقة

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left[(r_p)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$W_{c,poly} = \frac{1.3}{0.3} * 100kPa * 0.01628m^3 * \left[(6)^{\frac{0.3}{1.3}} - 1 \right]$$

$$W_{c,poly} = 3.6125\ kJ$$

نسبة الضغط الوسطي الفعال للعملية البوليتروبية هو

$$MEP_{poly} = \frac{W_{c,poly}}{V_1}$$

$$MEP_{poly} = \frac{3.6125\ kJ}{0.01625\ m^3}$$

$$MEP_{poly} = 221.89\ kPa$$

أو من العلاقة

$$MEP_{poly} = \frac{\frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left[(r_p)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}{V_1}$$

$$MEP_{poly} = \frac{n}{n-1} * P_1 \left[(r_p)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$MEP_{poly} = 221.89\ kPa$$

تعطى استطاعة الضاغط بالعلاقة

$$HP_{poly} = MEP_{poly} * \dot{V}$$

$$HP_{poly} = 221.89\ kPa * \frac{1.954}{60} \frac{m^3}{s}$$

$$HP_{poly} = 7.226\ kW = 9.69\ hp$$

3- في **عملية الانضغاط الأدياباتية** يمكن حساب العمل الأدياباتي من العلاقة

$$W_{c,adia} = \frac{k}{k-1} * P_1 V_1 \left[(r_p)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$W_{c,adia} = \frac{1.4}{0.4} * 100kPa * 0.01628m^3 * \left[(6)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right]$$

$$W_{c,adia} = 3.802\ kJ$$

نسبة الضغط الوسطي الفعال للعملية الأدياباتية هو

$$MEP_{adia} = \frac{W_{c,adia}}{V_1}$$

$$MEP_{adia} = \frac{3.802\ kJ}{0.01625\ m^3}$$

$$MEP_{adia} = 233.98\ kPa$$

أو من العلاقة

$$MEP_{adia} = \frac{\frac{k}{k-1} * P_1 V_1 \left[\left(r_p\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{V_1}$$

$$MEP_{adia} = \frac{k}{k-1} * P_1 \left[\left(r_p\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$MEP_{adia} = 233.98\ kPa$$

تعطى استطاعة الضاغط بالعلاقة

$$HP_{adia} = MEP_{adia} * \dot{V}$$

$$HP_{adia} = 233.89\ kPa * \frac{1.954}{60} \frac{m^3}{s}$$

$$HP_{adia} = 7.617\ kW = 10.22\ hp$$

يعطى المردود الإيزوثرمي من العلاقة

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,act}}$$

من أجل عمل حقيقي يساوي العمل البوليتروبي يكون المردود

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,poly}}$$

$$\eta_{c,isoth} = 0.8075\ or\ 80.75\%$$

من أجل عمل حقيقي يساوي عمل أدياباتي يكون المردود من الشكل

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,adia}}$$

$$\eta_{c,isoth} = 0.7657\ or\ 76.57\%$$

مناقشة:

	العمل المقدم (kJ)	الضغط الوسطي الفعال (kPa)	الاستطاعة (kW)	المردود
العملية الإيزوثرمية	2.917	179.175	5.8351	100
العملية البوليتروبية	3.6125	221.89	7.226	80.75
العملية الأدياباتية	**3.802**	233.98	**7.617**	**76.57**

نلاحظ من الجدول السابق أن العمل المقدم للضاغط في عملية الانضغاط الأدياباتية والذي يساوي $(W_{c,adia} = 3.802\ kJ)$ هو أكبر عمل لذلك يمثل العمل الحقيقي للضاغط والذي يوافق استطاعة مقدمة بقيمة $(7.617\ kW)$ ومردود (76.57).

المثال التطبيقي 2–3 – ضاغط ترددي بعملية بوليتروبية.

ضاغط ترددي يضغط هواء حراً من الحالة $[P_1 = 1\ bar, T_1 = 20°C]$ بعملية بوليتروبية ذات عامل بوليتروبي $[n = 1.2]$ حتى ضغط تفريغ $[P_2 = 12\ bar]$، باعتبار أن الضاغط بمرحلة واحدة ونسبة طول الشوط إلى قطر الأسطوانة هي $[L/D = 1.8]$ وحجم المسح هو $(1\ m^3)$. أوجد المردود الإيزوثرمي وقطر الأسطوانة في هذا الضاغط.

الفرضيات: 1) وسيط التشغيل هو الهواء والذي يعمل على شكل غاز مثالي 2) حجم الخلوص مهمل والضاغط مثالي.

التحليل: يحسب المردود الإيزوثرمي خلال عملية انضغاط بوليتروبية حقيقية من الشكل

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,poly}}$$

العمل البوليتروبي يحسب من العلاقة

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left[(r_p)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

تحسب نسبة الضغط من العلاقة

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{12}{1} = 12$$

بالتعويض نجد

$$W_{c,poly} = \frac{1.2}{0.2} * 100kPa * 1m^3 \left[(12)^{\frac{0.2}{1.2}} - 1 \right]$$

$$W_{c,poly} = 307.851\ kJ$$

أو من العلاقة

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * mR[T_2 - T_1]$$

تحسب الكتلة من معادلة الغاز المثالي

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1}$$

$$m = \frac{100kPa * 1m^3}{0.287\ \frac{kJ}{kgK} * 293K}$$

$$m = 1.18918\ kg$$

بما أن العملية بوليتروبية فإن درجة الحرارة النهائية هي

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$T_2 = 443.334\ K$$

$$W_{c,poly} = \frac{1.2}{0.2} * 1.18918\ kg * 0.287 \frac{kJ}{kgK} [443.334 - 293]K$$

$$W_{c,poly} = 307.849\ kJ$$

العمل الإيزوثرمي يحسب من العلاقة

$$W_{c,isoth} = P_1 V_1 ln(r_p)$$

أو من العلاقة

$$W_{c,isoth} = mRT_1 ln(r_p)$$

بالتعويض نجد أن

$$W_{c,isoth} = 100kPa * 1m^3 * ln12$$

$$W_{c,isoth} = 248.491\ kJ$$

بالتعويض في المردود الإيزوثرمي نجد أن

$$\eta_{c,isoth} = \frac{248.49}{307.849} = 0.8071\ or\ 80.71\ \%$$

قطر الأسطوانة يحسب من حجم المسح والذي يساوي $(1m^3)$

$$\left[\frac{\pi}{4} * (D\ m)^2 * (L\ m)\right] = 1\ m^3$$

وبما أن نسبة الشوط إلى القطر هي $[L/D = 1.8]$ أي ان $[L = 1.8D]$ وبالتعويض نجد

$$\left[\frac{\pi}{4} * (D\ m)^2 * (1.8D\ m)\right] = 1m^3$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4}{1.8 * \pi}}$$

$$D = 0.891\ m = 89.1\ cm$$

5.2 المردود الحجمي *Volumetric Efficiency*.

يعرف المردود الحجمي على أنه النسبة بين حجم الهواء الحقيقي الحر الممتص في الضاغط إلى حجم المسح ويعطى بالعلاقة

$$\eta_{vol} = \frac{V_{FAD}}{V_s} = \frac{V_a}{V_s} \qquad (16\text{-}2)$$

(V_{FAD}) هو حجم الهواء الحر الممتص *Free Air Delivery (FAD)* والذي يعرف إلى أنه حجم الهواء الممتص تحت شروط الهواء الحر. شروط الهواء الحر هي [$1\ atm, 15℃$ 1]. تم اختيار شروط الهواء الحر لمقارنة المردود الحجمي للضواغط الترددية عند شروط موحدة. باستخدام معادلة الغاز المثالي نجد حجم الهواء الحر الممتص بالعلاقة

$$\frac{P_a * V_a}{T_a} = \frac{P_1 * (V_1 - V_4)}{T_1} = \frac{P_2 * (V_2 - V_3)}{T_2}$$

وبالتالي فإن حجم الهواء الحر الممتص لدورة واحدة (شوط واحد) يعطى بالعلاقة

$$V_a = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1}(V_1 - V_4) \qquad (17\text{-}2)$$

أما حجم المسح فيعرف بالفرق بين الحجم في الحالة (1) والحجم عند الحالة (3) كما في العلاقة

$$V_s = V_1 - V_3 \qquad (18\text{-}2)$$

بتعويض المعادلة (17−2) و (18−2) في معادلة المردود الحجمي نجد أن

$$\eta_{vol} = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1}\frac{(V_1 - V_4)}{(V_1 - V_3)}$$

ولكن

$$V_1 = V_c + V_s$$

$$V_3 = V_c$$

حيث (V_c) حجم الخلوص و بالتعويض نجد

$$\eta_{vol} = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1} * \left\{1 + \frac{V_c}{V_s} - \frac{V_4}{V_s}\right\}$$

بضرب وتقسيم النسبة (V_4/V_s) بحجم الخلوص نجد

$$\frac{V_4}{V_s} = \frac{V_c}{V_s} * \frac{V_4}{V_c}$$

$$\frac{V_4}{V_s} = \left(\frac{1}{r_v}\right) * \frac{V_4}{V_c}$$

ولكن العملية بين $(4 \rightarrow 3)$ عملية بوليتروبية

$$\frac{V_4}{V_c} = \frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{1/n} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/n}$$

تتحول معادلة المردود الحجمي إلى

$$\eta_{vol} = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1} * \left\{1 + \frac{1}{r_v} - \frac{1}{r_v}\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/n}\right\}$$

ويمكن كتابتها بالشكل

$$\eta_{vol} = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1} * \left\{1 + \frac{1}{r_v} - \frac{1}{r_v}\left(r_p\right)^{1/n}\right\} \qquad (19\text{-}2)$$

تعتمد قيمة المردود الحجمي على درجة حرارة وضغط المحيط (P_a, T_a) ودرجة حرارة وضغط الامتصاص (P_1, T_1) ونسبة الانضغاط (r_v) وضغط التفريغ (P_2) وبالتالي نسبة الضغط(r_p) ويزداد المردود الحجمي بتناقص نسبة الضغط (P_2/P_1). تتراوح قيم المردود الحجمي بين 60% و 90% عملياً.

المثال التطبيقي 2-4 – ضاغط ترددي مع حجم خلوص.

ضاغط ترددي بمرحلة واحدة يعطي تدفق $(10\ m^3/min)$ عند شروط الهواء الحر التالية $[P_a = 1\ bar, T_a = 27°C]$ وبنسبة ضغط $[r_p = 7]$. الشروط عند نهاية عملية الامتصاص هي $[P_1 = 0.97\ bar, T_1 = 35°C]$. يدرو الضاغط بسرعة $[240\ RPM]$ بحجم خلوص قدره 5% من حجم المسح. باعتبار أن نسبة طول الشوط إلى قطر الأسطوانة هي $[L/D = 1.2]$ أوجد 1) المردود الحجمي 2) أبعاد الأسطوانة و3) المردود الإيزوثرمي للضاغط باعتبار أن عملية الانضغاط هي عملية بوليتروبية بعامل $[n = 1.25]$.

الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء الذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: يحسب المردود الحجمي من العلاقة

$$\eta_{vol} = \frac{V_{FAD}}{V_s} = \frac{V_a}{V_s}$$

$$V_a = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1}(V_1 - V_4)$$

شروط الهواء الحر هي $(T_a = 300K)$ والضغط $(P_a = 100\ kPa)$. الحجم (V_1) يحسب من حجم المسح

$$V_s = V_1 - V_3$$

ولكن حجم الخلوص هو

$$V_c = V_3 = 0.05 * V_s$$

أي أن

$$V_1 = 1.05\ V_s$$

الحجم V_4 يحسب من عملية التمدد البوليتروبية ($3 \rightarrow 4$) بالشكل

$$\frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{1/n} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/n}$$

$$V_4 = V_3 * \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/n}$$

$$V_4 = 0.05V_s * (7)^{\frac{1}{1.25}}$$

$$V_4 = 0.273\, V_s$$

بالتعويض نجد أن

$$V_a = \frac{0.97 * 300 * (1.05\, V_s - 0.273\, V_s)}{1 * 308}$$

$$V_a = 0.768\, V_s$$

بالتعويض في المردود الحجمي نجد أن

$$\eta_{vol} = \frac{0.768\, V_s}{V_s} = 0.768\ or\ 76.8\%$$

أبعاد الأسطوانة تحسب من التدفق الحجمي لدورة واحدة من العلاقة

$$V = \dot{V}/N$$

$$V = 10\frac{m^3}{min} * \frac{1}{240}\frac{min}{cycle}$$

$$V = 0.04166\, m^3 per\ cycle$$

حجم المسح يساوي حجم الأسطوانة في الدورة

$$0.04166m^3 = \left[\frac{\pi}{4} * (D\ m)^2 * (L\ m)\right]$$

بما أن $[L/D = 1.2]$ أي $[L = 1.2D]$

$$0.04166m^3 = \left[\frac{\pi}{4} * (D\ m)^2 * (1.2D\ m)\right]$$

$$D = 0.3536\ m = 35.36\ cm$$

المردود الإيزوثرمي يحسب من العلاقة

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,poly}}$$

العمل الإيزوثرمي يحسب من العلاقة

$$W_{c,isoth} = P_1 V_1 ln(r_p) = \dot{m} * R * T_1 * ln(r_p)$$

التدفق الكتلي يحسب من علاقة الغاز المثالي

$$\dot{m} = \frac{P_1 \dot{V}_1}{RT_1}$$

$$\dot{m} = \frac{100kPa * 10m^3/min}{0.287\ \frac{kJ}{kgK} * 300K}$$

$$\dot{m} = 23.23\ kg/min$$

بالتعويض نجد أن

$$W_{c,isoth} = \dot{m} R T_1 ln(r_p)$$

$$W_{c,isoth} = 23.23 \frac{kg}{min} * 0.287 \frac{kJ}{kgK} * 308K * ln7$$

$$W_{c,isoth} = 3995.81 \frac{kJ}{min} = 66.597\ kW$$

العمل البوليتروبي يحسب من العلاقة

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * \dot{m} * R * (T_2 - T_1)$$

تحسب T_2 من عملية الانضغاط البوليتروبية بالشكل

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{n-1/n}$$

$$T_2 = 300K * (7)^{0.25/1.25}$$

$$T_2 = 454.54\ K$$

$$W_{c,poly} = \frac{1.25}{0.25} * 23.23\frac{kg}{min} * 0.287\frac{kJ}{kgK} * (454.54 - 308)K$$

$$W_{c,poly} = 4884.917\frac{kJ}{min} = 81.415\ kW$$

المردود الإيزوثرمي هو

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,poly}}$$

$$\eta_{c,isoth} = \frac{66.597}{81.415} = 0.81799\ or\ 81.799\%$$

المثال التطبيقي 25 – ضاغط ترددي مع حجم خلوص وشروط مختلفة.

ضاغط ترددي هوائي بمرحلة واحدة يعطي $(5\ m^3/min)$ عند شروط الهواء الحر التالية $[P_a = 1.02\ bar, T_a = 27℃]$ يدرو الضاغط بسرعة $[200\ RPM]$ وبحجم خلوص قدره 5% من حجم المسح. يفرغ الهواء بضغط $[P_2 = 8\ bar]$ بعملية انضغاط بوليتروبي ذي عامل $[n = 1.3]$. تزداد درجة حرارة الهواء خلال عملية الامتصاص بمقدار $(\Delta T =$ 10℃). يظهر انخفاض في الضغط عند الامتصاص بمقدار $[\Delta P = 0.03\ bar]$ وانخفاض بالضغط عند التفريغ بمقدار $[\Delta P = 0.05\ bar]$. حدد المردود الحجمي واستطاعة الضاغط.

الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء والذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: يحسب المردود الحجمي من العلاقة

$$\eta_{vol} = \frac{V_{FAD}}{V_s} = \frac{V_a}{V_s}$$

أو من العلاقة

$$\eta_{vol} = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1} * \left\{1 + \frac{1}{r_v} - \frac{1}{r_v}\left(r_p\right)^{1/n}\right\}$$

شروط الهواء الحر هي $(T_a = 300K)$ والضغط $(P_a = 102\ kPa)$ وشروط الامتصاص هي $(T_1 = 310K)$ والضغط $(P_1 = 102 - 3 = 99\ kPa)$ وشروط التفريغ هي ذات ضغط $(P_2 = 800 + 5 = 805\ kPa)$.

$$1/r_v = V_c/V_s$$

$$1/r_v = 0.05V_s/V_s$$

$$1/r_v = 0.05$$

بالتعويض نجد أن

$$\eta_{vol} = \frac{300K}{102kPa} * \frac{99kPa}{310} * \left\{1 + 0.05 - 0.05\left(\frac{805}{99}\right)^{1/1.3}\right\}$$

$$\eta_{vol} = 0.75079\ or\ 75.079\%$$

يحسب عمل الضاغط في العملية البوليتروبية بالشكل

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * P_1V_1\left[\left(r_p\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

الحجم عند الامتصاص يحسب من علاقة الغاز المثالي

$$\frac{P_1\dot{V}_1}{T_1} = \frac{P_a\dot{V}_a}{T_a}$$

$$V_1 = \frac{P_a \dot{V}_a}{T_a} * \frac{T_1}{P_1}$$

$$\dot{V}_1 = \frac{102kPa * 5m^3/min}{300K} * \frac{310K}{99kPa}$$

$$\dot{V}_1 = 5.3232\ m^3/min$$

أو

$$V_1 = \dot{V}_1/N$$

$$V_1 = \left(\frac{102kPa * 5m^3/min}{300K}\right) * \frac{310K}{99kPa} * \left(\frac{1\ min}{200\ cycle}\right)$$

$$V_1 = 0.0266m^3$$

بالتعويض نجد أن العمل يساوي

$$W_{c,poly} = \frac{1.3}{1.3-1} * 99kPa * \left(5.3232\frac{m^3}{60\ s}\right) * \left(\left(\frac{805}{99}\right)^{\frac{1.3-1}{1.3}} - 1\right)$$

$$W_{c,poly} = 23.672\ kW$$

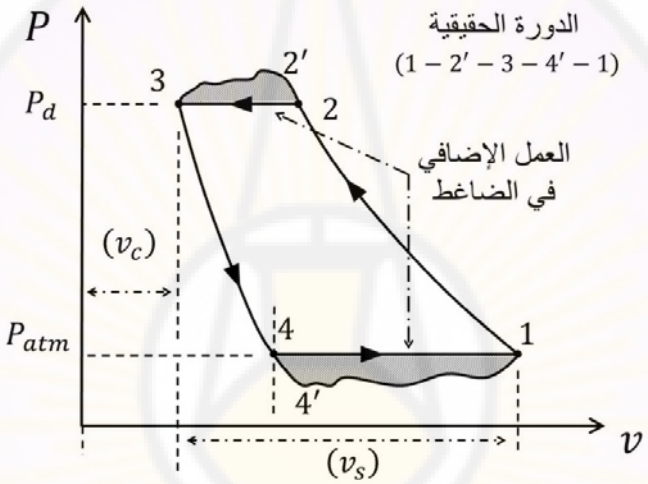
تحسب استطاعة الضاغط من العلاقة

$$HP_{c,poly} = \frac{23.672\ kW}{0.7457\ kW/hp} = 31.744\ hp$$

6.2 المقارنة بين الدورة المثالية والدورة الحقيقية للضاغط الترددي.

يبين الشكل (2−14) المقارنة بين الدورة الحقيقية $(1-2'-3-4'-1)$ والدورة المثالية للضاغط الترددي $(1-4-3-2-1)$. في الدورة الحقيقية تنتهي عملية الضغط $(2 \rightarrow 1)$ عند النقطة (2) وعندها يجب على صمام التفريغ أن يفتح بشكل تلقائي لتفريغ وسيط التشغيل ولكن هذا لايحدث في الدورة الحقيقية لذلك تستمر

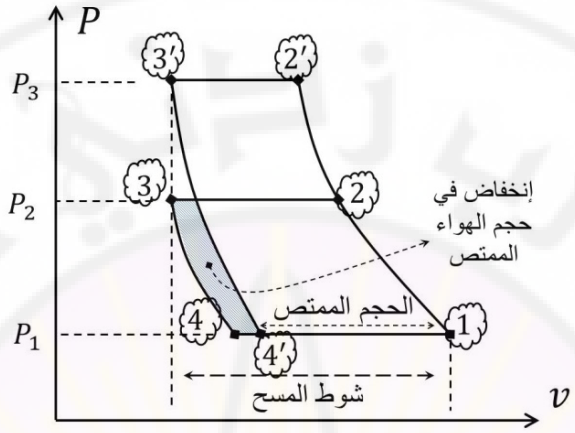
عملية الانضغاط إلى النقطة $(2')$ ويؤدي ذلك إلى زيادة العمل المطلوب كما هو ظاهر بالمنطقة المهشرة في الشكل $(3 - 2' - 2)$. أيضاً تنتهي عملية التمدد $(4 \rightarrow 3)$ عند النقطة (4) وعندها يجب على صمام السحب أن يفتح بشكل تلقائي لسحب وسيط التشغيل الجديد في العملية $(1 \rightarrow 4)$ من أجل ضغطه ولكن هذا لايحدث لذلك تستمر عملية التمدد إلى النقطة $(4')$.



الشكل (14–2) المقارنة بين الدورة الحقيقية والمثالية للضاغط الترددي.

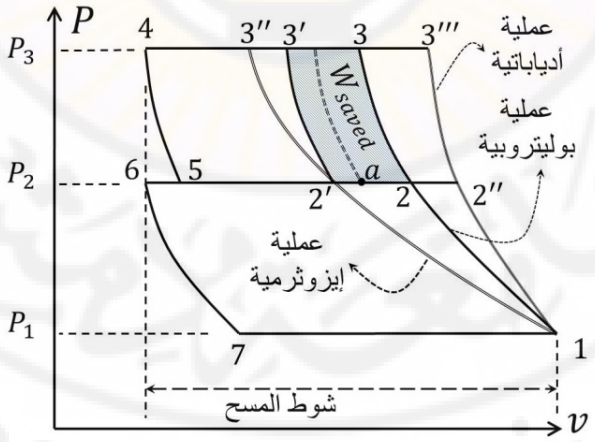
7.2 الضواغط الترددية المتعددة المراحل *Multistage Compression*.

إن الهدف الرئيسي من استخدام الضواغط الترددية المتعددة المراحل هو رفع ضغط التفريغ والتخلص من تناقص المردود الحجمي. يبين الشكل (15–2) إرتفاع ضغط التفريغ من $(P_2 \rightarrow P_3)$ عند الإنتقال من الضاغط $(1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1)$ إلى الضاغط $(1 \rightarrow 2' \rightarrow 3' \rightarrow 4' \rightarrow 1)$ وتناقص المردود الحجمي نتيجة إنخفض حجم الإمتصاص من $(4 \rightarrow 1)$ إلى $(4' - 1)$.



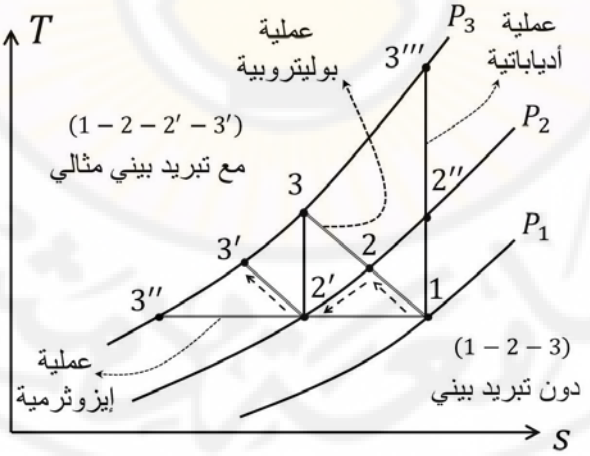
الشكل (15–2) زيادة ضغط التفريغ من الحالة (2) إلى $(2')$.

يبين الشكل (16–2) ضاغطاً ترددياً بمرحلتين فقط مع تبريد بيني مثالي *Ideal Intercooling*. المرحلة الأولى في الضاغط الترددي تسمى بمرحلة الضغط المنخفض*Low Pressure Stage (LP)* وتسمى المرحلة الثانية بمرحلة الضغط العالي *High Pressure Stage (HP)*.



الشكل (16–2) التبريد البيني في ضاغط ترددي بمرحلتين فقط على مخطط $(P-v)$

تمثل المرحلة الأولى في الشكل (2-16) ذات الضغط المنخفض (LP) على مخطط ($P-v$) بالدورة ($1-7-6-2-1$) حيث أن حجم الخلوص لهذا الضاغط يمثل بالخط الأفقي ($7-6$) وتمثل المرحلة الثانية ذات الضغط العالي (HP) على مخطط ($P-v$) بالدورة ($2-5-4-3-2$) حيث أن حجم الخلوص لهذا الضاغط يمثل بالخط الأفقي ($5-6$) ومن دون تبريد بيني بين الضواغط. يسبب التبريد البيني المثالي بين المرحلتين انخفاض درجة حرارة الهواء الخارج في المرحلة الأولى من النقطة (2) إلى النقطة ($2'$) ذات الضغط الثابت (P_2) والتي تقع على خط عملية الانضغاط الإيزوثرمي ($3''-2'-1$). عندما يعود الهواء المضغوط الخارج من المرحلة الأولى ويدخل إلى المرحلة الثانية فإنه ينضغط عبر العملية البوليتروبية ($3'-2'$) ويخرج عند النقطة ($3'$) بدلاً من خروجه من دون تبريد بيني مثالي عند النقطة (3) أي أن عملية التبريد البيني المثالي قد أدت إلى تخفيض في العمل المستهلك بمقدار المساحة المهشرة المبينة في ($2-3-3'-2'-2$). إذا كان التبريد البيني غير مثالي أي تمت عملية تبريد الهواء إلى نقطة **أعلى** من ($2'$) كما في النقطة (a) فإن المساحة السابقة تنخفض.



الشكل (2-17) التبريد البيني في ضاغط ترددي بمرحلتين فقط على مخطط ($T-s$)

يبين الشكل (17–2) التبريد البيني المثالي على مخطط $(T-s)$. عملية الانضغاط المثالي من دون تبريد بيني مثالي وبمرحلة واحدة هي $(3-2-1)$ أما عملية الانضغاط المثالي بمرحلتين مع تبريد بيني مثالي هي $(3'-2'-2-1)$. الفرضيات المستخدمة في إيجاد الشكل الرياضي للعمل هي

- ✓ لا يوجد انخفاض في الضغط في عملية التفريغ والامتصاص.
- ✓ الضغوط تبقى ثابتة في كل المراحل.
- ✓ التبريد البيني هو تبريد مثالي أي يبرد الهواء الخارج من الضاغط في أي مرحلة إلى درجة حرارة المحيط (العملية الإيزوثرمية).
- ✓ الكتلة ثابتة ومتساوية في كل مرحلة.
- ✓ الهواء غاز مثالي.

يعطى العمل في المرحلة الأولى ذات الضغط المنخفض بالعلاقة

$$W_{LP} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (kJ)$$

يعطى العمل في المرحلة الثانية ذات الضغط المرتفع حيث $(P_2 = P_{2'})$ بالعلاقة

$$W_{HP} = \frac{n}{n-1} * P_2 V_{2'} \left(\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (kJ)$$

من أجل **تبريد بيني مثالي** بين المرحلتين ولأن النقاط تقع على العملية الإيزوثرمية واحدة كما في الشكل (17–2) فيكون

$$P_1 V_1 = P_2 V_{2'} = P_3 V_{3''}$$

بالتعويض في علاقة عمل المرحلة الثانية للضاغط

$$W_{HP} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

العمل الكلي للضاغط يساوي مجموع الأعمال للمرحلة الأولى والثانية

$$W_c = W_{LP} + W_{HP}$$

$$W_c = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) + \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

بالعمل على ترتيب الحدود نجد أن العمل الكلي يساوي

$$W_c = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right) \qquad (20\text{-}2)$$

من أجل إيجاد قيمة الضغط الأوسط (P_2) والمناسب للحصول على أقل عمل ممكن في ضاغط ترددي بمرحلتين، نأخذ مشتق العمل الكلي في المعادلة $(20-2)$ بالنسبة إلى الضغط(P_2) ونساويه بالصفر فنجد الحل التالي

$$P_2 = \sqrt{P_1 * P_3} \qquad (21\text{-}2)$$

تبين المعادلة $(21-2)$ أن الضغط المتوسط بين المرحلتين الأولى والثانية في الضاغط الترددي والذي يحقق العمل الأصغري للضاغط يساوي جذر جداء ضغط الامتصاص (P_1) وضغط التفريغ (P_3). يمكن كتابة العلاقة السابقة بالشكل

$$P_2^2 = P_1 * P_3$$

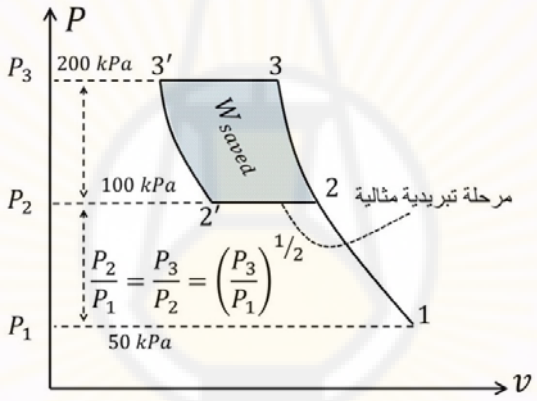
أو

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} = const \qquad (22\text{-}2)$$

تقول المعادلة (2–22) إنه يمكننا أن نحصل على العمل الأصغري في ضاغط ترددي بمرحلتين عندما تكون نسب الضغوط متساوية بين مراحل الضاغط كما هو واضح في الشكل (2–18). بتعويض الضغط (P_2) بحسب المعادلة (2–21) في المعادلة (2–22) نجد نسبة الضغط في المرحلة الأولى تساوي جذر نسبة الضغط الكلي للضاغط الترددي.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_3}{P_1}\right)^{1/2} \qquad (23\text{-}2)$$

وبالتالي يمكن أن نحصل على العمل الأصغري مع الأخذ بعين الاعتبار أن الضغط المتوسط يحقق المعادلة (2–23) يعطى بالشكل



الشكل (2–18) العمل الأصغري لضاغط بمرحلتين.

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(2\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 2\right)$$

$$W_{c,min} = 2 * \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 * \left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right)$$

بإستخدام العلاقة (2–23) في العلاقة السابقة نجد أن العمل الكلي يساوي

$$W_{c,min} = 2 * \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 * \left(\left(\frac{\boldsymbol{P_3}}{\boldsymbol{P_1}} \right)^{\frac{n-1}{2*n}} - 1 \right)$$

بمقارنة عمل ضاغط بمرحلتين مع ضاغط بمرحلة واحد نجد أن **نسبة الضغط العامة** *General Pressure Ratio* تتجول إلى الشكل التالي

$$\left(\frac{\boldsymbol{P_{i+1}}}{\boldsymbol{P_1}} \right)^{\boldsymbol{1/i}} \qquad (24\text{-}2)$$

لضاغط متعدد المراحل (i) وضغط تفريغ (P_{i+1}) وضغط إمتصاص (P_1). نجد أيضاً من العلاقة (24−2) أن نسب الضغوط المثلى تكون كما يلي

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_4}{P_3} = \cdots = \frac{P_{i+1}}{P_i} = const = \left(\frac{P_{i+1}}{P_1} \right)^{1/i}$$

تؤدي هذه العلاقة إلى تساوي الضغوط في كل مرحلة من مراحل الضاغط المتعدد المراحل أي

$$W_c = W_1 = W_2 = \cdots = W_i$$

$$W_{c,min} = \sum_{1}^{i} W_i$$

وإذا كانت عمليات الانضغاط بوليتروبية بين مراحل الضاغط الترددي فإن

$$\left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \frac{T_{i+1}}{T_i}$$

فتصبح نسبة الضغوط المثلى هي

$$\left(\frac{P_{i+1}}{P_1} \right)^{\frac{1}{i}} = \left(\frac{T_{i+1}}{T_1} \right)^{\frac{n}{i*(n-1)}} \qquad (25\text{-}2)$$

في التبريد البيني المثالي وعلى خط عملية الانضغاط الإيزوثرمية تكون

$$P_1V_1 = P_2V_{2'} = P_3V_{3'} = \cdots = P_{(i)}V_{(i)'}$$

فيكون العمل الأصغري الذي يمكن صرفه على الضاغط الترددي المتعدد المراحل بالشكل

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1} * P_1V_1\left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \cdots \ldots . + \left(\frac{P_{i+1}}{P_i}\right)^{\frac{n-1}{n}} - i\right)$$

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1} * P_1V_1\left(i * \left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{i*n}} - i\right)$$

وبالتالي

$$W_{c,min} = i * \frac{n}{n-1} * P_1V_1\left(\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{i*n}} - 1\right) \quad (kJ) \qquad (26\text{-}2)$$

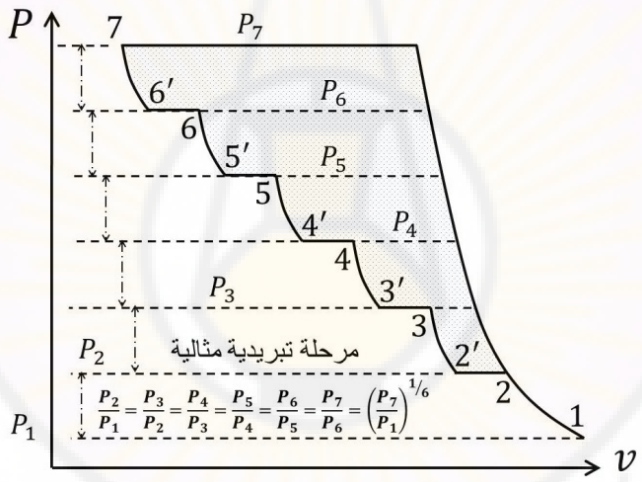
لأي مرحلة من مراحل الضاغط بالنسبة إلى نسبة الضغط العامة يعطى العمل الأصغري بالعلاقة

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1} * P_1V_1\left(\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{i*n}} - 1\right) \quad (kJ) \qquad (a\text{-}27\text{-}2)$$

أو للمرحلة نفسها بالشكل

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1} * P_i V_i \left(\left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (kJ) \qquad \text{(b-27-2)}$$

نلاحظ أن الأعمال متساوية بين مراحل الضاغط عندما يكون التبريد البيني مثالي فمثلاً إذا كان لدينا ضاغط ترددي بست مراحل $(i = 6)$ كما هو في الشكل (19−2) حيث تدل المنطقة المهشرة إلى العمل المسترجع.



الشكل (19−2) العمل الأصغري لضاغط بعدة مراحل.

تكون نسبة الضغط المثلى

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_4}{P_3} = \frac{P_5}{P_4} = \frac{P_6}{P_5} = \frac{P_7}{P_6} = \frac{P_{i+1}}{P_i} = \left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{1/i} = \left(\frac{P_7}{P_1}\right)^{1/6}$$

والعمل الأصغري للضاغط

$$W_{c,min} = 6 * \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_7}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{6*n}} - 1 \right)$$

والعمل الأصغري **في المرحلة الثالثة فقط** يحسب من لمعادلة (27−2) كما يلي

$$W_{c,3,min} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_7}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{6*n}} - 1 \right)$$

أو

$$W_{c,3,min} = \frac{n}{n-1} * P_3 V_{3'} \left(\left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

والعمل الأعظمي **في المرحلة الخامسة فقط** يحسب من العلاقة (27−2) كما يلي

$$W_{c,5,min} = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_7}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{6*n}} - 1 \right)$$

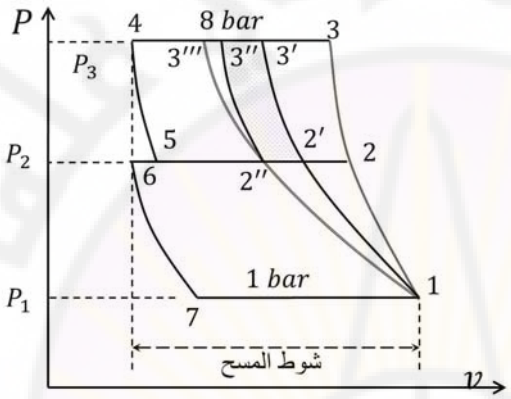
أو

$$W_{c,5,min} = \frac{n}{n-1} * P_5 V_{5'} \left(\left(\frac{P_6}{P_5} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_6}{P_5} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

المثال التطبيقي 2−6 – ضاغط ترددي بمرحلتين.

ضاغط ترددي هوائي بمرحلتين وتبريد بيني مثالي بين المراحل. يضغط الهواء ذات الشروط $[P_1 = 1\ bar, T_1 = 27℃]$ وبتدفق $(4\ m^3/min)$ إلى ضغط $[P_3 = 8\ bar]$ بعملية انضغاط بوليتروبي ذات عامل بوليتروبي وقدره $[n = 1.2]$ قارن 1) عمل

الضاغط هذا بضاغط ذي مرحلة واحدة و2) العمل المثالي مع العمل غير المثالي (تبريد بيني غير مثالي) عند درجة حرارة ($T = 30℃$).



الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء والذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: يبين الشكل المرافق العمليات على الضاغط كما يلي:

العملية $(1-2-3)$عملية بوليتروبية دون تبريد مثالي.

العملية $(1-2-2'-3')$ هي عملية انضغاط بمرحلتين وتبريد بيني غير مثالي.

العملية $(1-2-2''-3'')$ هي عملية انضغاط بمرحلتين وتبريد بيني مثالي.

العملية $(1-2''-3''')$ هي عملية انضغاط إيزوثرمي.

يحسب العمل في العملية البوليتروبية $(1-2-3)$ ومن دون تبريد مثالي كما يلي

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * P_1\dot{V}_1\left(\left(\frac{P_3}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right)$$

$$W_{c,poly} = \frac{1.2}{0.2} * 100kPa * 4\frac{m^3}{min}\left(\left(\frac{8}{1}\right)^{\frac{0.2}{1.2}} - 1\right)$$

$$W_{c,poly} = 994.113\frac{kJ}{min} = \mathbf{22.22\ hp}$$

نسبة الضغط الأمثل لضاغط بمرحلتين يعطى بالعلاقة

$$\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{1}{i}}$$

حيث $(i = 2)$ وبالتالي

$$P_2 = \left(\frac{P_3}{P_1}\right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{8} = 2.83\ bar$$

أي أن الضغط الأول وهو ضغط الامتصاص (سحب) هو $(1\ bar)$ والضغط الثاني وهو التفريغ للمرحلة الأول والامتصاص للمرحلة الثانية $(2.83\ bar)$ والضغط الثالث وهو التفريغ للمرحلة الثانية $(8\ bar)$ يحسب العمل في ضاغط بمرحلتين وتبريد بيني مثالي من العلاقة

$$W_{c\,(1-2-2''-3'')} = i * \frac{n}{n-1} * P_1\dot{V}_1\left(\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n*i}} - 1\right)$$

$$W_{c\,(1-2-2''-3'')} = 2 * \frac{1.2}{0.2} * 100kPa * 4\frac{m^3}{min} * \left(\left(\frac{8}{1}\right)^{\frac{0.2}{2*1.2}} - 1\right)$$

$$W_{c\,(1-2-2''-3'')} = 908.19\frac{kJ}{min}$$

$$W_{c\,(1-2-2''-3'')} = \mathbf{20.29}\ hp$$

يحسب العمل في ضاغط بمرحلتين وتبريد بيني غير مثالي من العلاقة

$$W_{c\,(1-2-2'-3')} = W_{LP(1-2)} + W_{HP(2'-3')}$$

$$W_{c\,(1-2-2'-3')} = \left(\frac{n}{n-1} * P_1V_1\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]\right) + \left(\frac{n}{n-1} * P_2V_{2'}\left[\left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]\right)$$

يحسب الحجم في المرحلة الثانية بعلاقة الغاز المثالي بالشكل

$$\frac{P_1\dot{V}_1}{T_1} = \frac{P_{2'}\dot{V}_{2'}}{T_{2'}}$$

$$\dot{V}_{2'} = \frac{P_1\dot{V}_1}{T_1} * \frac{T_{2'}}{P_2}$$

$$\dot{V}_{2'} = \frac{100kPa * 4m^3/min}{300K} * \frac{(273+30)K}{283kPa}$$

$$\dot{V}_{2'} = 1.43\ m^3/min$$

بالتعويض نجد أن

$$W_{c\,(1-2-2'-3')} = \left(\frac{1.2}{0.2} * 100 * 4\frac{m^3}{min}\left(\left(\frac{283}{100}\right)^{\frac{0.2}{1.2}} - 1\right)\right) + \left(\frac{1.2}{0.2} * 283 * 1.43\frac{m^3}{min}\left(\left(\frac{800}{283}\right)^{\frac{0.2}{1.2}} - 1\right)\right)$$

$$W_{c\,(1-2-2'-3')} = 454.3 + 459.2 = 913.5\frac{kJ}{min} = \mathbf{20.42}\ hp$$

الادخار في الطاقة باستخدام مرحلتين بتبريد بيني مثالي بدلاً من مرحلة واحدة هو

$$\frac{22.22\ hp - 20.29\ \ hp}{22.22\ hp} = 8.686\ \%$$

الفرق بين الانضغاط بمرحلتين بتبريد بيني مثالي وغير مثالي

$$\frac{20.42\ hp - 20.29\ hp}{20.42\ hp} = 0.636\ \%$$

المثال التطبيقي 2−7 – ضاغط ترددي بأربع مراحل.

ضاغط ترددي هوائي بأربع مراحل وتبريد بيني مثالي. الشروط ابتدائية للهواء قبل عملية الانضغاط هي $[P_1 = 1bar, T_1 = 27°C]$. تدفق الضاغط $(2\ m^3/min)$ ضغط تفريغ الهواء هو $[P_5 = 150\ bar]$ عملية انضغاط هي عملية بوليتروبي ذات عامل بوليتروبي $[n = 1.25]$ حدد الضغوط المثلى بين المراحل والعمل اللازم للضاغط.

الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء والذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: نسبة الضغط الأمثل هي

$$\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{1}{i}} = \left(\frac{P_5}{P_1}\right)^{\frac{1}{4}} = 3.5$$

أي أن نسب الضغوط

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_4}{P_3} = \frac{P_5}{P_4} = 3.5$$

ضغط الامتصاص (سحب) $[P_1 = 1\ bar]$، الضغط بين المرحلة الأولى والمرحلة الثانية هو

$$\frac{P_2}{P_1} = 3.5$$

$$P_2 = P_{2'} = 3.5 = bar$$

الضغط بين المرحلة الثانية والمرحلة الثالثة هو

$$\frac{P_3}{P_2} = 3.5$$

$$P_3 = 3.5 * 3.5$$

$$P_3 = P_{3'} = 12.25\ bar$$

الضغط بين المرحلة الثالثة والرابعة هو

$$\frac{P_3}{P_2} = 3.5$$

$$P_3 = 12.25 * 3.5$$

$$P_3 = P_{3'} = 42.875\ bar$$

ضغط التفريغ $[P_5 = 150\ bar]$ وبالتالي فإن قيم الضغوط تكون بالشكل

$$P_1 = 1\ bar$$

$$P_2 = P_{2'} = 3.5\ bar$$

$$P_3 = P_{3'} = 12.25\ bar$$

$$P_4 = P_{4'} = 42.87\ bar$$

$$P_5 = 150\ bar$$

يحسب العمل الأصغري بالعلاقة

$$W_{c,min} = W_I + W_{II} + W_{III} + W_{IV}$$

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1}\left(P_1V_1\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right] + P_2V_{2'}\left[\left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right] + P_3V_{3'}\left[\left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right] + P_4V_{4'}\left[\left(\frac{P_5}{P_4}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]\right)$$

ولكن

$$P_1V_1 = P_2V_{2'} = P_3V_{3'} = P_4V_{4'}$$

لأن عملية التبريد البيني مثالية وكافة النقاط تقع على خط العملية الإيزوثرمية أي

$$W_{c,min} = \frac{n}{n-1}P_1V_1\left(\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{P_5}{P_4}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 4\right]\right)$$

وبما أن الضغوط متساوية

$$W_{c,min} = 4 * \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left(\left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \right)$$

يمكن أن نبدل

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_5}{P_1} \right)^{\frac{1}{4}}$$

نجد علاقة العملية الأصغري بالشكل

$$W_{c,min} = 4 * \frac{n}{n-1} \left(P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_5}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{4*n}} - 1 \right] \right)$$

$$W_{c,min} = 4 * \frac{1.25}{0.25} * 100kPa * 2\frac{m^3}{min} * \left[(3.5)^{\frac{0.25}{1.25*4}} - 1 \right]$$

$$W_{c,min} = 258.566\ kJ/min$$

مناقشة: العمل في المرحلة الثالثة هو

$$W_{c,3,min} = \frac{n}{n-1} P_3 V_{3'} \left(\left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

وبتبديل

$$\frac{P_4}{P_3} = \left(\frac{P_5}{P_1} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$P_1 V_1 = P_3 V_{3'}$$

نجد أن

$$W_{c,3,min} = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_5}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{4*n}} - 1 \right)$$

بالتعويض نجد العمل الأصغري للمرحلة الثالثة هي

$$W_{c,3,min} = \frac{1.25}{0.25} * 100kPa * 2\frac{m^3}{min} * \left[(3.5)^{\frac{0.25}{1.25*4}} - 1\right]$$

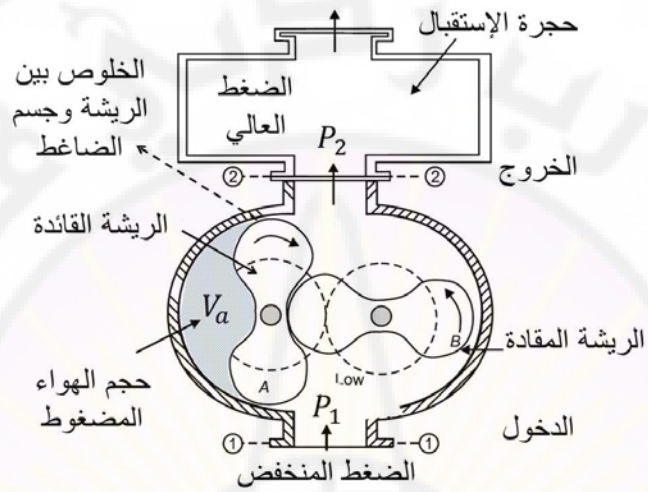
$$W_{c,3,min} = 64.6415\frac{kJ}{min} = \frac{W_{c,min}}{4}$$

نلاحظ أن العمل الأصغري لكل مرحلة من مراحل الضاغط له القيمة نفسها أي أن الأعمال متساوية لذلك يكفي أن نجد أي عمل أصغري لأية مرحلة فقط.

7.2 ترموديناميك الضواغط الدورانية *Rotary Compressors*.

الضواغط الدورانية هي الضواغط التي تقوم بفعل عملية الضغط بواسطة حركة دورانية وبسرعة عالية قد تصل إلى $(40{,}000\ RPM)$. تقوم الضواغط الدورانية بتسليم كمية كبيرة من الهواء قد تصل إلى $(FAD = 3000\ m^3/min)$ وبضغوط تفريغ قد تصل إلى $(10\ bar)$. نلاحظ أن الضواغط الدورانية تعطي تدفقات كبيرة ومستمرة وبضغوط صغيرة نسبياً بالمقارنة مع الضواغط الترددية. يمكن أن نصنف الضواغط الدورانية بحسب تدفق وسيط التشغيل فقد تكون ذات إزاحة إيجابية (تدفق غير مستمر) أو تكون ذات تدفق مستمر كما في الشكل (1−2) السابق. الضواغط الدورانية ذات الإزاحة الإيجابية (ذات تدفق غير مستمر) هي الضواغط ذات الريش المستقيمة *Roots Blower* أو تسمى أيضاً *Straight Lobe Compressors* والضواغط ذات الريش المنزلقة *Vane Type* والضواغط الحلزونية *Screw Type or Helical Type*. أما الضواغط الدورانية ذات التدفقات المستمرة فهي الضواغط النابذية *Centrifugal Type* والضواغط المحورية *Axial Type*.

1.7.2الضواغط ذات الريش المستقيمة.



الشكل (20−2) الشكل التفصيلي للضواغط ذات الريش المستقيمة والخلوص بين الريشة وجسم الضاغط.

يبين الشكل (20−2) الشكل التفصيلي للضواغط ذات الريشتين المستقيمتين. يتألف هذا الضاغط من ريشة قائدة (A) وريشة مقادة (B) يقسمان الضاغط إلى حجرتين ذات ضغط مرتفع ومنخفض. يدخل الهواء الحر ويحتجز بين الريشة (A) القائدة وجسم الضاغط بحجم قدره (V) كما هو واضح بالشكل ويرفع ضغطه من (P_1) نتيجة حركة الريشة (A) مع عقارب الساعة إلى الضغط (P_2). حجم الهواء المسلم في دورة واحدة هو أربع مرات الحجم (V) عندما يكون هناك ريشتان فقط أما إذا كان عدد الريش ثلاثة فحجم الهواء الحر المسلم يصبح 6 مرات. يعطى مردود الضاغط ذي الريش المستقيمة بالنسبة بين العمل الإيزونتروبي إلى العمل الحقيقي أي أن

$$\eta_{Roots} = \frac{W_{isen}}{W_a} \qquad (28\text{-}2)$$

يحسب العمل الحقيقي للضاغط ذي الريش المستقيمة ذات الحجم الثابت (V) من المعادلة

$$W = (P_2 - P_1) * V_a$$

العمل في دورة واحدة يكون

$$W_a = W_{revo} = (P_2 - P_1) * (4V_a)$$

باعتبار أن $(V_{roots} = 4V_a)$ يمكن كتابة العلاقة السابقة بالشكل

$$W_a = W_{revo} = (P_2 - P_1) * V_{roots}$$

أي أن

$$W_a = W_{revo} = P_1 \left(\frac{P_2}{P_1} - 1\right) V_{roots} \quad (kJ) \qquad (29\text{-}2)$$

العمل الإيزونتروبي (أدياباتي عكوس) للضاغط ذي الريش المستقيمة

$$W_{isen} = \frac{k}{k-1} P_1 * V_{roots} \left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad (kJ) \qquad (30\text{-}2)$$

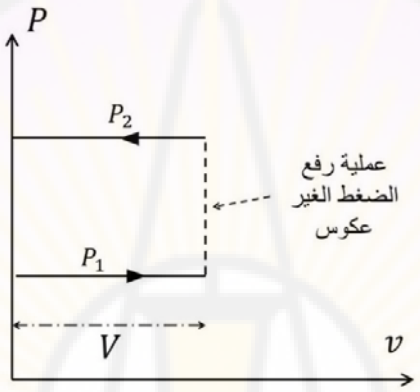
حيث أن (k) وهو العامل الأدياباتي، بالتعويض في علاقة مردود الضاغط نجد أن

$$\eta_{Roots} = \frac{\frac{k}{k-1} P_1 * V_{roots} \left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{P_1 \left(\frac{P_2}{P_1} - 1\right) V_{roots}}$$

بأخذ نسبة الضغط $(r_P = P_2/P_1)$ نجد أن المردود يتحول إلى

$$\eta_{Roots} = \frac{k}{k-1}\frac{\left((r_P)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)}{(r_P - 1)} \qquad (31\text{-}2)$$

نلاحظ أن المردود ينخفض مع زيادة نسبة الضغط ويرتفع عند انحفاظها والسبب في ذلك الخلوص الموجود بين الريشة وجسم الضاغط كما هو واضح في الشكل (21−2).



الشكل (21−2) العملية في الضاغط ذات الريش المستقيمة على مخطط $(P - v)$.

تتراوح تدفقات الضواغط ذات الريش المستقيمة بين $(0.15 - 1500\ m^3/min)$ حجم هواء حر وبنسب ضغوط تفريغ تتراوح بين $[1 - 3.5\ bar]$. أما مردود الضواغط ذات الريش المستقيمة فتتراوح بين 50% و60% ويمكن الوصول إلى 80% عند نسب ضغوط منخفضة.

<u>المثال التطبيقي 2−8 – ضاغط دوراني بريش مستقيمة.</u>

يقوم ضاغط دوراني هوائي بريش مستقيمة بتسليم $(0.5\ m^3/s)$ بشروط الهواء الحر التالية $[P_1 = 1bar, T_1 = 27°C]$ ويفرغ الهواء بضغط $[P_2 = 2\ bar]$. حدد الاستطاعة اللازمة له ومردود الضاغط.

الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء والذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: تعطى علاقة العمل بالشكل

$$W_{roots} = (P_2 - P_1) * \dot{V}_1$$

$$W_{roots} = (2-1) * 100\ kPa * 0.5\ m^3/s$$

$$W_{roots} = 50\ kW = 67.05\ hp$$

العمل الإيزونتروبي يعطى بالعلاقة

$$W_{isen} = \frac{k}{k-1} P_1 * V_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

$$W_{isen} = \frac{1.4}{1.4-1} * 100kPa * 0.5 \frac{m^3}{s} * \left(\left(\frac{2}{1} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right)$$

$$W_{isen} = 38.33\ kW = 51.4\ hp$$

المردود يحسب من العلاقة

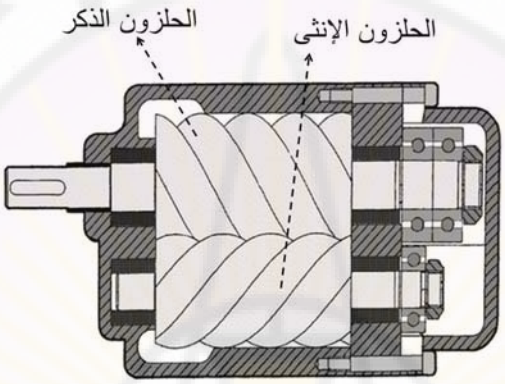
$$\eta_{Roots} = \frac{W_{isen}}{W_a}$$

$$\eta_{Roots} = \frac{38.33}{50} = 0.7666\ or\ 76.66\%$$

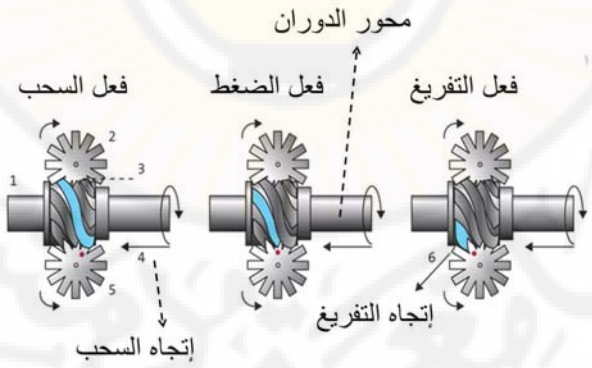
2.7.2الضواغط الحلزونية.

تشبه الضواغط الحلزونية في عملها الضواغط ذات الريش المستقيمة حيث تحتوي على ريش محلزنة كما في الشكل (2–5) السابق. يبين الشكل (2–22) الضواغط الحلزونية الثنائية المحاور *Twin Screw* حيث يحتوي الضاغط على حلزون ذكر قائد وحلزون أنثى مقاد حيث يكون محور الحلزون القائد مرتبطاً بمحور دوران المحرك الكهربائي. يبين الشكل (2–23) الضواغط الحلزونية الأحادية المحاور *Single Screw*.

كما يبين عملية السحب والضغط والتفريغ في هذه الأنواع من الضواغط. تستطيع هذه الضواغط إعطاء تدفقات حجمية تتراوح بين $(200 - 20{,}000\ m^3/h)$ وبضغط تفريغ يصل إلى $(3\ bar)$ للضواغط أحادية المحاور و $(13\ bar)$ للضواغط الثنائية المحاور.

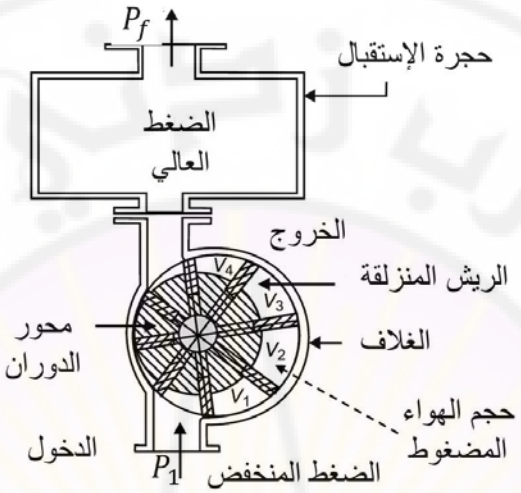


الشكل (22-2) تفصيل الضواغط الحلزونية الثنائية *Twin Screw*.



الشكل (23-2) تفصيل الضواغط الحلزونية الأحادية *Single Screw*.

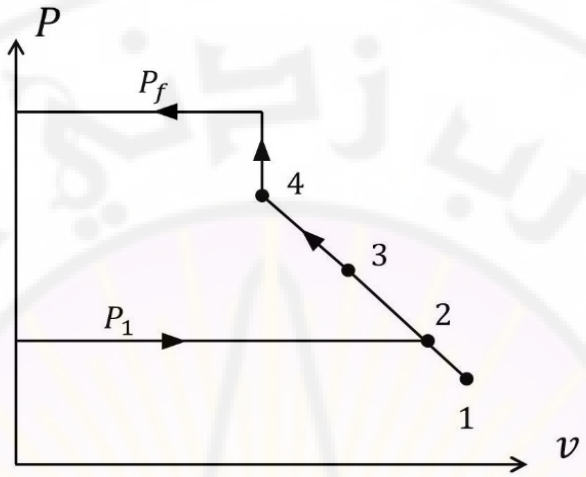
3.7.2 الضواغط ذات الريش المنزلقة.



الشكل (24−2) تفصيل الضواغط ذات الريش المنزلقة مع حجوم الهواء المضغوطة على محيط جسم الضاغط.

يبين الشكل (24−2) تفاصيل الضاغط ذي الريش المنزلقة. تتوضع الريش على محيط محور الدوران غير المركزي ضمن أقنية مستطيلة تحتوي في نهايتها على نوابض لتسهيل حركة الريشة على جدران جوف الضاغط. تتكون الريش من مواد غير معدنية وفي أغلب الأحيان تكون من مواد كربونية مركبة *Carbon Composites* أو من مواد مقاومة للاحتكاك وتبقى على اتصال تام مع جسم الضاغط للتقليل من التسرب بين حجيرات الضاغط المتشكلة. يبين الشكل (25−2) العملية الترموديناميكية للضاغط على مخطط $(P-v)$. يدخل الهواء الحر بضغط جوي نظامي من الحالة (1) ويزداد ضغطه تدريجياً مع حركة محور الدوران حتى يصل إلى الضغط المطلوب فيتم تفريغه عند الحالة (2). يعطى العمل في هذا الضاغط ولدورة واحدة في العلاقة

$$W_{vane} = n * (W_c + W_{final})$$



الشكل (25-2) العمليات للضواغط ذات الريش المنزلقة على مخطط $(P-v)$.

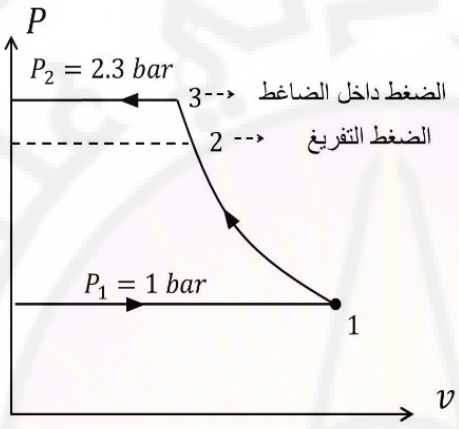
وبالتالي

$$W_{vane} = \left[n\left(\frac{k}{k-1}\right) P_1 * V_1 \left(\left(\frac{P_4}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] + \left[n(P_f - P_4) V_4 \right] \quad (kJ) \qquad (32\text{-}2)$$

حيث (n) عدد الريش الموجود على جسم محور الدوران. نلاحظ أن العمل يتألف من عملين الأول هو عمل الانضغاط ضمن حجيرات الضاغط والثاني هو في قسم حجرة الاستقبال حيث يزداد الضغط من (P_4) إلى (P_f). تستطيع الضواغط ذات الريش المنزلقة إعطاء تدفقات حجمية تصل إلى $(150\ m^3/min)$ وبنسب ضغط تفريغ تصل إلى $(8\ bar)$ وبمردود 75%.

المثال التطبيقي 2−9 – ضاغط دوراني بريش منزلقة.

يقوم ضاغط دوراني هوائي بريش منزلقة بتسليم $(0.6\ m^3/s)$ بشروط الهواء الحر التالية $[P_1 = 1bar, T_1 = 27°C]$ ويضغط الهواء إلى ضغط $[P_2 = 2.3\ bar]$. يلاحظ أن هناك انخفاضاً في الحجم بمقدار 30% عند البدء بعملية التفريغ. حدد الاستطاعة اللازمة له ومردود الضاغط.



الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء الذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: على مخطط $(P - v)$ نجد أن الضغط عند النقطة (3) هو الضغط داخل الضاغط والضغط عند النقطة (2) هو ضغط التفريغ أي أن

$$V_2 = 0.7V_1$$

والضغط يكون عند النقطة (2) يعطى بالعملية الأدياباتية التالية

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k$$

$$P_2 = 100\ kPa * \left(\frac{1}{0.7}\right)^{1.4}$$

$$P_2 = 165\ kPa$$

عمل الضاغط يعطى

$$W_{vane} = n\left(\frac{k}{k-1}\right)P_1 * V_1\left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) + n(P_3 - P_2)V_2$$

$$W_{vane} = 1\left(\frac{1.4}{1.4-1}\right)100kPa * 0.6\frac{m^3}{s}\left((165\ kPa)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1\right) + 1$$
$$* (230 - 165) * \left(0.7 * 0.6\frac{m^3}{s}\right)$$

$$W_{vane} = 59.6kW\ or\ 79.925\ hp$$

العمل الإيزونتروبي يعطى بالعلاقة

$$W_{isen} = \frac{k}{k-1}P_1 * V_1\left(\left(\frac{P_3}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)$$

$$W_{isen} = \frac{1.4}{1.4-1} * 100kPa * 0.6\frac{m^3}{s} * \left((230)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1\right)$$

$$W_{isen} = 56.42\ kW = 75.66\ hp$$

المردود يحسب من العلاقة

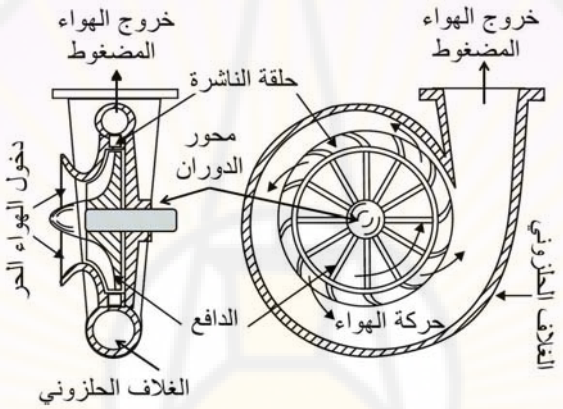
$$\eta_{Roots} = \frac{W_{isen}}{W_{vane}} = \frac{75.66}{79.925}$$

$$\eta_{Roots} = 0.9466\ or\ 94.66\%$$

8.2 ترموديناميك الضواغط النابذية *Centrifugal Compressors*.

يتألف الضاغط النابذي من غلاف حلزوني *Volute Casing* ودافع *Impeller* وحلقة ناشرة *Diffuser Ring* لتوجيه الهواء إلى الغلاف كما في الشكل (26–2). مقطع الغلاف الحلزوني يتزايد تدريجياً حتى مقطع خروج الهواء وتحيط به الحلقة الناشرة. الدافع هو عبارة عن سطح دائري يحتوي على شفرات قطرية *Radial Blades* لتوجيه الهواء إلى الحلقة الناشرة. يدخل الهواء الحر إلى عين الدافع محورياً ويتدفق قطرياً ضمن الشفرات إلى الخارج نتيجة دوران محور الدافع. يكتسب الهواء الحر نتيجة حركته ضمن قنوات الشفرات سرعات عالية جداً وبالتالي ضغوطاً ودرجات حرارة عالية أيضا نتيجة تبادل

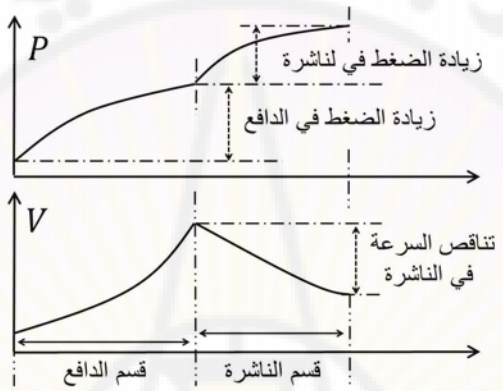
الطاقة الحركية بين المحور المدار والهواء. يدخل الهواء إلى الناشرة والتي تقوم على رفع ضغط الهواء أيضاً نتيجة تحويل جزء من الطاقة الحركية للهواء إلى طاقة ستاتيكية. يتحرك الهواء ضمن الغلاف الحلزوني إلى مخرج الضاغط. يمكن اعتبار ارتفاع ضغط الهواء عبر حركته ضمن الغلاف الحلزوني المتغيير المقطع مهملاً بالمقارنة مع ارتفاعه ضمن الدافع والناشرة كما هو واضح في الشكل (27−2).



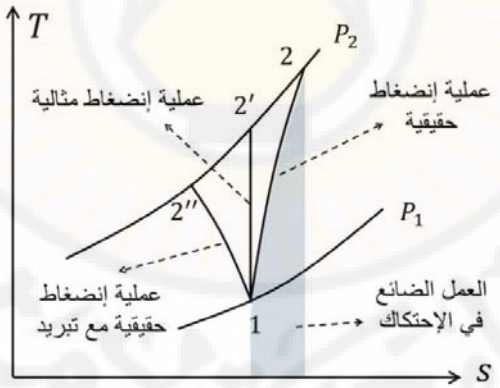
الشكل (26−2) الشكل التفصيلي لضاغط نابذي بدافع واحد.

تستعمل الضواغط النابذية في محركات الطائرات وغيرها من الأجهزة التي تحتاج إلى تدفقات كبيرة وبنسب ضغوط صغيرة. نسب الضغط المحققة في الضواغط النابذية تصل إلى (4) في ضاغط بدافع واحد و(12) في ضاغط بمجموعة دوافع. تدور هذه الضواغط بسرعة بين $[20{,}000 - 30{,}000\ RPM]$. يبين الشكل (28−2) عملية الانضغاط على مخطط $(T - s)$ حيث تمثل العملية $(1 - 2')$ عملية انضغاط حقيقي في الضاغط والعملية $(1 - 2)$ عملية انضغاط مثالية والعملية $(1 - 2'')$ عملية إتضغاط حقيقي مع تبريد للضاغط. عملية الانضغاط الحقيقية هي عملية بوليتروبية بعامل بوليتروبي بين $[n = 1.5 - 1.7]$ أكبر من عملية الانضغاط الأدياباتي للهواء ذات العامل الأدياباتي $[k = 1.4]$ ولكن عند تبريد الضاغط نجد أن العامل البوليتروبي ينخفض إلى قيمة أقل

من 1.4. لا يمكن إهمال الطاقة الحركية لوسيط التشغيل في الضواغط النابذية لأنه يتحرك بسرعات عالية جداً وذلك تبعاً لسرعة الدافع في الضاغط. لمعرفة السرعة المطلقة لدخول وخروج وسيط التشغيل يجب استخدام مثلثات السرع.



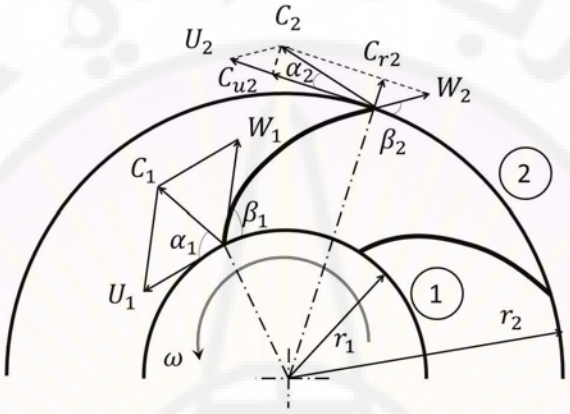
الشكل (27–2) تغييرات الضغط والسرعة في الضاغط النابذي.



الشكل (28–2) عملية الانضغاط في الضاغط النابذي على مخطط $(T - s)$.

يبين الشكل (29–2) مخطط مثلثات السرع على نقاط الدخول والخروج للدافع. نلاحظ من الشكل أن السرعة المطلقة *Absolute Velocity* والتي تعطى الرمز (C) تتألف من

سرعة مماسية (C_u) للدافع وسرعة قطرية (C_r) على امتداد قطر الدافع. السرع (W) هي السرعة الحلزونية *Whirl Velocity* والمماسة لشفرة الدافع والسرعة (U) هي السرعة المماسية للدافع أو تسمى السرعة الوسيطية للدافع.



الشكل (29−2) مثلثات السرع على قسم الدافع في الضاغط النابذي.

نحصل على العمل المقدم إلى الدافع بجداء القوة المماسية وبمسافة الانتقال في اتجاه القوة أي

$$W_{cen} = (m[W_2 - W_1]) * U_2$$

بإهمال السرعة (W_1) لأن الدخول محوري، تتحول المعادلة السابقة إلى معادلة عمل أويلر *Euler's Work* في الضواغط النابذية

$$W_{cen} = m * W_2 * U_2 \quad (kJ) \qquad (33\text{-}2)$$

إذا كانت الخروج قطرياً أيضاً يكون $(W_2 = U_2)$ وتتحول معادلة عمل أويلر إلى

$$W_{cen} = m * U_2^2 \quad (kJ) \qquad (34\text{-}2)$$

يمكن أيضاً حساب العمل المقدم إلى الدافع من القانون الأول في الترموديناميك. باعتبار أن الجريان مستقر بين الدخول والخروج ولايوجد تبادل حراري بين الدافع ووسيط التشغيل

أي أن عملية الانضغاط هي عملية أدياباتية والطاقة الكامنة مهملة في الدافع فإن تطبيق القانون الأول في الترموديناميك على الدافع يعطي العلاقة التالية

$$m\left(h_1+\frac{C_1^2}{2}\right)+W_{cen}=m\left(h_2+\frac{C_2^2}{2}\right) \qquad (35\text{-}2)$$

وبالتالي

$$W_{cen}=m\left(h_2+\frac{C_2^2}{2}\right)-m\left(h_1+\frac{C_1^2}{2}\right)$$

باعتبار أن وسيط التشغيل هو غاز مثالي أي

$$W_{cen}=m*c_p\left(T_2+\frac{C_2^2}{2c_p}\right)-mc_p\left(T_1+\frac{C_1^2}{2c_p}\right)$$

بأخذ خاصية درجة حرارة الركود *Stagnation Temperature* والتي يعبر عنها بأنها بارامتر تورموديناميكي يعبر عن درجة الحرارة الناتجة عن تخفيض سرعة الوسيط من سرعة ما إلى الصفر وبشكل إيزونتروبي

$$T_o=\left(T+\frac{C^2}{2c_p}\right) \quad (K) \qquad (36\text{-}2)$$

وبالتعويض في علاقة العمل المقدم إلى الدافع نجد أن

$$W_{cen}=m*c_p*(T_{o2}-T_{o1}) \quad (kJ) \qquad (37\text{-}2)$$

وبالتالي

$$W_{cen}=mc_pT_{o1}\left(\frac{T_{o2}}{T_{o1}}-1\right)$$

بما أن العملية هي انضغاط أدياباتي نجد أن

$$T_{o2}=T_2\left(\frac{P_{o2}}{P_2}\right)^{k/k-1}$$

$$T_{o1} = T_1 \left(\frac{P_{o1}}{P_1}\right)^{k/k-1}$$

بالتعويض نجد أن

$$W_{cen} = mc_p T_{o1} \left(\frac{T_2 \left(\frac{P_{o2}}{P_2}\right)^{k/k-1}}{T_1 \left(\frac{P_{o1}}{P_1}\right)^{k/k-1}} - 1 \right)$$

أي أن

$$W_{cen} = m * c_p * T_{o1} * \left(\left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}}\right)^{k/k-1} - 1 \right) \quad (kJ) \qquad (38\text{-}2)$$

حيث(P_{o2}/P_{o1}) نسبة ضغط الركود في الدافع. بمساواة علاقة أويلر والعلاقة (2−38) نجد أن

$$m * U_2^2 = m * c_p * T_{o1} \left(\left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}}\right)^{k/k-1} - 1 \right)$$

أي أن نسبة ضغط الركود تتحول إلى

$$\frac{P_{o2}}{P_{o1}} = \left[\frac{U_2^2}{c_p * T_{o1}} + 1 \right]^{k-1/k} \qquad (39\text{-}2)$$

نجد من العلاقة (2−39) إلى أن نسب الضغوط تتعلق بسرعة الدافع المماسية.

<u>المثال التطبيقي 2−10 – ضاغط نابذي.</u>

يقوم ضاغط نابذي بامتصاص هواء بشروط $[P_1 = 1bar, T_1 = 27℃]$ وبسرعة دخول $(50\ m/s)$ تسليمه بتدفق $(18\ kg/s)$ وبنسبة ضغط $(4\ bar)$ ومردود إيزونتروبي (0.75). حدد درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط واستطاعة الضاغط.

الفرضيات: وسيط التشغيل هو الهواء والذي يعمل على شكل غاز مثالي.

التحليل: درجة الحرارة الساكنة عند الدخول هي

$$T_{o1} = \left(T_1 + \frac{C_1^2}{2c_p}\right)$$

$$T_{o1} = \left(300K + \frac{(50\ m/s)^2}{2 * 1003.2\ J/kgK}\right)$$

$$T_{o1} = 301.25\ K$$

من المردود الإيزونتروبي نجد أن

$$\eta_{isen} = \frac{W_{isen}}{W_a}$$

$$\eta_{isen} = \frac{mc_p(T_{o2'} - T_{o1})}{mc_p(T_{o2} - T_{o1})}$$

$$\eta_{isen} = \frac{(T_{o2'} - T_{o1})}{(T_{o2} - T_{o1})}$$

في العملية الإيزونتربية نجد أن

$$\frac{T_{o2'}}{T_{o1}} = \left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}}\right)^{k-1/k}$$

$$T_{o2'} = T_{o1} * \left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}}\right)^{k-1/k}$$

$$T_{o2'} = 300K * (4)^{1.4-1/1.4} = 447.66\ K$$

بالتعويض في علاقة المردود نجد أن

$$T_{o2} = \frac{(T_{o2'} - T_{o1})}{\eta_{isen}} + T_{o1}$$

$$T_{o2} = \frac{(447.66 - 301.25\ K)}{0.75} + 301.25\ K$$

$$T_{o2} = 496.46\ K$$

استطاعة الضاغط تحسب من العلاقة

$$W_{cen} = mc_p(T_{o2} - T_{o1})$$

$$W_{cen} = 18\frac{kg}{s} * 1.0032\frac{kJ}{kgK} * (496.46\ K - 301.25\ K)$$

$$W_{cen} = 65.28\ kW = 87.54\ hp$$

ملخص فصل ترموديناميك الضواغط.

- النسبة بين حجم المسح وحجم الخلوص هي نسبة الانضغاط *Compression Ratio* في الضواغط الترددية

$$r_v = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_s}{V_C} = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}}$$

- النسبة بين ضغط التفريغ إلى ضغط الامتصاص هي نسبة الضغط *Pressure Ratio* في الضواغط الترددية

$$r_P = \frac{P_2}{P_1}$$

- نستخدم المردود الإيزوثرمي للمقارنة بين الدورات الحقيقية والدورات المثالية في الضواغط الترددية. عرف المردود الإيزوثرمي إلى أنه النسبة بين العمل الإيزوثرمي (العمل الأصغري) إلى العمل الحقيقي (العمل البوليتروبي) في الضواغط الترددية

$$\eta_{c,isoth} = \frac{W_{c,isoth}}{W_{c,actual}}$$

العمل الحقيقي في العملية الأدياباتية هو

$$W_{c,adia} = \frac{k}{k-1} * mRT_1 \left[(r_P)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

العمل الحقيقي في العملية البوليتروبية هو

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * P_1V_1 \left[(r_P)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * mRT_1 \left[(r_P)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$W_{c,poly} = \frac{n}{n-1} * mR[T_2 - T_1]$$

العمل المثالي الإيزوثرمي هو

$$W_{c,isoth} = P_1V_1 ln(r_P)$$

وبالتالي المردود الإيزوثرمي هو

$$\eta_{c,isoth} = \frac{n-1}{n} * \frac{ln(r_P)}{(r_P)^{\frac{n-1}{n}} - 1}$$

- نسبة الضغط الوسطي الفعال *Mean Effective Pressure (MEP)*

$$MEP = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{w_{net}}{v_{max} - v_{min}} \quad (kPa)$$

وتعطى استطاعة الضاغط بالعلاقة

$$HP = MEP * \dot{V} \quad (kW)$$

- حجم الهواء الحر الممتص *Free Air Delivery (FAD)* والذي يعرف إلى أنه حجم الهواء الممتص تحت شروط الهواء الحر. شروط الهواء الحر هي $[1\ atm, 15℃]$.
- يعرف المردود الحجمي إلى أنه النسبة بين حجم الهواء الحقيقي الحر الممتص في الضاغط وحجم المسح *Swept Volume* المردود الحجمي

$$\eta_{vol} = \frac{V_{FAD}}{V_s} = \frac{V_a}{V_s}$$

$$\eta_{vol} = \frac{T_a}{P_a} * \frac{P_1}{T_1} * \left\{ 1 + \frac{1}{r_v} - \frac{1}{r_v}\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{n}} \right\}$$

- نسب الضغط المثلى لضاغط ترددي متعدد المراحل هي

$$\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{1/i}$$

- عمل الضاغط الأصغري لضواغط ترددية متعددة المراحل

$$W_{c,min} = i * \frac{n}{n-1} * P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_{i+1}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{i*n}} - 1 \right)$$

- العمل الحقيقي لضاغط ذي ريش مستقيمة

$$W_a = W_{revo} = (P_2 - P_1) * V_{roots} = P_1 \left(\frac{P_2}{P_1} - 1\right) V_{roots}$$

والإيزونتروبي هو

$$W_{isen} = \frac{k}{k-1} P_1 * V_{roots} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

والمردود

$$\eta_{Roots} = \frac{W_{isen}}{W_a}$$

- العمل الحقيقي لضاغط ذي ريش منزلقة

$$W_{vane} = n\left(\frac{k}{k-1}\right) P_1 * V_1 \left(\left(\frac{P_4}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) + n(P_f - P_4) V_4$$

- درجة الحرارة الساكنة

$$T_o = \left(T + \frac{C^2}{2c_p} \right)$$

- عمل الضاغط النابذي

$$W_{cen} = m * c_p * T_{o1} \left(\left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}} \right)^{k/k-1} - 1 \right)$$

نسبة ضغط الركود

$$\frac{P_{o2}}{P_{o1}} = \left[\frac{U_2^2}{c_p * T_{o1}} + 1 \right]^{k-1/k}$$

مسائل غير محلولة لفصل
ترموديناميك الضواغط

1. يدخل هواء إلى ضاغط ترددي هوائي بمرحلة واحدة بتدفق $(60\ m^3/hr)$ وبالشروط $[1.013\ bar, 15°C]$ ويخرج بضغط $[7\ bar]$. بفرض أن عملية الانضغاط هي عملية بوليتروبية بعامل 1.35 وبإهمال حجم الخلوص حدد 1) كتلة الهواء المفرغة (kg/min) 2) درجة حرارة التفريغ و3) استطاعة الضاغط والمردود الإيزوثرمي.
2. ضاغط ترددي بمرحلتين يدخل الهواء إلى المرحلة الأولى بالشروط $[1\ bar, 16°C]$ وتدفق $(12\ m^3/min)$. يفرغ الهواء في المرحلة الثانية بضغط $[7\ bar]$ مع تبريد بيني مثالي. بفرض أن عملية الانضغاط بوليتروبية بعامل 1.25 والضاغط يدرو بسرعة $[600\ RPM]$. بإهمال حجم الخلوص حدد 1) الضغط المتوسط (نسبة الضغوط المثلى) 2) حجم كل أسطوانة و3) العمل الكلي.
3. ضاغط ترددي ذو نسبة ضغط [7] وعملية الانضغاط هي بوليتروبية بعامل 1.35 وحجم خلوص 6.2 بالمئة من حجم الأسطوانة. إذا كان المردود الحجمي 0.8 ونسبة قطر الأسطوانة إلى الشوط هي $[D/L = 1.3]$ حدد أبعاد الأسطوانة.
4. يضغط ضاغط ترددي هواء إلى ضغط تفريغ $[6.5\ bar]$ فإذا فرضنا أن تدفق الضاغط $(0.5\ m^3/min)$ والضاغط يدرو بسرعة $[450\ RPM]$ والمردود الحجمي 0.75 والمردود الإيزوثرمي 0.76 حدد الضغط الوسطي الفعال واستطاعة الضاغط.
5. يضغط ضاغط ترددي بأربع مراحل هواء من الشروط $[1\ bar, 25°C]$ وإذا فرضنا أن نسبة ضغط التفريغ إلى ضغط الامتصاص هي [4.5] والتبريد البيني بين المراحل مثالي وعملية الانضغاط هي بوليتروبية بعامل (1.1) احسب عمل الضاغط الكلي.

الفصل الرابع

Chapter Four

الدورات البخارية والمشتركة في توليد الطاقة

Vapor and Combined Power Cycles

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
Δh	التغيير في الإنتالبي النوعي	J/kg
ΔH	التغيير في الإنتالبي	J
h	الإنتالبي النوعي	J/kg
h_{in}	إنتالبي الدخول النوعي	J/kg
h_{exit}	إنتالبي الخروج النوعي	J/kg
h_S	إنتالبي في دورة عكوسة (لعملية إيزونتروبية)	J/kg
h_a	إنتالبي في دورة حقيقية (لعملية حقيقية)	J/kg
m	الكتلة	kg
$\dot{m}$	التدفق الكتلي	kg/sec
P	الضغط	kPa أو bar
Q_{in}	كمية الحرارة المعطاة	J
Q_{out}	كمية الحرارة المطروحة	J
$\dot{Q}$	معدل تغيير كمية الحرارة	W
q_{in}	كمية الحرارة المعطاة النوعية	J/kg
q_{out}	كمية الحرارة المطروحة النوعية	J/kg
$q_{primary}$	كمية الحرارة الأساسية	J/kg
q_{reheat}	كمية حرارة التسخين البيني	J/kg
R	ثابت وسيط التشغيل (الغاز)	$J/kg\,K$
s	الإنتروبي النوعي	$J/kg\,K$
s_i, s_{in}	إنتروبي الدخول النوعي	$J/kg\,K$
s_e, s_{out}	إنتروبي الخروج النوعي	$J/kg\,K$

s_{gen}	إنتروبي التوليد النوعي	$J/kg\ K$
$\dot{s}_{gen}$	معدل تغيير إنتروبي التوليد النوعي	$W/kg\ K$
Δs	التغيير في الإنتروبي النوعي	$J/kg\ K$
Δs_{sys}	التغيير في إنتروبي النوعي لنظام	$J/kg\ K$
$\dot{S}_{in}$	معدل التغيير في إنتروبي الدخول	W/K
$\dot{S}_{out}$	معدل التغيير في إنتروبي الخروج	W/K
T	درجة الحرارة	K أو °C
T_H	درجة الحرارة العليا في دورة كارنو المثالية	K أو °C
T_L	درجة الحرارة الدنيا في دورة كارنو المثالية	K أو °C
T_{max}	درجة الحرارة الأعظمية	K أو °C
T_{min}	درجة الحرارة الأصغرية	K أو °C
T_{out}	درجة حرارة المرجعية عند حساب الإكسرجي	K أو °C
$T_{b,in}$	درجة حرارة الحدود عند الدخول في حساب الإكسرجي	K أو °C
$T_{b,out}$	درجة حرارة الحدود عند الخروج في حساب الإكسرجي	K أو °C
u	الطاقة الداخلية النوعية	J/kg
Δu	التغيير في الطاقة الداخلية النوعية	J/kg
V	الحجم	m^3
v	الحجم النوعي	m^3/kg
$\dot{W}$	معدل تغيير العمل	W
w_{net}	العمل الصافي	J/kg
w_s	العمل الإيزونتروبي النوعي	J/kg
w_a	العمل الحقيقي النوعي	J/kg

$w_{pump,in}$	عمل المضخة المقدم النوعي	J/kg
$w_{pump,in,I}$	عمل المضخة المقدم الأولى النوعي	J/kg
$w_{pump,in,II}$	عمل المضخة المقدم الثانية النوعي	J/kg
$w_{turb,out}$	عمل العنفة المستخرج النوعي	J/kg
$w_{turb,HP}$	عمل العنفة ذات الضغط العالي النوعي	J/kg
$w_{turb,LP}$	عمل العنفة ذات الضغط المنخفض النوعي	J/kg
w_{in}	العمل النوعي المقدم	J/kg
w_{out}	العمل النوعي المستخرج	J/kg
$w_{b,out}$	عمل الحدود في العنصر النوعي	J/kg
X_{des}	إكسرجي الضائع	J/kg
$\dot{X}_{des}$	التغيير في إكسرجي الضائع	W
y	نسبة الاستنزاف الأولى	لا بعدي
z	نسبة الاستنزاف الثانية	لا بعدي
η_{th}	المردود الحراري	لا بعدي
$\eta_{th,carnot}$	المردود الحراري لدورة كارنو المثالية	لا بعدي
η_p	المردود الإيزونتروبي للمضخة	لا بعدي
η_T	المردود الإيزونتروبي للتوربين	لا بعدي

مقدمة الفصل.

البخار *vapor or steam* هو أكثر الوسائط التشغيلية استخداماً في محطات توليد الطاقة الكهربائية بسبب خواصه الفيزيائية والكيميائية المناسبة مثل كلفته المنخفضة وتوفره وارتفاع محتواه الحراري *Enthalpy of Vaporization*. تسمى المحطات التي تولد الطاقة من بخار الماء بمحطات التوليد البخارية *Steam Power Plants*. تصنف هذه المحطات بحسب الوقود المستخدم لتوليد البخار فمثلاً المحطات التي تستعمل الوقود الإحفوري (فحم حجري) لتوليد البخار تسمى بالمحطات الفحمية *Coal Plants* وعندما تستعمل هذه المحطات المواد المشعة في توليد البخار تسمى بالمحطات النووية *Nuclear Plants* وعندما تستعمل الغاز الطبيعي *Liquid Petroleum Gas (LPG)* في توليد البخار تسمى بمحطات الغاز الطبيعي *Natural Gas Plants*. في هذا الفصل سنتعرف على دورات توليد البخار وأهمها دورة رانكين المثالية البسيطة *Ideal Rankine Cycle* والطرائق المتبعة في زيادة مردودها. كما سنقوم بتحليل الدورة المشتركة ودورة رانكين العضوية ودورة كالينا.

<u>الفوائد العلمية من الفصل</u>

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ تحليل الدورة البخارية لتوليد الطاقة الكهربائية.
- ✓ تحليل الدورة البخارية لتوليد الطاقة الكهربائية مع تسخين بيني مثالي والتي تسمى التوليد المشترك *Cogeneration*.
- ✓ البحث عن طرائق لتعديل دورة رانكين *Rankine* (احتراق خارجي) لزيادة مردودها.
- ✓ تحليل عملية التسخين البيني *Reheat* و والاسترجاع *Regeneration* لدورة بخارية لتوليد الطاقة الكهربائية.

- ✓ تحليل دورة توليد طاقة كهربائية مؤلفة من دورتين منفصلتين والتي تسمى الدورة المشتركة *Combined Cycle*.
- ✓ شرح دورة رانكين العضوية *Organic Rankine* Cycle ودورة كالينا *Kalina*.

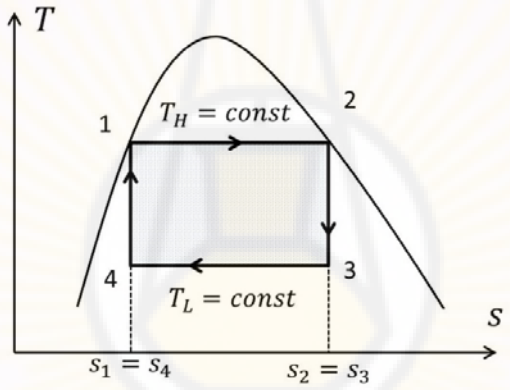
محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.4	دورة كارنو البخارية.	231
2.4	دورة رانكين المثالية – الدورة المثالية للدورات البخارية لتوليد الطاقة الكهربائية.	233
3.4	تحليل الطاقي لدورة رانكين المثالية البسيطة.	239
1.3.4	التحليل الطاقي في المضخة.	240
2.3.4	التحليل الطاقي في المرجل.	241
3.3.4	التحليل الطاقي في العنفة التوربينية البخارية.	241
4.3.4	التحليل الطاقي في المكثف.	242
5.3.4	مردود دورة رانكين المثالية البسيطة.	242
4.4	المقارنة بين الدورات البخارية الحقيقة والمثالية.	246
5.4	كيفية زيادة مردود دورة رانكين.	250
1.5.4	تخفيض ضغط المكثف (تخفيض درجة الحرارة الوسيطة للمكثف).	251
2.5.4	تحميص البخار إلى درجات حرارة مرتفعة (رفع درجة الحرارة الوسطية للمرجل).	252
3.5.4	زيادة ضغط المرجل (رفع درجة الحرارة الوسطية للمرجل).	253
6.4	دورة رانكين المثالية مع تسخين بيني مثالي.	258
7.4	دورة رانكين المثالية مع مسترجع مثالي.	264
1.7.4	المسترجع المفتوح.	266
2.7.4	المسترجع المغلق.	268

8.4 تحليل القانون الثاني والإكسرجي في الدورات البخارية. 277
9.4 التوليد المشترك للطاقة. 280
10.4 دورة رانكين العضوية. 285
11.4 دورة (غاز– بخار) مشتركة. 286
ملخص الفصل. 290
مسائل غير محلولة. 292
نهاية الفصل. 292

1.4 دورة كارنو البخارية *The Carnot Vapor Cycle*.

دورة كارنو البخارية هي الدورة البخارية المثالية التي نستخدم فيها الماء كوسيط تشغيل لمقارنة الدورات البخارية الأخرى وتحديد الضياعات الموجودة في تلك الدورات. سنفرض أولاً أن دورة كارنو البخارية المثالية تنفذ في منطقة مزيج ماء – بخار (داخل القبة *Saturation Dome*) على مخطط $(T - s)$ وهي دورة مستقرة *Steady Flow Carnot Cycle* لوسيط ذي طور أحادي *Pure Substance* مثل الماء كما هو واضح في الشكل (1–4).



الشكل (1–4) دورة كارنو البخارية المثالية على مخطط $(T - s)$.

تتألف الدورة من أربع مراحل متتالية وهي

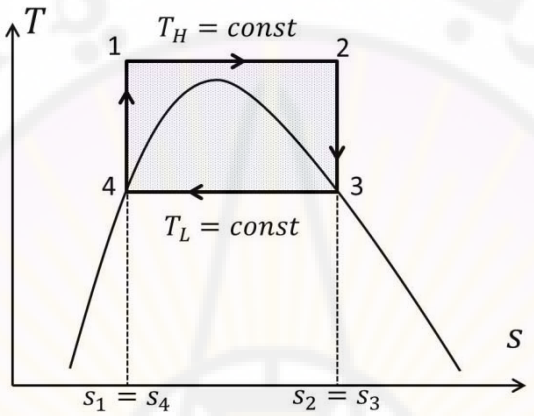
- العملية $(2 - 1)$ هي عملية إضافة حرارة إلى وسيط التشغيل إيزوثرمياً *Isothermally* بدرجة حرارة (T_H) وبشكل عكوس *Reversibly*. تتم إضافة الحرارة إلى وسيط الشتغيل بواسطة مرجل.
- العملية $(3 - 2)$ هي عملية تمدد إيزونتروبي *Isentropically*. تتم عملية التمدد في عنفة بخارية.

- العملية $(4-3)$ هي عملية طرح حرارة من وسيط التشغيل إيزوثرمياً *Isothermally* بدرجة حرارة (T_L) وبشكل عكوس *Reversibly*. تتم عملية طرح الحرارة إلى الوسط الخارجي عن طريق مكثف.
- العملية $(1-4)$ هي عملية انضغاط إيزونتروبي *Isentropically* ويعود وسيط التشغيل إلى الحالة الابتدائية عند نهاية الدورة. تتم عملية الانضغاط في مضخة.

هناك مجموعة من المشاكل التي قد تظهر في الدورة السابقة وهي

- عملية إضافة الحرارة إلى وسيط التشغيل والتي تتوافق مع العملية $(2-1)$ وعملية طرح الحرارة من وسيط التشغيل والتي تتوافق مع العملية $(4-3)$ هما عمليتان قابلتان للتحقيق على أرض الواقع إذا استطعنا أن نثبت الضغط في المرجل والمكثف ولكن نلاحظ من مخطط $(T-s)$ أن أعلى درجة حرارة يمكن من خلالها إضافة أي كمية من الحرارة إلى وسيط التشغيل هي درجة الحرارة الحرجة *Critical Point* والذي يحد وبشكل كبير من مردود هذه الدورة *Thermal Efficiency*.
- عملية التمدد التي تتوافق مع العملية $(3-2)$ يمكن تحقيقها إيزونتروبياً باستخدام تصميم مثالي للعنفة ولكن مع انخفاض نسبة كسر الجفاف *Quality* أي ارتفاع كمية الماء الموجودة في الخليط يؤدي إلى اصطدام قطرات الماء في شفرات العنفة عند سرعات عالية وتآكل شفرات العنفة وإهترائها. لذلك ينصح إلى أن لايقل كسر الجفاف عن 90 بالمئة لحماية العنفة.
- عملية ضغط وسيط التشغيل والتي تتوافق مع العملية $(1-4)$ والخارج من المكثف على شكل ماء مشبع *Saturated Liquid* يمكن تحقيقها إيزونتروبياً باستخدام تصميم مثالي للمضخة. ولكن هذه العملية صعبة لأننا 1) لايمكن أن نصل إلى مواصفات النقطة (4) بالسيطرة على بارامترات المكثف وبالتالي 2) يكون وسيط التشغيل الذي يدخل المضخة عبارة عن مزيج من بخار وماء ولا يمكن أن نصمم مضخة تعمل على وسيط تشغيل بطورين.

يمكن معالجة بعض هذه المشاكل المذكورة سابقاً بتنفيذ دورة كارنو البخارية بطريقة أخرى موضحة بالشكل (4–2).



الشكل (2–4) دورة كارنو البخارية المثالية لتفادي المشاكل على مخطط $(T - s)$.

هذه الدورةأيضاً تحتوي على مشاكل صعبة التحقيق مثل ضغط وسيط التشغيل إيزونتروبياً إلى ضغوط عالية جدا في العملية $(4 - 1)$ وصعوبة إضافة حرارة وبشكل إيزوثرمي عند ضغوط عالية في العملية $(2 - 1)$ وصعوبة طرح الحرارة وبشكل إيزوثرمي في العملية $(4 - 3)$.

2.4 دورة رانكين المثالية – الدورة المثالية للدورات البخارية لتوليد الطاقة الكهربائية.

يوضح الشكل (3–4) المكونات الرئيسية لدورة رانكين الحقيقة البسيطة. في أغلب الأحيان يكون وسيط التشغيل المستخدم في الدورة هو الماء. تتألف دورة رانكين البخارية الحقيقية من أربعة مكونات رئيسية أساسية يمكن وصفها كما يلي:

1. المضخة.

- ✓ تعمل المضخة على رفع ضغط وسيط التشغيل الخارج من المكثف إلى الضغط المطلوب في المرجل.
- ✓ يكون ضغط وسيط التشغيل الخارج من المكثف والذي يوصف بالنقطة (1) أخفض ضغط في الدورة.
- ✓ يتحول وسيط التشغيل المشبع الذي يوصف بالنقطة (1) إلى سائل مضغوط يوصف بالنقطة (2).
- ✓ عمل المضخة هو عمل مقدم إلى الدورة ويعطى الرمز $(w_{pump,in}, kJ/kg)$.

2. المرجل.

- ✓ يقوم المرجل بحرق كمية معينة من الوقود منتجاً بذلك كمية معينة من الحرارة تقدم إلى وسيط التشغيل على عدة مراحل تستخدم فيها المبادلات الحرارية ضمن المرجل.
- ✓ ترتفع درجة حرارة وسيط التشغيل المضغوط الذي يوصف بالنقطة (2) نتيجة إضافة هذه الكمية من الحرارة ويتحول إلى وسيط تشغيل محمص يوصف بالنقطة (3).
- ✓ تزود الحرارة إلى وسيط التشغيل خلال عملية ضغط ثابت ويكون ضغط وسيط التشغيل عن خروجه من المرجل والذي يوصف بالنقطة (2) أعلى ضغط في الدورة.
- ✓ يرمز إلى كمية الحرارة المعطاة إلى وسيط التشغيل بالرمز $(q_{in}, kJ/kg)$.
- ✓ يمكن اعتبار المرجل بأنه المصدر الحراري المرتفع بحسب تعريف المحرك الحراري في القانون الثاني في الترموديناميك حيث $(T_H = T_3)$ و $(q_H = q_{in})$.

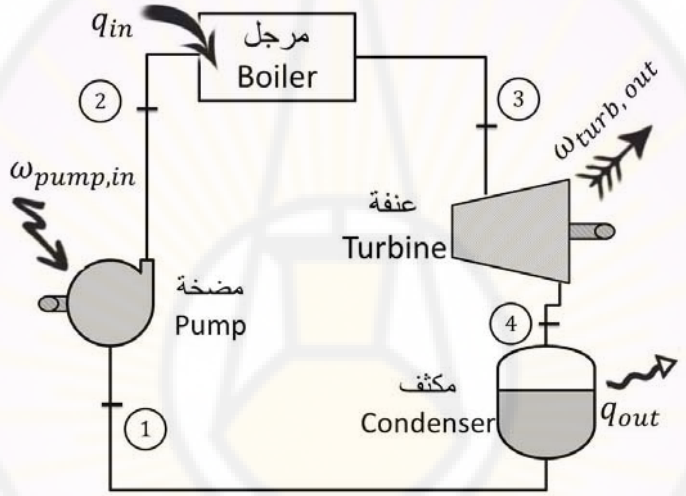
3. العنفة التوربينية البخارية.

- ✓ تقوم العنفة التوربينية البخارية بإنتاج عمل مفيد نتيجة تمدد وسيط التشغيل المحمص والذي يوصف بالنقطة (3) ليخرج منها بحالة مزيج يوصف بالنقطة (4).
- ✓ ينخفض ضغط وسيط التشغيل المحمص والذي يوصف بالنقطة (3) إلى ضغط حالة مزيج الذي يوصف بالنقطة (4).

✓ يتحول وسيط التشغيل المحمص الذي يوصف بالنقطة (3) إلى مزيج ذات كسر جفاف معين يوصف بالنقطة (4).

✓ عمل العنفة هو عمل مفيد نحصل عليه من الدورة ويعطى الرمز $(w_{turb,out}, kJ/kg)$.

✓ يتحول العمل المفيد إلى طاقة كهربائية نزود بها الشبكة الكهربائية.



الشكل (3-4) عناصر دورة رانكين البخارية الحقيقة البسيطة.

4. المكثف.

✓ يقوم المكثف بطرح كمية معينة من الحرارة إلى الوسط الخارجي.

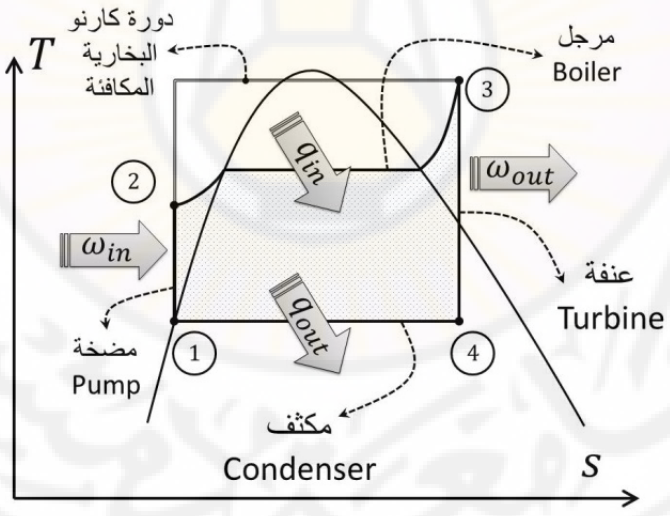
✓ الحرارة المطروحة هي بالكامل حرارة كامنة.

✓ نتيجة طرح هذه الحرارة الكامنة إلى الوسط الخارجي يتحول المزيج والذي يوصف بالنقطة (4) إلى وسيط تشغيل مشبع يوصف بالنقطة (1).

✓ تطرح الحرارة من وسيط التشغيل بضغط ثابت وهو أخفض ضغط في الدورة وهو ضغط الإشباع (P_{sat}).

- ✓ تبقى درجة حرارة وسيط الشتغيل خلال هذه العملية ثابتة وتكون درجة حرارة الإشباع(T_{sat}) .
- ✓ يرمز إلى كمية الحرارة المطروحة إلى الخارج بالرمز ($q_{out}, kJ/kg$).
- ✓ يمكن اعتبار المكثف بالمصرف الحراري المنخفض بحسب تعريف المحرك الحراري في القانون الثاني في الترموديناميك حيث ($T_L = T_4 = T_1$) و ($q_L = q_{out}$).

هناك الكثير من النواحي غير العملية والموجودة في دورة كارنو البخارية يمكن حلها بواسطة دورة رانكين المثالية البسيطة. حل هذه المشاكل يتم عن طريق تسخين وسيط التشغيل بشكل زائد وتحويله من بخار مشبع في دورة كارنو البخارية (كسر الجفاف يساوي 1) إلى بخار محمص في دروة رانكين والذي تصفه النقطة (3) وتكثيفه وبشكل كامل في المكثف (كسر الجفاف يساوي 0) والذي تصفه النقطة (1). يبين الشكل (4-4) دورة رانكين المثالية البسيطة والممثلة على مخطط ($T - s$).



الشكل (4-4) دورة رانكين المثالية البسيطة على مخطط ($T - s$).

يجب الانتباه أيضاً إلى أن دورة رانكين المثالية البسيطة **تبدأ يوماً** من حالة الماء المشبع الخارج من المكثف والتي توافق والنقطة (1) على مخطط $(T - s)$. يمكن أن نصف العمليات الرئيسية التي تقوم بها العناصر الرئيسية في دورة رانكين المثالية البسيطة وبأخذ الماء كوسيط تشغيل بالشكل التالي

- العملية $(2 - 1)$ هي عملية ضغط إيزونتروبي $(s_1 = s_2)$ بدرجة حرارة ثابتة في المضخة. يدخل الماء إلى المضخة كما في النقطة (1) على شكل ماء مشبع ويضغط وبشكل إيزونتروبي إلى ضغط تشغيل المرجل. ترتفع درجة حرارة الماء المشبع خلال عملية الضغط الإيزونتروبي قليلا بسبب نقصان الحجم النوعي للماء. يمكن إهمال ارتفاع درجة الحرارة ضمن المضخة.
- العملية $(3 - 2)$ هي عملية إضافة حرارة *Heat Addition* وبضغط ثابت *Isobaric* في المرجل. يسمى المرجل بقسم توليد البخار *Steam Generator*. يدخل الماء إلى المرجل على شكل سائل مضغوط في الحالة (2) ويخرج على شكل بخار محمص في الحالة (3). المرجل يشبه هنا مبادلاً حرارياً كبير جدا يتم فيه نقل الحرارة الناتجة عن احتراق الوقود (التفاعل النووي، طاقة متجددة أو طاقة صناعية ضائعة) إلى الماء وبضغط ثابت. يتألف المرجل من ثلاثة أقسام. القسم الأول يسخن الماء إلى حالة الغليان ويسمى المسخن الأولي *Pre-Heater* أو *Economiser* (من الحالة 2 إلى حالة الماء المشبع) والقسم الثاني يحول الماء المشبع إلى بخار مشبع ويسمى المبخر *Vaporizer* والقسم الثالث يحمص البخار إلى درجات حرارة عالية جدا قد تصل إلى (700℃) ويسمى المحمص *Super-Heater* (من البخار المشبع إلى الحالة 3).
- العملية $(4 - 3)$ هي عملية تمدد إيزونتروبي $(s_3 = s_4)$ بدرجة حرارة ثابتة في العنفة التوربينية. يدخل البخار المحمص في الحالة (3) إلى العنفة التوربينية حيث يتمدد وبشكل إيزونتروبي وينتج عملاً مفيداً يدير به محور العنفة الموصول بمولدة كهربائية. ينخفض ضغط ودرجة حرارة البخار بفعل التمدد إلى الحالة (4).

- العملية $(1-4)$ هي طرح حرارة *Heat Rejection* وبضغط ثابت *Isobaric* في المكثف. يدخل البخار الخارج من العنفة إلى المكثف حيث يكون على شكل خليط مشبع من الماء والبخار *Saturated Liquid-Vapor Mixture* ويكون كسر الجفاف *Quality* كبير جدا وقريب من الواحد. يدخل الخليط إلى المكثفة ويبدأ بالتكاثف وبضغط ثابت. يمثل المكثف، كما هو الحال في المرجل، بمبادل حراري كبير جدا يتم فيه طرح الحرارة المأخوذة من وسيط التشغيل إلى وسط خارجي مثل مياه بحيرة أو نهر أو الهواء الخارجي (تكاثف هوائيا *Dry Cooling*). يخرج الخليط من المكثف على شكل ماء مشبع ويدخل المضخة لتعاد الدورة مرة أخرى.

<u>ملاحظات هامة جداً</u>

i. ينبغي أن نشير إلى أن المساحة المحصورة بين محور الإنتروبي على مخطط $(T-s)$ والعملية $(3-2)$ تمثل كمية الحرارة المضافة إلى الماء من المرجل وتمثل المساحة المحصورة بين محور الإنتروبي على مخطط $(T-s)$ والعملية $(1-4)$ الحرارة المطروح إلى الوسط الخارجي من المكثف. يمثل الفرق بين هاتين المساحتين والممثلة بالمساحة المحصورة ضمن العملية $(1-2-3-4-1)$ بالعمل المفيد الذي يمكن الحصول عليه من دورة رانكين المثالية البسيطة بحسب القانون الأول في الترموديناميك.

ii. ينطبق على دورة رانكين المثالية البسيطة صفة النظام المغلق *Closed System* لأن كتلة وسيط التشغيل تبقى ثابتة بعض النظر عن التحولات التي تجري عليه أما العناصر المكونة لدورة رانكين فتنطبق عليها صفة النظام المفتوح *Open System* لأن الكتلة تتدفق دخولاً وخروجاً عبر حدودها.

iii. الضياعات التي تحدث بين مكونات المضخة والعنفة أو الضياعات التي تحدث نتيجة انتقال الحرارة في المرجل أو المكثف يمكن إهمالها عند الدراسة الطاقية للدورة. يمكن اعتبار هذه الضياعات الداخلية مهملة. تسمى العمليات التي تقوم بها هذه العناصر بالعمليات العكوسة داخلياً *Internally Reversible*.

iv.الضياعات التي تحدث بين العناصر والوسط الخارجي نتيجة تبادل الحرارة والعمل لايمكن إهمالها عند الدراسة الطاقية للدورة. تسمى العمليات التي تقوم بها هذه العناصر بالعمليات غير العكوسة خارجياً *Externally Irreversible*.

3.4 التحليل الطاقي *Energy Analysis* لدورة رانكين المثالية البسيطة.

كل عنصر من العناصر المكونة لدورة رانكين المثالية البسيطة (مضخة، مرجل، عنفة، مكثف) يمكن وصفه بنظام مفتوح يعمل بحالة مستقرة *Steady Flow Device* وبالتالي فإن كافة العمليات التي تجري ضمن هذه العناصر هي عمليات مستقرة *Steady Flow Processes*. الحالات العابرة والتي تتعلق بالزمن يمكن إهمالها ضمن دورة رانكين المثالية البسيطة. إن التغييرات في الطاقة الحركية *Kinetic Energy* والطاقة الكامنة *Potential Energy* للبخار في دورة رانكين المثالية البسيطة صغيرة جداً وبالتالي يمكن إهمالهما بالمقارنة مع كميات الحرارة المتبادلة والعمل المفيد المستخرج من الدورة. من أجل إجراء التحليل الطاقي للدورة نطبق القانون الأول في الترموديناميك (معادلة انحفاظ الطاقة *Conservation of Energy*) على كل عنصر من عناصر الدورة مع إهمال الطاقة الحركية والكامنة فيكون

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} * \Delta H \quad (kW)$$

بالتقسيم على التدفق $(\dot{m}, kg/s)$ نحصل على معادلة القانون الأول في الترموديناميك النوعية

$$q - w = \Delta h \quad (kJ/kg)$$

$$\Delta h = \Delta u + \Delta(Pv)$$

(Δh) التغيير في المحتوى الطاقي للعنصر (الإنتالبي) مابين الحالة النهائية والحالة الابتدائية و(w) هي الأعمال الأخرى المتبادلة مع الوسط الخارجي فقط وهي العمل

المقدم إلى المضخة والعمل المفيد التي تعطيه العنفة و(q)كميات الحرارة المقدمة في المرجل والمطروحة في المكثف. بتعويض القيم في المعادلة السابقة نجد

$$(q_{in} + w_{pump,in}) - (q_{out} + w_{turb,out}) = (h_{exit} - h_{in}) \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

بترتيب العلاقة السابقة نجد

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{pump,in} - w_{turb,out}) = (h_{exit} - h_{in}) \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \quad (1\text{-}4)$$

1.3.4 التحليل الطاقي في المضخة.

يُضغط وسيط التشغيل في المضخة خلال العملية $(1-2)$ على مخطط $(T-s)$. هناك طريقتان لحساب عمل المضخة. الطريقة الأولى هي من القانون الأول في الترموديناميك وبحسب المعادلة $(1-4)$ إذ لا توجد كميات حرارة متبادلة بين المضخة والوسط الخارجي ويعطى العمل بالعلاقة

$$(0 + w_{pump,in}) - (0 + 0) = (h_{exit} - h_{in})$$

أي أن عمل المضخة هو

$$w_{in,pump} = h_2 - h_1 \qquad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \quad (2\text{-}4)$$

العملية في المضخة هي عملية إيزونتروبية وحالة وسيط التشغيل الذي يدخل المضخة هي ماء مشبع أي

$$h_1 = h_{f@P_1}, \quad s_1 = s_2$$

والطريقة الثانية تفرض أن التغيير في الطاقة الداخلية ضمن المضخة مهمل ولا تغيير في الحجم النوعي لوسيط التشغيل لأن الماء غير قابل للانضغاط. بالتعويض في المعادلة $(1-4)$ نجد أن

$$w_{in,pump} = h_2 - h_1 = (u_2 + P_2 v_2) - (u_1 + P_1 v_1)$$

أي أن

$$w_{in,pump} = v\,(P_2 - P_1) \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{3-4}$$

حيث

$$v = v_{f@P_1}$$

2.3.4 <u>التحليل الطاقي في المرجل</u>.

تضاف كمية من الحرارة إلى وسيط التشغيل في المرجل خلال العملية $(3-2)$ على مخطط $(T-s)$. تحسب كمية الحرارة المضافة في المرجل من المعادلة $(1-4)$ حيث لايوجد تبادل في الأعمال مع الوسط الخارجي

$$(q_{in} + 0) - (0 + 0) = (h_{exit} - h_{in})$$

أي أن

$$q_{in} = h_3 - h_2 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{4-4}$$

3.3.4 <u>التحليل الطاقي في العنفة التوربينية البخارية</u>.

يتمدد وسيط التشغيل في العنفة خلال العملية $(4-3)$ على مخطط $(T-s)$. يمكن حساب العمل المفيد الذي تعطيه العنفة باستخدام المعادلة $(1-4)$ حيث لايوجد كميات حرارة متبادلة بين العنفة والوسط الخارجي

$$(0 + 0) - (0 + w_{turb,out}) = (h_{exit} - h_{in})$$

$$-w_{turb,out} = h_4 - h_3$$

أي أن

$$w_{turb,out} = h_3 - h_4 \qquad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{5-4}$$

4.3.4 التحليل الطاقي في المكثف.

تطرح كمية من الحرارة من وسيط التشغيل إلى الوسط الخارجي في المكثف خلال العملية $(1-4)$ على مخطط $(T-s)$. تحسب كمية الحرارة المطروحة في المكثف من المعادلة (1-4) حيث لايوجد تبادل في الأعمال مع الوسط الخارجي

$$(0+0) - (q_{out} + 0) = (h_{exit} - h_{in})$$

$$-q_{out} = h_1 - h_4$$

أي أن

$$q_{out} = h_4 - h_1 \qquad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{5-4}$$

5.3.4 مردود دورة رانكين المثالية البسيطة.

يعرف مردود دورة رانكين المثالية البسيطة إلى أنه النسبة بين الطاقة الصافية (w_{net}) والطاقة المستجرة (q_{in}) أي

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}}$$

يمكن التعبير عن العمل الصافي بتطبيق القانون الأول في الترموديناميك على الدورة ككل باعتبارها نظاماً مغلقاً

$$(q_{in} + w_{pump,in}) - (q_{out} + w_{turb,out}) = 0$$

$$(q_{in} - q_{out}) = (w_{turb,out} - w_{pump,in})$$

أي أن العمل الصافي الذي نحصل عليه من الدورة هو

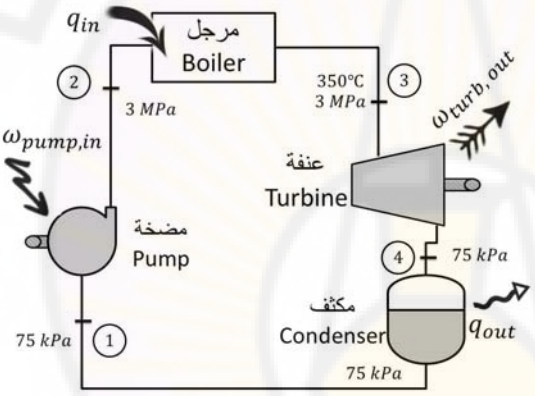
$$w_{net} = q_{in} - q_{out} = w_{turb,out} - w_{pump,in}$$

بالتعويض نجد أن المردود يعطى بالعلاقة

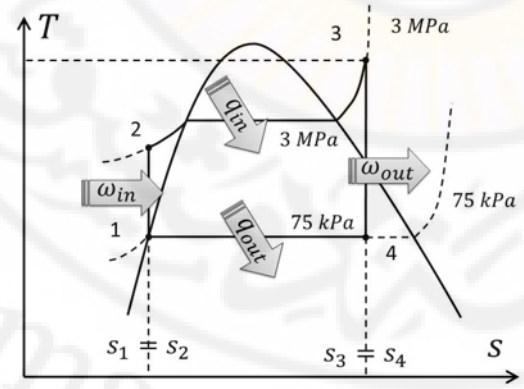
$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \qquad (6\text{-}4)$$

ويمكن التعبير عن مردود دورة رانكين المثالية البسيطة بالنسبة بين المساحة المحصورة في الدورة $(1-4-3-2-1)$ إلى المساحة التي تمثل تقديم الحرارة في المرجل أي المساحة المحصورة تحت العملية $(3-2)$ ومحور الإنتروبي على مخطط $(T-s)$.

المثال التطبيقي 4-1 – دورة رانكين المثالية البسيطة



محطة توليد طاقة كهربائية تعمل على دورة رانكين المثالية البسيطة كما في الشكل المرفق. يدخل البخار إلى العنفة التوربينية بضغط $(3\ MPa)$ وبدرجة حرارة $(350°C)$ ويُكثف إلى ضغط $(75kPa)$. حدد المردود الحراري للدورة.



الفرضيات: 1) كافة العناصر تعمل بشكل مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: بما أن الدورة هي دورة رانكين المثالية فإن المضخة والعنفة تعملان بشكل إيزونتروبي ولايوجد انخفاض في الضغط في المرجل والمكثف. يخرج البخار من المكثف على شكل بخار مشبع ويدخل

المضخة كما هو واضح في المخطط الرمزي ومخطط الدارة على $(T-s)$. في البدءية نحدد الإنتالبي لكافة النقاط في الدورة باستخدام جداول البخار.

الحالة (1) – دخول وسيط التشغيل إلى المضخة – من جداول الضغط بدلالة الإشباع نجد أن

$$P_1 = 75\ kPa\ , Sat\ Liquid$$

$$\boldsymbol{h_1 = h_{f@75kPa} = 384.44\ {}^{kJ}/_{kg}}\ ,$$

$$v_1 = v_{f@75kPa} = 0.001037\ {}^{m^3}/_{kg}$$

درجة حرارة التكاثف هي درجة حرارة الإشباع عند ضغط المكثف أي

$$T_{sat} = T_1 = T_4 = 91.758℃ = 364.9\ K$$

الحالة (2) – دخول وسيط التشغيل إلى المرجل

$$P_2 = 3\ MPa\ , \qquad s_2 = s_1$$

$$w_{pump,in} = v(P_2 - P_1)$$

$$w_{pump,in} = \left(0.001037 \frac{m^3}{kg}\right) * (3000 - 75\ )kpa \left(\frac{1\ kJ}{1\ kPa * m^3}\right)$$

$$w_{pump,in} = 3.03\ \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 = h_1 + w_{pump,in}$$

$$\boldsymbol{h_2 = (384.44 + 3.03) = 387.47\ \frac{kJ}{kg}}$$

الحالة (3) – دخول وسيط الشتغيل إلى العنفة

$$P_3 = 3\ MPa\ , T_3 = 350℃$$

من جداول بخار الماء المحمص نجد أن البارامترات هي

$$\boldsymbol{h_3 = 3116.1\ {}^{kJ}/_{kg}}\ ,\ s_3 = 6.7450\ {}^{kJ}/_{kg.K}$$

الحالة (4) – دخول وسيط التشغيل إلى المكثف

$$P_4 = 75\ kPa\ (sat\ mix)\ , s_4 = s_3$$

في هذه الحالة يكون لدينا خليط من البخار والماء وبالتالي يجب أن نحسب كسر الجفاف *Quality*

$$\text{א}_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg} = (s_g - s_f)} = \frac{6.745 - 1.2132}{6.2426} = 0.8861$$

$$\boldsymbol{h_4} = h_f + \text{א}_4 h_{fg} = 384.44 + 0.8861 * (2278) = \mathbf{2403}\ \boldsymbol{^{kJ}/_{kg}}$$

وبالتالي فإن

$$q_{in} = h_3 - h_2 = 3116.1 - 387.47 = 2728.6\ \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = 2403 - 384.44 = 2018.6\ \frac{kJ}{kg}$$

ونجد أن مردود دورة رانكين المثالية البسيطة هي

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{2018.6}{2728.6} = 26\%$$

أو يمكن حسابها من

$$w_{turb,out} = h_3 - h_4 = 3116.1 - 2403 = 713.1\ \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{net} = w_{turb,out} - w_{pump,in} = 713.1 - 3.03 = 710.1\ \frac{kJ}{kg}$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{710.1}{2728.6} = 0.26 \text{ او } 26\%$$

ملاحظات

- يمثل عمل المضخة 0.5% من عمل العنفة وبالتالي يمكن إهمال عمل المضخة في دورة رانكين المثالية البسيطة.

> الاستفادة من القيمة الحرارية للوقود المحترق داخل المرجل هي فقط 26 بالمئة كعمل مفيد والباقي يتم طرحه في المكثف. طبعا هذا المردود قليل جدا ولكن الاستفادة هي في توليد الطاقة الكهربائية.

> المردود في الدارة الحقيقة المنفذة على أرض الواقع هو أقل من الدورة المثالية بسبب العمليات غير العكوسة في كافة أجهزة الدورة. يمكن حساب الطاقة المهدورة من خلال حساب الإكسرجي المدمر.

> مردود دورة كارنو البخارية المثالية بالمقارنة مع هذه الدورة هي

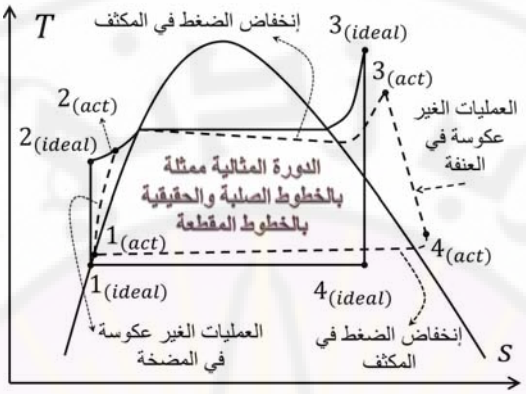
$$\eta_{th,Carnot} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{(91.758 + 273)}{(350 + 273)} = 0.5854$$ أو 58.54%

الفرق بين مردود كارنو ومردود دورة رانكين المثالية البسيطة يعود إلى الضياعات في العمليات الخارجية الناتجة عن الفرق الكبير بين درجة حرارة الوقود المحروق وبين درجة حرارة البخار الخارج من المرجل والضياعات في العنفة.

4.4 المقارنة بين الدورات البخارية الحقيقية والمثالية.

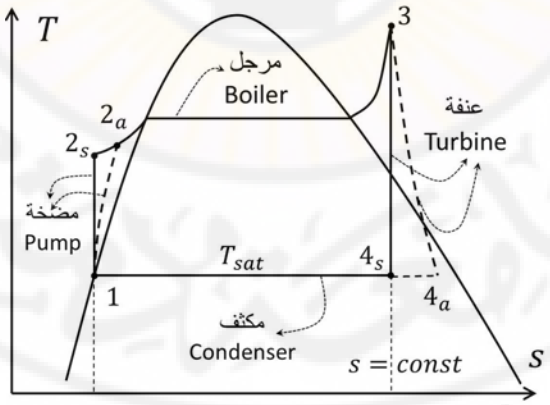
إن الفرق بين دورة رانكين الحقيقية والمثالية موضح في الشكل (5–4). هذا الفرق ناتج عن العمليات غير العكوسة في كافة الأجهزة وممثلاً باحتكاك وسيط التشغيل ضمن الأجهزة والضياعات الحرارية إلى الوسط الخارجي.

- الاحتكاك ضمن الأجهزة. إن الاحتكاك الناتج عن جريان وسيط التشغيل في انابيب المرجل يؤدي إلى خروج البخار المحمص من المرجل بضغط أقل من ضغط البخار المحمص في الدورة المثالية كما هو بالشكل (5–4) على مخطط $(T - s)$. يؤدي احتكاك وسيط التشغيل ضمن أنابيب المكثف أيضاً إلى خروج الماء المشبع بضغط أعلى من ضغط الماء المشبع في الدورة المثالية.



الشكل (5–4) الفرق بين دورة رانكين الحقيقية والمثالية البسيطة على مخطط $(T-s)$.

- الضياعات الحرارية من الأجهزة وتأثيرها. تنتج الضياعات الحرارية في الأنابيب الناقلة لوسيط التشغيل وتنتقل إلى الوسط الخارجي. لتعويض هذه الضياعات يجب زيادة كمية الحرارة المعطاة إلى وسيط التشغيل والناتجة عن احتراق الوقود في المرجل وبالتالي يكون مردود الدورة الحقيقية أقل من الدورة المثالية البسيطة.



الشكل (6–4) الضياعات في المضخة والعنفة على مخطط $(T-s)$.

في أغالب الأحيان نهمل الضياعات الناتجة عن انحفاظ الضغط في المرجل والمكثف كما هو واضح في الشكل (6−4).

نعبر عن الضياعات الموجودة في المضخة والعنفة التوربينية باستخدام مفهوم المراديد الإيزونتروبية *Isentropic Efficiencies*. يعطى المردود الإيزونتروبي للمضخة بالعلاقة

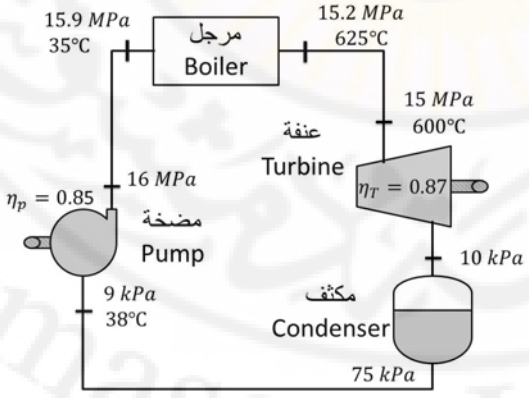
$$\eta_P = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \qquad (7\text{-}4)$$

أما المردود الإيزونتروبي للعنفة التوربينية فيعطى بالعلاقة

$$\eta_T = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \qquad (8\text{-}4)$$

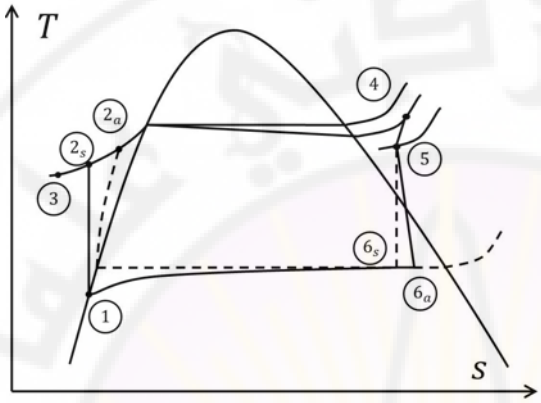
حيث تعبر الحالات (2a) و (4a) عن الحالة الحقيقية للبخار الخارج من المضخة والعنفة التوربينية على الترتيب في دورة رانكين الحقيقية والحالات (2s) و (4s) تعبر عن الحالة الإيزونتروبية للبخار الخارج من المضخة والعنفة التوربينية على الترتيب في دورة رانكين المثالية البسيطة.

<u>مثال تطبيقي 4−2 − دورة رانكين الحقيقية.</u>



تعمل دورة رانكين على توليد طاقة كهربائية كما في الشكل المرفق. فإذا كان المردود الإيزونتروبي للعنفة التوربينية هو 87 بالمئة وللمضخة 85 بالمئة، حدد 1) المردود الحراري للدورة و2) الطاقة المولدة في هذه الدورة عندما يكون التدفق

الكتلي $(15\ kg/s)$.



الفرضيات 1) كافة العناصر تعمل بشكل مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: يبين الشكل درجات الحرارة والضغوط لوسيط التشغيل ضمن الدورة في مختلف النقاط.

1) المردود الحراري للدورة هو النسبة بين العمل المفيد إلى كمية الحرارة المضافة في المرجل وبالتالي

$$\eta_{th,act} = \frac{w_{net}}{q_{in}}$$

العمل الصافي يعطى بالعلاقة

$$w_{net} = w_{turb,out} - w_{pump,in}$$

$$w_{pump,in} = \frac{w_{s,pump,in}}{\eta_p} = \frac{v_1(P_2 - P_1)}{\eta_P}$$

$$w_{pump,in} = \frac{(0.001009\ m^3/kg)[(16000 - 9)kPa]}{0.85}\left(\frac{1\ kJ}{1\ kPa\ m^3}\right)$$

$$w_{pump,in} = 19.0\ kJ/kg$$

$$w_{turb,out} = \eta_T * w_{s,turb,out} = \eta_T * (h_5 - h_{6s})$$

$$w_{turb,out} = 0.87 * (3583.1 - 2115.3)$$

$$w_{turb,out} = 1277.0\ kJ/kg$$

$$w_{net} = 1277.0 - 19.0$$

$$w_{net} = 1258.0\ \frac{kJ}{kg}$$

كمية الحرارة المضافة في المرجل هي

$$q_{in} = h_4 - h_3 = 3647.6 - 160.1$$

$$q_{in} = 3487.5\ \frac{kJ}{kg}$$

وبالتعويض في علاقة المردود الحراري للدورة نجد أن

$$\eta_{th,act} = \frac{1258.0}{3487.5} = 0.361 \text{ او } 36.1\%$$

2) الطاقة المولدة ضمن العنفة هي

$$\dot{W} = \dot{m} * w_{net} = 15\ \frac{kg}{s} * 1258.0\ \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{W} = 18.9\ MW$$

مناقشة: مردود الدورة المثالية (من دون ضياعات) هو 43 بالمئة وهو أكبر من المردود الحراري للدورة الحقيقية والذي هو 36.1 بالمئة.

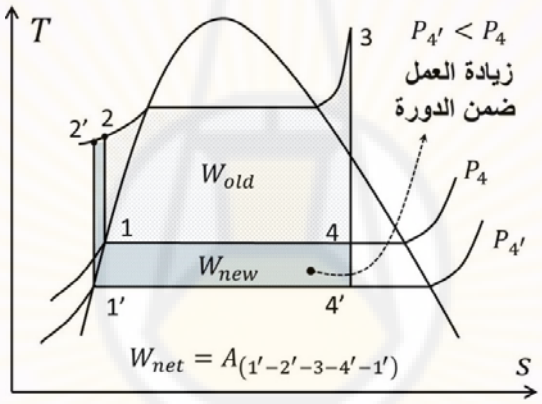
5.4 **كيفية زيادة مردود دورة رانكين.**

إن محطات توليد الطاقة البخارية هي المسؤولة عن توليد معظم الطاقة الكهربائية في العالم، لذلك فإن أي تحسين في مردود هذه الدورات يؤدي إلى التقليل من استهلاك الوقود (العضوي أو الغاز الطبيعي) المستخدم في المرجل وبالتالي نتائج ممتازة على البيئة. يمكن أن نحسن من مردود الدورة إما عن طريق 1) رفع درجة الحرارة الوسطية (حرارة غليان) لوسيط التشغيل أو 2) تخفيض درجة الحرارة الوسطية (حرارة

التكاثف) التي من أجلها يتم طرح الحرارة إلى الوسط الخارجي. تؤدي الطريقتان السابقتان إلى زيادة مساحة الدورة على مخطط $(T-S)$ وبالتالي إلى زيادة العمل المفيد. لنناقش بعض الطرق التي من أجلها يمكن زيادة مردود دورة رانكين المثالية.

1.5.4 تخفيض ضغط المكثف (تخفيض درجة الحرارة الوسيطة للمكثف).

من أجل توضيح تأثير تخفيض ضغط المكثف نقوم بتثبيت درجة حرارة البخار المحمص الداخل إلى العنفة التوربينية الموافق للنقطة (3) كما هو في الشكل (7−4).



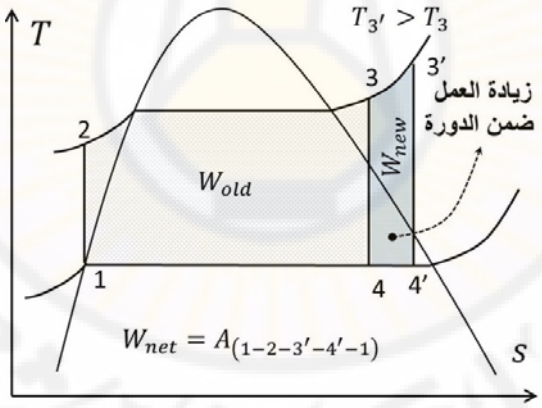
الشكل (7−4) تأثير تخفيض ضغط المكثف في دورة رانكين.

نلاحظ أن العمل قد زاد بالقيمة (W_{new}) نتيجة تخفيض ضغط المكثف من (P_4) إلى $(P_{4'})$ والموضحة في الشكل بالمساحة المهشرة $(1-4-4'-1'-2'-2-1)$. نلاحظ أيضاً أن كمية الحرارة المضافة في المرجل قد زادت من (2) إلى $(2')$ ولكن هذه الزيادة صغيرة جدا. يجب التنبيه إلى أننا لايمكن أن نخفض الضغط في الدورة إلى **أقل** من ضغط إشباع وسيط التبريد في المكثف فمثلا إذا كانت مياه نهر ما هي وسيط التبريد المستخدم في دورة رانكين ذات درجة الحرارة (15℃) وباعتبار أن التبادل الحراري بين وسيط التشغيل (البخار) وسيط التبريد (ماء النهر) يتم بفرق (10℃) فيجب أن تكون

درجة حرارة البخار أكبر من (25℃) وبالتالي الضغط الموافق لدرجة الحرارة البخار الموجود في المكثف يجب أن يكون ($3.2\ kPa$). تخفيض الضغط في المكثف له مساوئ أيضاً مثل تسرب الهواء إلى حجرة المكثف وانحفاظ نسبة كسر الجفاف *Quality* أي ارتفاع قطرات الماء في المزيج من النقطة (4) إلى النقطة ($4'$) بالتالي انخفاض مردود العنفة وتآكل شفرات العنفة بفعل ظاهرة التكهف *Cavitation*.

2.5.4 تحميص البخار إلى درجات حرارة مرتفعة (رفع درجة الحرارة الوسطية للمرجل).

يمكن أيضاً أن نحسن من مردود الدورة برفع درجة حرارة البخار المحمص والخارج من المرجل إلى درجات حرارة مرتفعة من دون أن نغير في ضغطه كما هو ظاهر في الشكل (8–4).



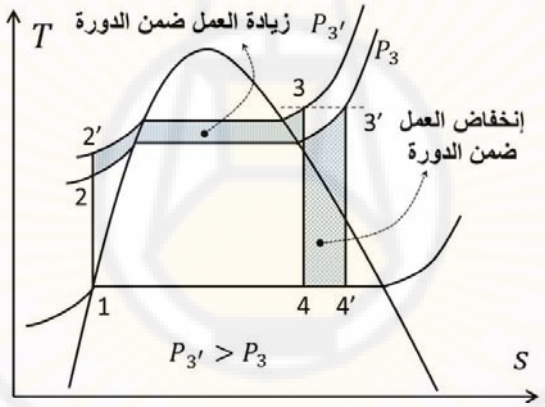
الشكل (8–4) تأثير تحميص البخار إلى درجات عالية في دورة رانكين.

يبين الشكل حالة تحميص البخار من النقطة (3) إلى النقطة ($3'$) ذات درجات الحرارة المرتفعة. تمثل المساحة المهشرة ($3-4-4'-3'-3$) الزيادة في كمية الحرارة المطلوبة من المرجل لرفع مردود الدورة. نلاحظ أيضا أن رفع درجة حرارة البخار

المحص يقلل أيضاً من نسبة كسر الجفاف *Quality* كما هو ظاهر بالشكل من النقطة (4) إلى النقطة (4′). إن الارتفاع في درجة حرارة البخار المحمص هو تابع لخواص معدن شفرات العنفة وأعلى درجة حرارة محققة في هذه الدورات هي (620℃).

3.5.4 زيادة ضغط المرجل (رفع درجة الحرارة الوسطية للمرجل).

الطريقة الأخرى لرفع درجة حرارة البخار المحمص هي رفع ضغط المرجل مما يؤدي إلى رفع في درجة حرارة الغليان ضمن المرجل وبالتالي تحسين مردود الدورة كما في الشكل (9–4).



الشكل (9–4) تأثير زيادة ضغط المرجل في دورة رانكين.

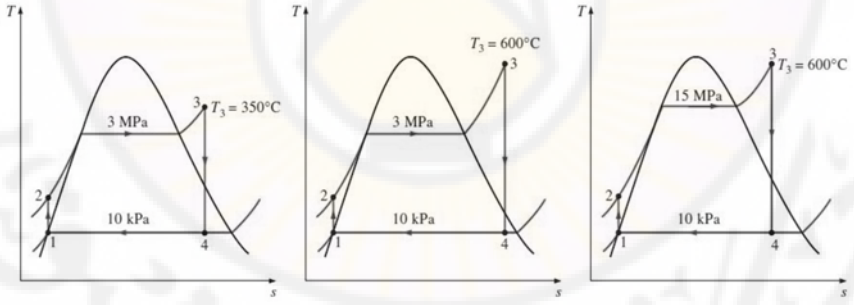
نلاحظ من الشكل أنه مع ثبات درجة حرارة الدخول إلى العنفة تتحرك الدورة باتجاه اليسار وبالتالي تزداد مضمون الرطوبة في البخار (يقل كسر الجفاف). يمكن التخلص من هذه الظاهرة بإعادة تسخين *Reheating* البخار عند مرحلة معينة وهنا تقسم العنفة إلى مرحلتين بضغط مرتفع *High Pressure (HP) Turbine* وبضغط منخفض *Low Pressure (LP) Turbine*. إرتفعت ضغوط المرجل بشكل تدريجي على مدى السنوات من

($2.7\ MPa$) في عام 1922 إلى أكثر من ($30\ MPa$) في يومنا هذا لتنتج طاقة أكبر من ($1000\ MW$). في يومنا هذا تعمل محطات توليد الطاقة البخارية على ضغوط ($P > 22.06\ MPa$) وبمردود حراري يصل إلى 40% لمحطات الوقود الإحفري و34% لمحطات الوقود النووي.

مثال تطبيقي 4–3 – تأثير ضغط المرجل و الحرارة على المردود.

تعمل محطة توليد الطاقة الكهربائية على دورة رانكين المثالية البسيطة، يدخل البخار إلى العنفة بضغط ($3\ MPa$) وبدرجة حرارة (350°C) ويكثف بضغط ($10\ kPa$). احسب 1) المردود الحراري لهذه المحطة 2) المردود الحراري في حال تم تحميص البخار إلى درجة حرارة (600°C) و3) المردود الحراري في حال رفعنا ضغط المرجل إلى ($15\ MPa$) مع بقاء درجة حرارة البخار المحمص (600°C).

التحليل: يظهر الشكل دورة رانكين في مختلف الفرضيات



1) لتحديد المردود الحراري للدورة يجب أولاً تحديد إنتالبي كافة نقاط الدورة وباستخدام جداول بخار الماء.

الحالة (1) – دخول المضخة

من جداول الإشباع بدلالة الضغط نجد أن بارامترات النقطة (1) هي

$$P_1 = 10\ kPa\ , Sat\ Liquid$$

$$\boldsymbol{h_1 = h_{f@10kPa} = 191.81\ {}^{kJ}/_{kg}} \quad , \quad v_1 = v_{f@10kPa} = 0.00101\ {}^{m^3}/_{kg}$$

الحالة (2) – دخول المرجل

$$P_2 = 3\ MPa\ , \qquad s_2 = s_1$$

$$w_{pump,in} = v(P_2 - P_1) = \left(0.00101 \frac{m^3}{kg}\right) * ([3000 - 10]kpa)\left(\frac{1\ kJ}{1\ kPa * m^3}\right)$$

$$w_{pump,in} = 3.02\ \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 = h_1 + w_{pump,in}$$

$$\boldsymbol{h_2 = (191.81 + 3.02) = 194.83\ \frac{kJ}{kg}}$$

الحالة (3) – دخول العنفة

$$P_3 = 3\ MPa\ , T_3 = 350℃$$

حالة الوسيط هي بخار محمص

$$\boldsymbol{h_3 = 3116.1\ {}^{kJ}/_{kg}} \quad , \quad s_3 = 6.7450\ {}^{kJ}/_{kg.K}$$

الحالة (4) – دخول المكثف

$$P_4 = 10\ kPa\ (sat\ mix)\ , s_4 = s_3$$

في هذه الحالة يكون لدينا خليط من البخار والماء وبالتالي يجب أن نحسب كسر الجفاف

$$\aleph_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6.745 - 0.6492}{7.4996} = 0.8128$$

$$\boldsymbol{h_4} = h_f + \aleph_4 h_{fg} = 191.81 + 0.8128 * 2392.1 = \boldsymbol{2136.1\ {}^{kJ}/_{kg}}$$

وبالتالي فإن

$$q_{in} = h_3 - h_2 = 3116.1 - 194.83 = 2921.3\ \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = 2136.1 - 191.81 = 1944.3\ \frac{kJ}{kg}$$

ونجد أن مردود دورة رانكين هي

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{1944.3}{2921.3}$$

$$\eta_{th} = 0.334 \text{ أو } 33.4\%$$

نلاحظ أن المردود الحراري ارتفع من 26% (مثال تطبيقي 4-1 عندما كان ضغط المكثف $75\ kPa$) إلى 33.4% وكسر الجفاف انخفض من 88.6 (في المثال التطبيقي 4-1) إلى 81.3 بالمئة (أي أن مضمون الرطوبة *Moisture Content* ازدادت من 11.4 إلى 18.7 بالمئة).

2) المردود الحراري عندما ترتفع درجة حرارة البخار المحمص. تبقى الحالة (1) و(2) كما هي من الطلب السابق

الحالة (3) – دخول العنفة

$$P_3 = 3\ MPa\ , T_3 = 600℃$$

يبقى وسيط التشغيل في حالة تحميص ومن الجداول نجد أن

$$\boldsymbol{h_3 = 3682.8\ {}^{kJ}/_{kg}}\ ,\ s_3 = 7.5103\ {}^{kJ}/_{kg.K}$$

الحالة (4) – دخول المكثف

$$P_4 = 10\ kPa\ (sat\ mix)\ , s_4 = s_3$$

في هذه الحالة يكون لدينا خليط من البخار والماء وبالتالي يجب أن نحسب كسر الجفاف

$$\aleph_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} = \frac{7.5103 - 0.6492}{7.4996} = 0.915$$

$$\boldsymbol{h_4} = h_f + \aleph_4 h_{fg} = 191.81 + 0.915 * 2392.1 = \boldsymbol{2380.3\ {}^{kJ}/_{kg}}$$

وبالتالي فإن

$$q_{in} = h_3 - h_2 = 3682.8 - 194.83 = 3488.0 \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = 2380.3 - 191.81 = 2188.5 \frac{kJ}{kg}$$

ونجد أن مردود دورة رانكين هي

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{2188.5}{3488.0}$$

$$\eta_{th} = 0.373 \text{ أو } 37.3\%$$

نلاحظ أن المردود الحراري ارتفع من 33.4% إلى 37.3% نتيجة ارتفاع درجة حرارة البخار المحمص وأما كسر الجفاف فارتفع من 81.3 إلى 91.5 بالمئة (أي أن مضمون الرطوبة *Moisture Content* انخفض من 18.7 إلى 8.5 بالمئة).

3) المردود الحراري عند رفع الضغط في المرجل. تبقى الحال (1) كما هي

الحالة (2) – دخول المرجل

$$P_2 = 15\ MPa\ , \quad s_2 = s_1$$

$$\boldsymbol{h_2 = 206.95\ \frac{kJ}{kg}}$$

الحالة (3) – دخول العنفة

$$P_3 = 15\ MPa\ , T_3 = 600℃$$

$$\boldsymbol{h_3 = 3583.1\ {}^{kJ}/_{kg}}$$

الحالة (4) – دخول المكثف

$$P_4 = 10\ kPa\ (sat\ mix)\ , s_4 = s_3$$

في هذه الحالة يكون لدينا خليط من البخار والماء وبالتالي يجب أن نحسب كسر الجفاف

$$\aleph_4 = 0.804$$

$$h_4 = 2115.3\ {}^{kJ}/_{kg}$$

وبالتالي فإن

$$q_{in} = h_3 - h_2 = 3583.1 - 206.95 = 3376.2\ \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = 2115.3 - 191.81 = 1923.5\ \frac{kJ}{kg}$$

ونجد أن مردود دورة رانكين هي

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{1923.5}{3376.2}$$

$$\eta_{th} = 0.43 \text{ أو } 43\%$$

نلاحظ أن المردود الحراري ارتفع من 37.3% إلى 43% نتيجة ارتفاع ضغط المرجل وأما كسر الجفاف فانخفض من 91.5 إلى 80.4 بالمئة (أي ان مضمون الرطوبة *Moisture Content* زاد من 8.5 إلى 19.6 بالمئة).

6.4 دورة رانكين المثالية مع التسخين البيني المثالي *The Ideal Reheat Rankine Cycle*.

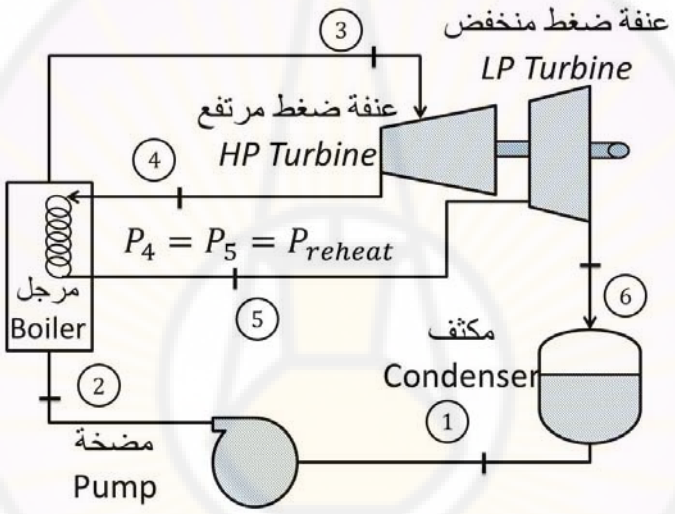
إن ارتفاع الضغط في المرجل يرفع من مردود دورة رانكين المثالية البسيطة ولكن يزيد من مستوى مضمون الرطوبة في البخار الداخل إلى العنفة والسؤال الذي يجب أن نطرحه هو

"كيف يمكن الاستفادة من زيادة مردود الدورة برفع الضغط في المرجل من دون مواجهة مشاكل الرطوبة الزائدة عند خروج البخار من العنفة"

هناك إحتمالان يمكن التفكير بهما

أ) تحميص البخار إلى درجات حرارة عالية قبل دخوله إلى العنفة وبالتالي رفع مردود الدورة. في هذا الحل يجب الاهتمام بمستوى درجات الحرارة التي نرفع فيها البخار لأن ذلك قد يؤثر في معدن شفرات العنفة وبالتالي إلى إهترائها.

ب) تمدد البخار في العنفة على مرحلتين وإعادة تسخينه بين هاتين المرحلتين وهو الحل المناسب.



الشكل (10–4) عناصر دورة رانكين المثالية البسيطة مع تسخين بيني مثالي.

يبين الشكل (10–4) دورة رانكين المثالية البسيطة مع تسخين بيني مثالي والتي تحتوي على عنفة بمرحلتين. تسمى العنفة الأولى بعنفة الضغط العالي *High Pressure (HP) Turbine* وتسمى العنفة الثانية بعنفة الضغط المنخفض *Low Pressure (LP) Turbine*.

يتمدد البخار بشكل إيزونتروبي إلى ضغوط متوسطة في العنفة الأولى ويعاد إلى المرجل ليسخن مرة أخرى إلى نفس درجة حرارة البخار الذي يدخل العنفة الأولى. تسمى هذه المرحلة بعملية التسخين البيني المثالي *Ideal Reheat*. يتمدد البخار الخارج من المرجل بعد عملية التسخين في العنفة الثانية بشكل إيزونتروبي إلى ضغط المكثف. كمية الحرارة

المضافة إلى وسيط التشغيل وعمل العنفة المفيد لدورة رانكين المثالية البسيطة مع تسخين بيني مثالي يكون على النحو التالي

$$q_{in} = q_{primary} + q_{reheat}$$

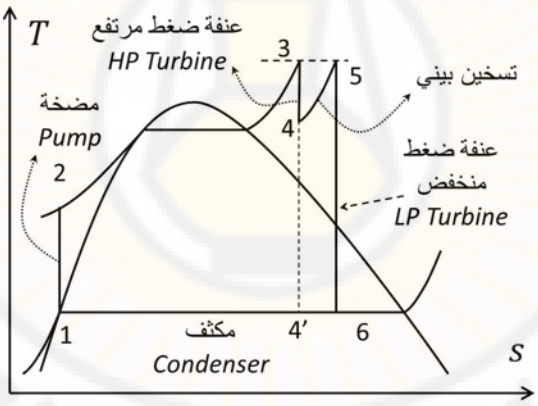
أي أن

$$q_{in} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{9-4}$$

$$w_{turb,out} = w_{turb,HP} + w_{turb,LP}$$

أي أن

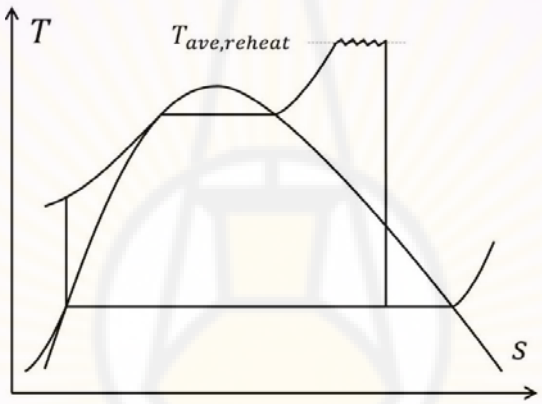
$$w_{turb,out} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \ \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{10-4}$$



الشكل (11–4) دروة رانكين المثالية مع مرحل من التسخين البيني على مخطط ($T - s$).

يبين الشكل (11–4) دورة رانكين مع إعادة تسخين وسيط التشغيل على مخطط ($T - S$). تمثل العملية (4 – 3) عملية تمدد وسيط التشغيل في العنفة الأولى وتمثل العملية (6 – 5) عملية تمدد وسيط التشغيل بعد التسخين البيني المثالي في العنفة الثانية. تمثل

العملية (5 – 4) عملية التسخين البيني المثالي للبخار بعد خروجه من العنفة الأولى ودخوله إلى العنفة الثانية. نلاحظ إلى أن كسر الجفاف يزداد مع التسخين البيني المثالي من النقطة (4′) إلى النقطة (6). إن استخدام عملية التسخين البيني ولمرة واحدة في الدورة يزيد من مردود الدورة بمقدار 4 إلى 5 بالمئة وبالتالي زيادة مراحل التسخين البيني المثالي إلى عدد كبير يؤدي إلى الوصول إلى حالة إيزوثرمية ولكنه غير عملي كما هو واضح بالشكل (12–4).

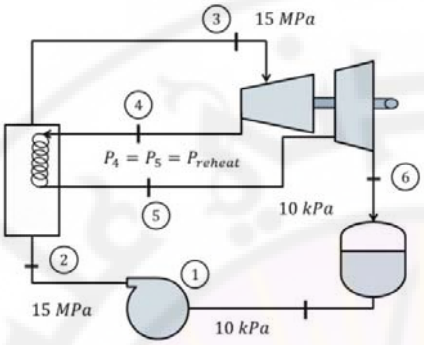


الشكل (12–4) دورة رانكين مع عدد كبير من مراحل تسخين بيني على مخطط $(T - s)$.

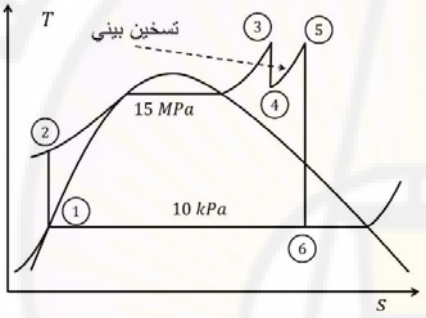
<u>مثال تطبيقي 4–4 دورة رانكين المثالية مع تسخين بيني.</u>

يدخل بخار ماء في دورة رانكين المثالية البسيطة مع تسخين بيني مثالي إلى العنفة الأولى ذات الضغط العالي بضغط وقدره ($15\ MPa$) ودرجة حرارة (600℃) ويكثف بضغط ($10\ kPa$). بفرض أن مضمون الرطوبة المزيج الخارج من العنفة الثانية لايتجاوز 10.4 بالمئة حدد 1) ضغط البخار الذي يجب أن نسخنه 2) ومردود الدورة مع فرض أن درجة حرارة دخول البخار إلى العنفات متساوية.

الفرضيات: كافة العناصر تعمل بشكل مستقر والطاقة الحركية والطاقة الكامنة مهملة.



التحليل: يبين الشكل درجات الحرارة والضغوط لوسيط التشغيل ضمن الدورة في مختلف النقاط.



1) لايوجد انخفاض في الضغط في المرجل والمكثف. العنفة والمضخة تعملان بشكل إيزونتروبي. بارامترات النقطة (6) عند دخول المكثف

$$P_6 = 10\ kPa\ ;\quad ﺀ_6 = 0.896\ (sat\ mix)$$

$$s_6 = s_f + ﺀ_6 s_{fg} = 0.6492 + 0.896 * 7.4996$$

$$s_6 = 7.3688\ \frac{kJ}{kg\ K}$$

$$h_6 = h_f + ﺀ_6 h_{fg} = 191.81 + 0.896 * 2392.1$$

$$\boldsymbol{h_6 = 2335.1\ \frac{kJ}{kg}}$$

بارامترات النقطة (5) عند دخول العنفة الثانية

$$T_5 = 600℃, \qquad s_6 = s_5$$

$$P_5 = 4.0\ MPa, \quad \boldsymbol{h_5 = 3674.9\ kJ/kg}$$

من المعادلة الأخيرة نجد أن ضغط دخول البخار إلى العنفة الثانية يجب أن يكون $4.0\ MPa$ أو اقل ليكون مضمون الرطوبة أقل من 10.4 بالمئة.

2) يحسب مردود الدورة من معرفة كافة بارامترات النقاط المشكلة للدورة

الحالة (1) - دخول المضخة – من جداول الإشباع بدلالة الضغط نجد أن

$$P_1 = 10\ kPa\ , Sat\ Liquid$$

$$\boldsymbol{h_1 = h_{f@10kPa} = 191.91\ {kJ}/{kg}}\ ,$$

$$v_1 = v_{f@10kPa} = 0.00101\ {m^3}/{kg}$$

الحالة (2) – دخول المرجل

$$P_2 = 15\ MPa\ , \qquad s_2 = s_1$$

$$w_{pump,in} = v(P_2 - P_1)$$

$$w_{pump,in} = \left(0.00101 \frac{m^3}{kg}\right) * ([15000 - 10]kpa)\left(\frac{1\ kJ}{1\ kPa * m^3}\right)$$

$$w_{pump,in} = 15.14\ \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 = h_1 + w_{pump,in}$$

$$h_2 = (191.81 + 15.14)$$

$$\boldsymbol{h_2 = 206.95\ \frac{kJ}{kg}}$$

الحالة (3) – دخول العنفة الأولى

$$P_3 = 15\ MPa\ , T_3 = 600℃$$

$$\boldsymbol{h_3 = 3583.1\ {kJ}/{kg}}\ ,\ s_3 = 6.6796\ {kJ}/{kg.K}$$

الحالة (4) – دخول التسخين البيني

$$P_4 = 4\ MPa\ \ , s_4 = s_3$$

$$\boldsymbol{h_4 = 3155.0\ {}^{kJ}/_{kg}}\ \ ,\ \ T_4 = 375.5℃$$

وبالتالي فإن

$$q_{in} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$

$$q_{in} = 3896.1\ \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{out} = h_6 - h_1$$

$$q_{out} = 2143.3\ \frac{kJ}{kg}$$

ونجد أن مردود دورة رانكين هي

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{2143.3}{3896.1} \eta_{th} = 0.45 \text{ أو } 45\%$$

7.4 دورة رانكين المثالية مع مسترجع مثالي *The Ideal Regenerative Rankine Cycle.*

نلاحظ من دورة رانكين المثالية البسيطة والموضحة في الشكل (13−4) أن عملية انتقال الحرارة إلى وسيط التشغيل خلال العملية $(2 - 2')$ تكون محسوسة *Sensible Heat* وبدرجة حرارة منخفضة وهذا يقلل من مردود الدورة. لمعالجة هذه المشكلة نلجأ إلى طرائق لتحسين درجة حرارة الماء المشبع الخارج من المضخة قبل أن يدخل إلى المرجل ومحاولة رفع درجة حرارته.

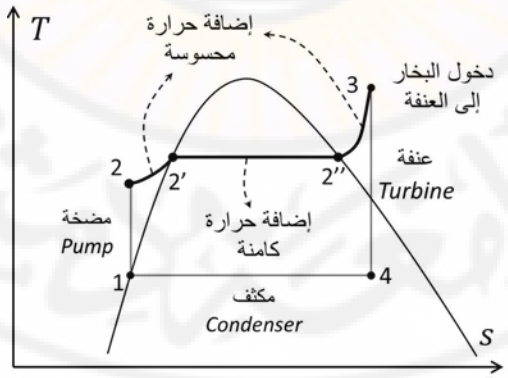
من الطرائق المستخدمة في رفع درجة حرارة الماء المشبع الداخل إلى المرجل هي استخدام مبادل حراري عكوس *Counter-flow Heat Exchanger* موجود ضمن العنفة يعمل على استرجاع *Regeneration* كمية معينة من حرارة البخار الخارج من

العنفة. هذا الحل غير عملي لأنه صعب التصميم و يزيد من مضمون الرطوبة للبخار في العنفة. يسهم الاسترجاع في

1) رفع من مردود دورة رانكين المثالية.

2) يساعد على طرد الغازات العالقة أو المنحلة في الماء المشبع الخارج من المضخة والذي يساعد على اهتراء المرجل.

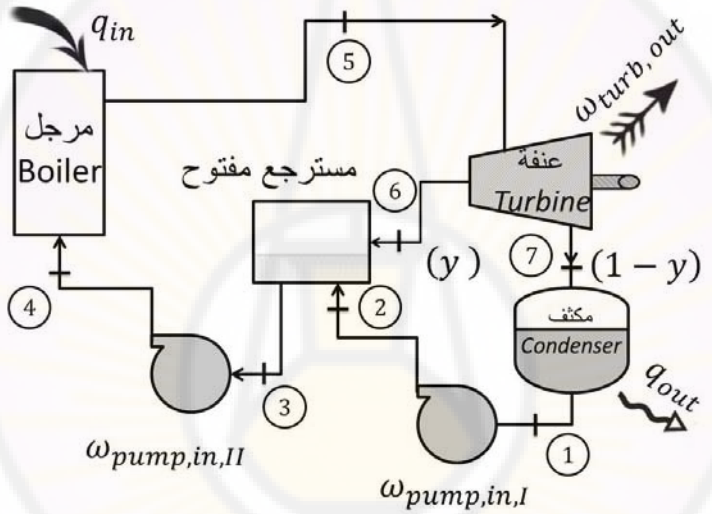
عملية الاسترجاع *Regeneration* في محطات توليد الطاقة تتحقق من خلال سحب أو استنزاف *Bleeding* البخار من نقاط مختلفة في العنفة وطرح المحتوى الحراري لكمية وسيط التشغيل المستنزف في مبادل حراري. هذا المبادل الحراري والذي يستعمل لاسترجاع الحرارة من البخار يسمى بالمسترجع *Regenerator* أو بمسخن مياه التغذية *Feedwater Heater (FWH)*. المسترجع هو عبارة عن مبادل حراري تنتقل فيه الحرارة من البخار المستنزف من العنفة إلى كمية من المياه الموجودة ضمن هذا المبادل. تكون عملية تبادل الحرارة إما بشكل مزج مباشر للبخار ومياه التغذية القادمة من المكثف ويسمى بالمسترجع المفتوح *Open Feedwater Heater* أو بشكل غير مباشر مثل المبادلات الأنبوبية المغلقة *Tube Heat Exchangers* ويسمى بالمسترجع المغلق *Closed Feedwater Heater*.



الشكل (13–4) دورة رانكين المثالية على مخطط $(T-s)$.

1.7.4 المسترجع المفتوح *Open Feedwater Heaters (Open FWH)*.

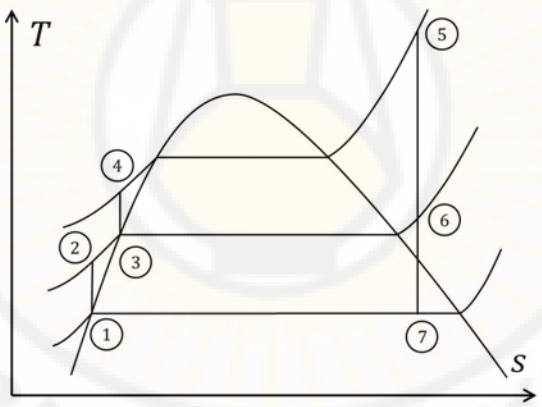
يبين الشكل (14–4) عناصر دورة رانكين المثالية البسيطة مع مسترجع مفتوح. تكون كمية البخار المستنزف من العنفة في عملية الاستنزاف بضغط ودرجة حرارة معينة وبكمية بالنسبة إلى واحد كيلوغرام قدرها (y, kg). كمية وسيط التشغيل الباقي بعد الاستنزاف والذي يخرج من العنفة يدخل إلى مرحلة التكثيف هي $(1 - y, kg)$.



الشكل (14–4) عناصر دورة رانكين المثالية مع مسترجع مفتوح.

يسمى هذا النوع من المسترجعات بالمسترجع المفتوح وقد يكون في بعض الحالات أحادي المرحلة *Single Stage Regenerative Cycle*. يعتمد المسترجع المفتوح على خلط مباشر للبخار القادم من العنفة والموافق للنقطة (6) والماء المشبع القادم من المضخة والموافق للنقطة (2) ضمن حجرة واحدة. يدخل المزيج والموافق للنقطة (3) إلى المرجل سائلاً مشبعاً عند النقطة (4). يبين الشكل (15–4) دورة رانكين المثالية البسيطة مع مسترجع مفتوح على مخطط $(T - S)$. يدخل البخار إلى العنفة في النقطة (5) ويتمدد

إيزونتروبياً حتى ضغوط متوسطة في النقطة (6). عند النقطة (6) يتم استنزاف كمية من البخار إلى المسترجع ويستمر باقي البخار في التمدد ضمن العنفة إلى النقطة (7). يخرج المزيج من المكثف بحالة ماء مشبع عند ضغط المكثف في النقطة (1). الماء الخارج من المكثف يسمى الماء المغذي *Feed-water*. تقوم المضخة الأولى بعمل إيزونتروبي وتضغط الماء إلى ضغط المسترجع عند النقطة (2) ويمتزج هذا الماء المغذي مع البخار المستنزف من العنفة ويخرج من المسترجع في النقطة (3). كمية البخار المستنزف من العنفة والمحول إلى المسترجع تتوافق مع بقاء حالة الماء الخارج من المسترجع مشبعاً. تقوم المضخة الثانية برفع ضغط الماء المشبع إلى ضغط المرجل عند النقطة (4). يتم تسخين الماء المشبع إلى بخار محمص كما في الحالة (5) وعندها تُستكمل الدورة.



الشكل (15−4) دورة رانكين المثالية مع مسترجع مفتوح على مخطط ($T - s$).

يعبر عن كمية الحرارة والعمل المفيد من هذه الدورة ولمسترجع واحد النوعية بالشكل

$$q_{in} = h_5 - h_4 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{11-4}$$

$$q_{out} = (1-y)(h_7 - h_1) \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{12-4}$$

$$w_{turb,out} = (h_5 - h_6) + (1-y)(h_6 - h_7) \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{13-4}$$

$$w_{pump,in} = (1-y) * w_{pump,in,I} + w_{pump,in,II} \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{14-4}$$

حيث

$$w_{pump,in,I} = v_1(P_2 - P_1)$$

$$w_{pump,in,II} = v_3(P_4 - P_3)$$

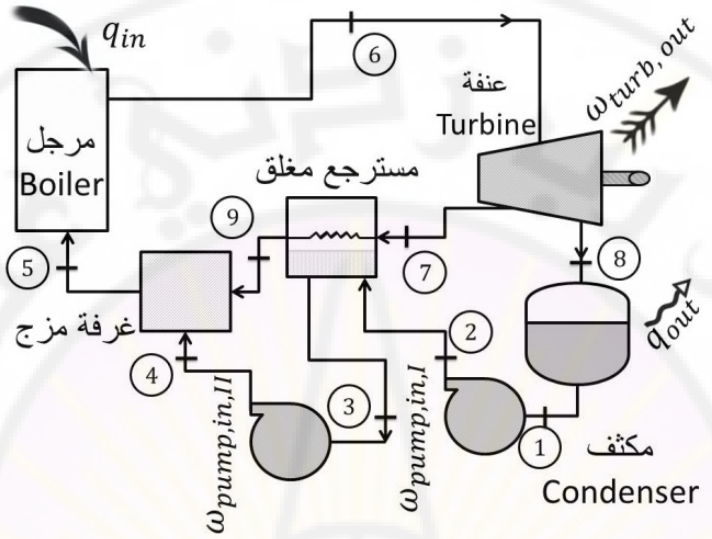
تحسب قيمة الاستنزاف من العلاقة

$$y = \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_5}$$

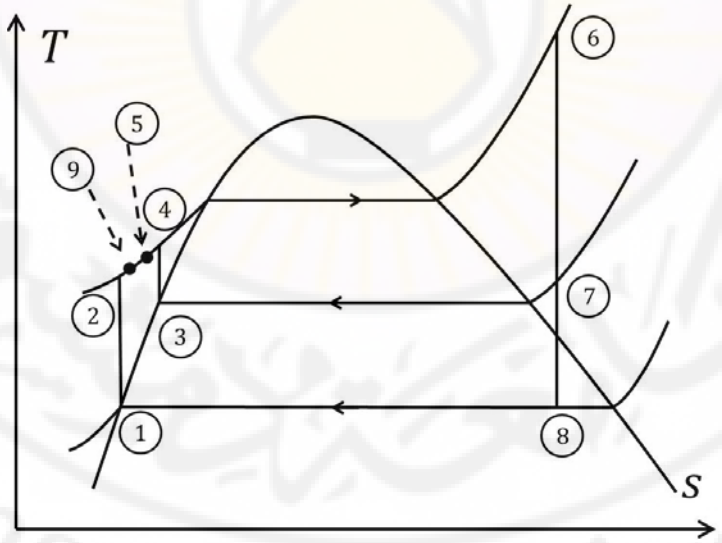
نلاحظ أن مردود الدورة يزداد عند استعمال مسترجع مثالي ويزداد أيضا مع زيادة عدد المسترجعات ضمن الدورة ففي بعض الدارات يمكن أن نشاهد ثمانية مسترجعات. العامل الذي يحدد عدد المسترجعات التي يمكن استخدامها في الدورة الجانب الاقتصادي من استخدامها.

2.7.4 المسترجع المغلق *(Closed Feedwater Heaters (Closed FWH.*

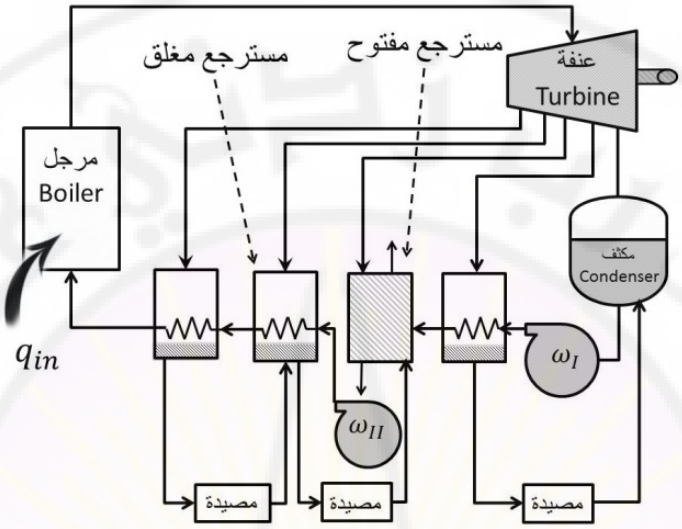
يبين الشكل (4−16) عناصر دورة رانكين المثالية مع مسترجع مغلق. يتم تبادل الحراري ضمن هذا المستجع بفعل التوصيل *Conduction* والتحميل *Convection* وبضغوط مختلفة ولايتم خلط الوسيطين المستنزفين من العنفة وماء التغذية (مياه المضخة الأولى). يبين الشكل (4−17) دورة رانكين المثالية مع مسترجع مغلق على مخطط $(T-s)$. في بعض الدورات نقوم بالمزج بين مسترجعات مفتوحة ومغلقة لتحسين مردود دورة رانكين المثالية كما في الشكل (4−18).



الشكل (4–16) دورة رانكين المثالية مع مسترجع مغلق.

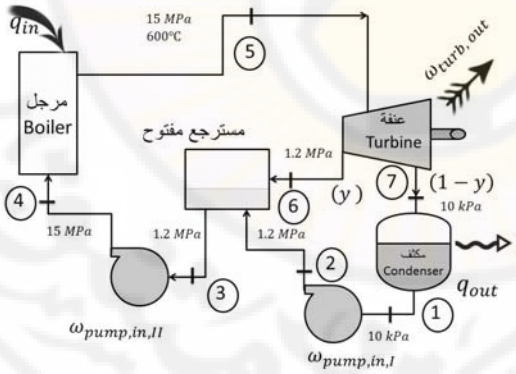


الشكل (4–17) دورة رانكين المثالية مع مسترجع مغلق على مخطط $(T - s)$.



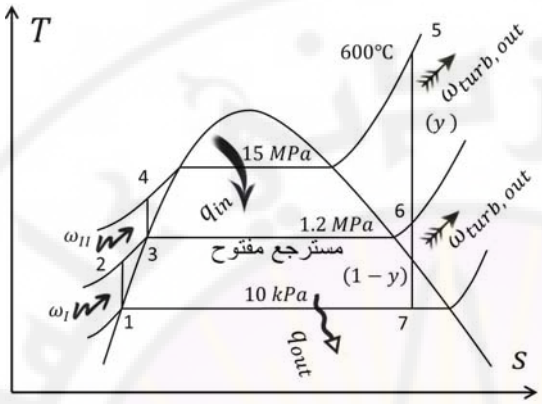
الشكل (18−4) دورة رانكين المثالية مع خليط من المسترجعات.

مثال تطبيقي 4−5 – دورة رانكين المثالية مع مسترجع مفتوح



يدخل بخار ماء إلى عنفة توربينية، كما في الشكل المرفق، في دورة رانكين المثالية مع مسترجع مفتوح بضغط $(15\ MPa)$ ودرجة حرارة (600°C) ويتكاثف بعد خروجة عند ضغط $(10\ kPa)$. يستنزف كمية من البخار من العنفة إلى مسترجع مفتوح بضغط $(1.2\ MPa)$. حدد كمية البخار المستنزفة ومردود الدورة.

الفرضيات 1) كافة العناصر تعمل بشكل مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.



التحليل: يبين الشكل السابق دورة رانكين المثالية مع مسترجع مفتوح. تعمل العنفة والمضخة بشكل إيزونتروبي ولا يوجد انخفاض في الضغط في المكثف والمرجل والمسترجع المفتوح. يخرج البخار من المسترجع بشكل ماء مشبع. نقوم بتحديد بارامترات كل نقطة من الدورة.

الحالة (1) - دخول المضخة الأولى

من جداول الإشباع بدلالة الضغط نجد أن

$$P_1 = 10\ kPa\ , Sat\ Liquid$$

$$\boldsymbol{h_1 = h_{f@10kPa} = 191.81\ {}^{kJ}/_{kg}}\ ,$$

$$v_1 = v_{f@10kPa} = 0.00101\ {}^{m^3}/_{kg}$$

الحالة (2) – دخول المسترجع المفتوح من المضخة الأولى

$$P_2 = 1.2\ MPa\ , \qquad s_2 = s_1$$

$$w_{pump,in,I} = v_1(P_2 - P_1)$$

$$w_{pump,in,I} = \left(0.00101 \frac{m^3}{kg}\right)[(1200 - 10)kPa]\left(\frac{1\ kJ}{1\ kPa\ m^3}\right)$$

$$w_{pump,in,I} = 1.2\ \frac{kJ}{kg}$$

$$\boldsymbol{h_2} = h_1 + w_{pump,in,I} = (191.81 + 1.20) = \boldsymbol{193.01\ \frac{kJ}{kg}}$$

الحالة (3) – دخول المضخة الثانية

$$P_2 = P_3 = 1.2\ MPa\ , Sat\ Liquid$$

$$\boldsymbol{h_3 = h_{f@1.2kPa} = 798.33\ {}^{kJ}/_{kg}}\ ,$$

$$v_3 = v_{f@1.2kPa} = 0.001138\ {}^{m^3}/_{kg}$$

الحالة (4) دخول المرجل

$$P_4 = 15\ MPa\ , \qquad s_4 = s_3$$

$$w_{pump,in,II} = v_3(P_4 - P_3)$$

$$= \left(0.001138 \frac{m^3}{kg}\right)[(15000 - 1200)kPa]\left(\frac{1\ kJ}{1\ kPa\ m^3}\right)$$

$$w_{pump,in,II} = 15.70\ \frac{kJ}{kg}$$

$$\boldsymbol{h_4 = h_3 + w_{pump,in,II} = (798.33 + 15.70) = 814.03\ \frac{kJ}{kg}}$$

الحالة (5) دخول العنفة

$$P_5 = 15\ MPa\ , T_5 = 600℃$$

$$\boldsymbol{h_5 = 3583.1\ {}^{kJ}/_{kg}}\ ,\ s_5 = 6.6796\ {}^{kJ}/_{kg.K}$$

الحالة (6) – دخول المسترجع المفتوح من العنفة

$$P_6 = 1.2\ MPa\ , \qquad s_6 = s_5$$

$$\boldsymbol{h_6 = 2860.2\ {}^{kJ}/_{kg}}\ ,\ T_6 = 218.4℃$$

الحالة (7) – دخول المكثف

$$P_7 = 10\ kPa\ (sat\ mix)\ , s_7 = s_6$$

في هذه الحالة يكون لدينا خليط من البخار والماء وبالتالي يجب أن نحسب كسر الجفاف

$$x_7 = 0.8041$$

$$\boldsymbol{h_7 = 2115.3\ {}^{kJ}/_{kg}}$$

التحليل الطاقي للمسترجع المفتوح هو التحليل الطاقي نفسه لغرفة المزج. المسترجع عادة معزول ولا ينتج أي عمل وبالتالي معادلة الطاقة للمسترجع المفتوح يمكن كتابتها بالشكل

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\rightarrow \sum_{in} \dot{m}h = \sum_{out} \dot{m}h$$

$$yh_6 + (1-y)h_2 = 1(h_3)$$

حيث (y) هي كمية البخار المستنزف من العنفة تساوي $(\dot{m}_6/\dot{m}_5)$ وبحل معادلة الطاقة نجد

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} = \frac{798.33 - 193.01}{2860.2 - 193.01}$$

$$y = 0.2270$$

$$q_{in} = h_5 - h_4 = 3583.1 - 814.03$$

$$q_{in} = 2769.1\ \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{out} = (1-y)(h_7 - h_1) = (1 - 0.227)(2115.3 - 191.81)$$

$$q_{out} = 1486.9\ \frac{kJ}{kg}$$

ونجد أن مردود دورة رانكين المثالية مع مسترجع مفتوح هي

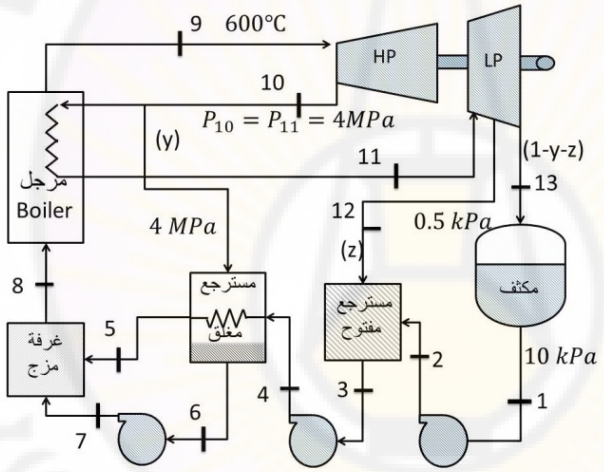
$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{1486.9}{2769.1}$$

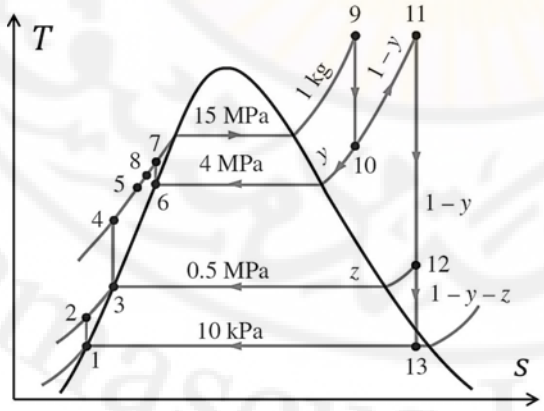
$$\eta_{th} = 0.463 \text{ أو } 46.3\%$$

نلاحظ أن مردود الدورة زاد من 43% (المحسوب لنفس البارامترات في المثال التطبيقية 2–3 البند 3) إلى 46.3% لاستخدامنا المسترجع المفتوح. السبب في ذلك أن كمية العمل تناقصت بمقدار 171 كيلوجول لكل كيلوغرام ولكن نقصت أيضاً كمية الحرارة المضافة في المرجل بمقدار 607 كيلوجول لكل كيلوغرام.

مثال تطبيقي 4–6 دورة رانكين المثالية مع مسترجع مفتوح ومغلق وتسخين بيني

يدخل بخار ماء إلى عنفة، كما في الشكل المرفق، في دورة رانكين المثالية مع مسترجع مفتوح ومغلق وتسخين بيني بضغط $(15\ MPa)$ ودرجة حرارة $(600°C)$ ويتكاثف بعد خروجة بضغط $(10\ kPa)$. يستنزف البخار من العنفة إلى مسترجع المغلق بضغط $(4\ MPa)$ ويسخن باقي البخار إلى درجة حرارة $(600°C)$. يستنزف بعض البخار من العنفة ذات الضغط المنخفض إلى المسترجع المفتوح بضغط $(0.5\ MPa)$. حدد كمية البخار المستنزفة ومردود الدورة.





الفرضيات 1) كافة العناصر تعمل بشكل مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة 3) يسخن الماء المغذي للمسترجع المفتوح والمغلق إلى حرارة الإشباع الموافقة لضغط المسترجع.

التحليل: يبين الشكل السابق دورة رانكين المثالية مع مسترجع مفتوح ومغلق وتسخين بيني. تعمل العنفة والمضخة بشكل إيزونتروبي ولا يوجد انخفاض في الضغط في المكثف والمرجل والمسترجع المفتوح والمغلق والمسخن البيني. يخرج البخار من المسترجع بشكل ماء مشبع. نقوم بتحديد بارامترات كل نقطة من الدورة.

$h_1 = 191.81\ kJ/kg$ $h_9 = 3155.0\ kJ/kg$

$h_2 = 192.30\ kJ/kg$ $h_{10} = 3155.0\ kJ/kg$

$h_3 = 640.09\ kJ/kg$ $h_{11} = 3674.9\ kJ/kg$

$h_4 = 643.92\ kJ/kg$ $h_{12} = 3014.8\ kJ/kg$

$h_5 = 1087.4\ kJ/kg$ $h_{13} = 2335.7\ kJ/kg$

$h_6 = 1087.4\ kJ/kg$ $w_{pump,in,I} = 0.49\ kJ/kg$

$h_7 = 1101.2\ kJ/kg$ $w_{pump,in,II} = 3.83\ kJ/kg$

$h_8 = 1089.8\ kJ/kg$ $w_{pump,in,III} = 13.77\ kJ/kg$

كمية البخار المستنفز تحسب من قانون انحفاظ الطاقة لكل جهاز

المسترجع المغلق

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$yh_{10} + (1-y)h_4 = (1-y)h_5 + y(h_3)$$

$$y = \frac{h_5 - h_4}{(h_{10} - h_6) + (h_5 - h_4)}$$

$$y = 0.1766$$

المسترجع المفتوح

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$zh_{12} + (1 - y - z)h_2 = (1 - y)h_3$$

$$z = \frac{(1 - y)(h_3 - h_2)}{(h_{12} - h_2)}$$

$$z = 0.1306$$

إنتالبي الحالة (8) يحسب من قانون انحفاظ الكتلة والطاقة في غرفة المزج والتي هي معزولة

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$1h_8 = (1 - y)h_5 + y(h_7)$$

$$h_8 = 1089.8\ {}^{kJ}/_{kg}$$

وبالتالي فإن

$$q_{in} = (h_9 - h_8) + (1 - y)(h_{11} - h_{10})$$

$$q_{in} = 2921.4\ \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{out} = (1 - y - z)(h_{13} - h_1)$$

$$q_{out} = 1485.3\ \frac{kJ}{kg}$$

ونجد أن مردود دورة رانكين المثالية مع مسترجع مفتوح هي

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{1486.9}{2769.1}$$

$$\eta_{th} = 0.492 \text{ أو } 49.2\%$$

نلاحظ أن مردود الدورة زاد من 45% (المحسوب لنفس البارامترات في المثال التطبيقية 4– 4 البند 2) إلى 49.2% لاستخدامنا المسترجع المفتوح والمغلق والتسخين البيني.

8.4 تحليل القانون الثاني والإكسرجي في الدورات البخارية.

إن دورة رانكين هي دورة عكوسة داخلياً *Internally Reversible* وليست عكوسة خارجياً *Externally Reversible* وليست مثل دورة كارنو عكوسة كليا *Totally reversible cycle*. باستخدام القانون الثاني في الترموديناميك يمكن معرفة الضياعات الموجودة في كل عنصر وبالتالي الدورة. يمكن أن يعبر الإكسرجي الضائع *Exergy Destruction* لنظام ذي جريان مستقر عن هذه الضياعات

$$\dot{X}_{des} = T_{out} * \dot{S}_{gen} = T_{out} * (\dot{S}_{out} - \dot{S}_{in})$$

أي أن

$$\dot{X}_{des} = T_{out} * \left(\left[\sum_{out} \dot{m}\, s + \frac{\dot{Q}_{out}}{T_{b,out}} \right] - \left[\sum_{in} \dot{m}\, s + \frac{\dot{Q}_{in}}{T_{b,in}} \right] \right) (kW) \qquad (15\text{-}4)$$

من أجل مدخل واحد ومخرج واحد وجريان مستقر نجد أن

$$X_{des} = T_{out} * S_{gen}$$

$$X_{des} = T_{out} \left(s_e - s_i + \frac{q_{out}}{T_{b,out}} - \frac{q_{in}}{T_{b,in}} \right) \qquad \left({}^{kJ}/_{kg} \right) \qquad (16\text{-}4)$$

حيث $(T_{b,out})$ و $(T_{b,in})$ هي درجات حرارة حدود النظام التي يتم من خلالها نقل الحرارة إلى داخل النظام وخارجه. إن الإكسرجي الضائع المرافق للدورة يعتمد على كمية الحرارة المتبادلة من المصدر والمصرف الحراري ودرجة حرارتهما.

$$X_{des} = T_{out} * S_{gen}$$

$$X_{des} = T_{out} \left(\sum \frac{q_{out}}{T_{b,out}} - \sum \frac{q_{in}}{T_{b,in}} \right) \quad \left({}^{kJ}/_{kg} \right) \qquad (17\text{-}4)$$

من أجل دورة تعمل على نقل حرارة من مصدر حراري عال بدرجة حرارة T_H ومصرف حراري منخفض بدرجة حرارة منخفضة T_L، يتحول الإكسرجي إلى

$$X_{des} = T_{out}\left(\frac{q_{out}}{T_L} - \frac{q_{in}}{T_H}\right) \qquad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{18-4}$$

أما الإكسرجي لنظام مفتوح

$$\psi_{flow} = (h - h_{out}) - T_{out}(s - s_{out}) + \frac{\vec{V}^2}{2} + gZ \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{19-4}$$

حيث يدل الرمز (*out*) إلى شروط الحالة الميتة *Dead State* أو شروط المحيط *Surroundings*.

<u>مثال تطبيقي 4–7 – تحليل قانون الترموديناميك لدورة رانكين المثالية</u>

حدد قيمة الإكسرجي المدمر والمرافق لدورة رانكين المثالية في المثال التطبيقي (1–4) بافتراض أن أن الحرارة المنتقلة إلى البخار هي من مرجل بدرجة حرارة ($1600\,K$) وتطرح الحرارة إلى وسط التبريد بدرجة حرارة ($290\,K$) وضغط ($100\ kPa$) وحدد إكسرجي البخار الخارج من العنفة.

التحليل: وجدنا في المثال التطبيقي (1–4) أن كمية الحرارة المضافة $2728.6\ kJ/kg$ وأن كمية الحرارة المطروحة $2018.6\,kJ/kg$. إن العمليات (2–1) و (4–3) هي عمليات إيزونتروبية وبالتالي عمليات عكوسة داخلياً وخارجياً اي

$$X_{des,1-2} = X_{des,3-4} = 0$$

العمليات (3–2) و(1–4) هي عمليات تتم بضغط ثابت وهي عكوسة داخلياً فقط بحيث يتم نقل الحرارة بشكل تدرجي وبخطى صغيرة جدا. يحدد الإنتروبي من جداول البخار كما يلي

$$s_2 = s_1 = s_{f@75\,kPa} = 1.2132\ kJ/kg\ K$$

$$s_4 = s_3 = 6.7450\ kJ/kg\ K \quad (at\ 3\ MPa, 350℃)$$

الإكسرجي

$$X_{des,2-3} = T_{out}\left(s_3 - s_2 - \frac{q_{in,2-3}}{T_{source}}\right)$$

$$X_{des,2-3} = (290K)\left[(6.745 - 1.2132)\frac{kJ}{kgK} - \frac{2728.6\ kJ/kg}{1600\ K}\right]$$

$$X_{des,2-3} = 1110\ \frac{kJ}{kg}$$

$$X_{des,4-1} = T_{out}\left(s_1 - s_4 - \frac{q_{in,4-1}}{T_{sink}}\right)$$

$$X_{des,2-3} = (290K)\left[(1.2132 - 6.745)\frac{kJ}{kgK} - \frac{2018.6\ kJ/kg}{290\ K}\right]$$

$$X_{des,2-3} = 414\ \frac{kJ}{kg}$$

وبالتالي الضياعات في الدورة هي

$$X_{des,cycle} = X_{dest,1-2} + X_{dest,2-3} + X_{dest,3-4} + X_{dest,4-1}$$

$$X_{des,cycle} = 0 + 1110 + 0 + 414$$

$$X_{des,cycle} = 1524\ kJ/kg$$

نلاحظ من المعادلة السابقة إلى أن أكبر قيمة للإكسرجي الضائع هي في إضافة الحرارة إلى الدورة لذلك ولتخفيض هذه القيمة مثلاً نرفع درجة حرارة دخول البخار إلى العنفة وبالتالي ينخفض الفرق في درجات الحرارة بين وسيط التشغيل (البخار) ودرجة حرارة الوقود المحترق وبالتالي تنخفض القيمة. العمل المفيد (الإكسرجي) للبخار الخارج من العنفة يحدد من المعادلة

$$\psi_{flow} = (h - h_{out}) - T_{out}(s - s_{out}) + \frac{\vec{V}^2}{2} + gZ \qquad (kJ/kg)$$

بإهمال الطاقة الحركية والكامنة تكون المعادلة بالشكل

$$\psi_4 = (h_4 - h_{out}) - T_{out}(s_4 - s_{out})$$

$$h_{out} = h_{@290K,100\ kPa} \cong h_{f@290k} = 71.355\ (kJ/kg)$$

$$s_{out} = s_{@290K,100\ kPa} \cong s_{f@290k} = 0.2533\ (kJ/kg)$$

بالتعويض

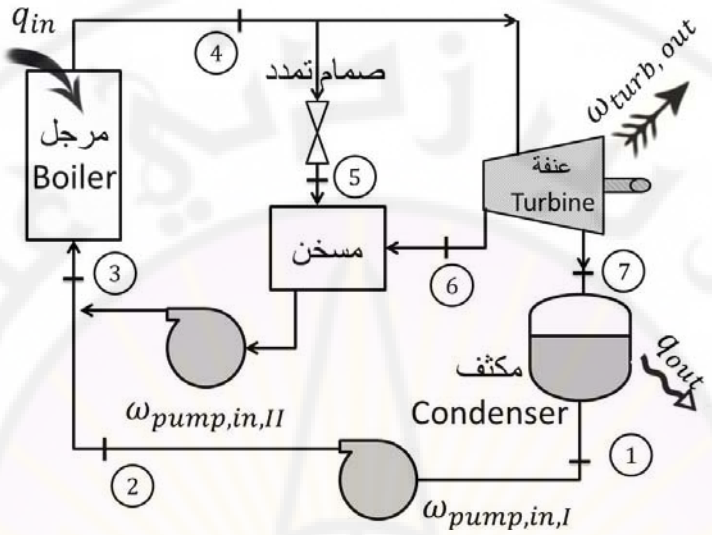
$$\psi_4 = (2403.0 - 71.355)(kJ/kg) - 290K(6.745 - 0.2533)(kJ/kgK)$$

$$\psi_4 = 449\ (kJ/kg)$$

أي أنه يمكن الحصول من البخار الخارج من العنفة وتمدده إلى شروط الوسط المحيط على عمل قيمته (kJ/kg) 449 وبشكل معكوس.

9.4 التوليد المشترك للطاقة *Cogeneration*.

قمنا في كافة الدورات المشروحة سابقا بتحويل جزء من طاقة البخار المضافة من الوقود المحترق في المرجل إلى عمل مفيد، القسم الباقي من الطاقة تم طرحه إلى نهر أو بحيرة أو البحر أو الهواء كطاقة ضائعة *Waste Heat* بسبب عدم فائدته في إعطاء أي عمل مفيد. الكثير من الأجهزة مثل معامل الورق وإنتاج الزيوت وغيرها تكون بحاجة إلى هذه الطاقة الضائعة في كافة عملياتها على شكل حرارة *Process Heat*. تزود هذه الحرارة على شكل بخار بضغط 5 إلى 7 ضغط جوي وبدرجة حرارة بين 150℃ و 200℃. تسمى المعامل التي تعتمد على هذه الحرارة بمعامل الطاقة المشتركة *Cogeneration Plants*. يبين الشكل (19–4) دورة بخارية مع توليد مشترك للطاقة.



الشكل (19–4) دورة بخارية مع توليد مشترك.

يستنزف بعض البخار من العنفة عند ضغط معين مناسب للمعمل والموافق للنقطة (6) ويستمر باقي البخار في التمدد في العنفة ويدخل إلى المكثف عند النقطة (7) ويبرد تحت ضغط ثابت. في بعض الحالات تكون العمليات المنفذة في المعمل كثيرة جدا فيستنزف كل البخار من العنفة ولا يمر أي جزء منه في المكثف وبالتالي تكون الحرارة الضائعة في المكثف صفراً.

إذا كان البخار غير كاف فيتم استنزافه من المرجل أيضاً قبل دخوله إلى العنفة ويخفض ضغطه باستخدام صمام تخفيض ضغط *Pressure-Reducing Valve (PRV)* كما هو في النقطة (5). عندما لا توجد حاجة إلى الحرارة في المعمل تعود الدورة إلى العمل وبشكل نظامي كدورة بخارية نظامية. المعادلات المستخدمة في إضافة الطاقة والطاقة المطروحة وكمية الحرارة المستنزفة من العنفة تحسب بالشكل التالي

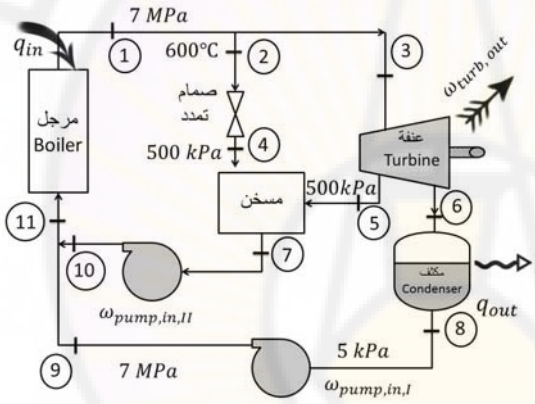
$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_3(h_4 - h_3) \quad (kW) \qquad (20\text{-}4)$$

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_7(h_7 - h_1) \quad (kW) \tag{21-4}$$

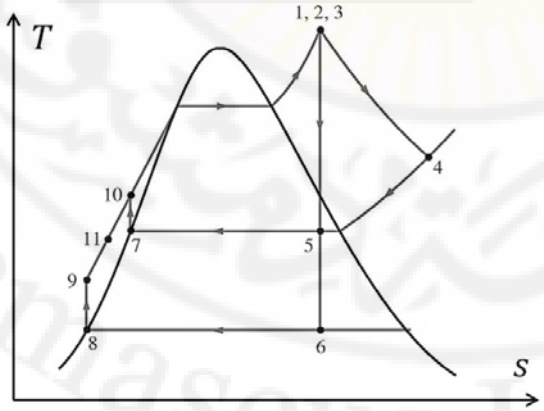
$$\dot{Q}_P = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_8 h_8 \quad (kW) \tag{22-4}$$

$$\dot{W}_{turb} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_5)(h_4 - h_6) + \dot{m}_7(h_6 - h_7) \quad (kW) \tag{23-4}$$

مثال تطبيقي 4–8 – دورة التوليد المشترك المثالية للطاقة



يدخل البخار في دورة توليد مشترك مثالية بضغط $(7\ MPa)$ وبدرجة حرارة $(500°C)$. يستنزف البخار من العنفة بضغط $(500\ kPa)$ للاستخدام في معمل ما. يتمدد باقي البخار في العنفة إلى ضغط $(5\ kPa)$. يتكاثف البخار الخارج من العنفة في مكثف بضغط ثابت ويضغط إلى مرجل. في أزمنة الاستهلاك الأعظمي للمعمل يتم خنق البخار الخارج من المرجل إلى ضغط $(500\ kPa)$ ويحول إلى المعمل. كمية تدفق البخار من المرجل هي $(15\ kg/s)$. حدد 1) كمية الحرارة المستنزفة إلى المعمل 2) العمل المفيد و3) كمية الحرارة المستنفزة عندما تكون كمية البخار



المستنزفة قبل دخوله إلى العنفة 10 بالمئة و70 بالمئة من العنفة بضغط $(500\ kPa)$

التحليل: يبين الشكل دورة بخارية مع توليد مشترك *Process Heater*. نحدد أولا الأعمال والإنتالبي لكافة النقاط والأجهزة

$$w_{pump,in,I} = v_8(P_9 - P_8)$$

$$w_{pump,in,I} = (0.001005\, m^3/kg)[(7000 - 5)kPa]\left(\frac{1\ kJ}{1\ kPa\ m^3}\right)$$

$$w_{pump,in,I} = 7.03\ \ kJ/kg$$

$$w_{pump,in,II} = v_7(P_{10} - P_7)$$

$$w_{pump,in,II} = (0.001093\, m^3/kg)[(7000 - 500)kPa]\left(\frac{1\ kJ}{1\ kPa\ m^3}\right)$$

$$w_{pump,in,II} = 7.10\ \ kJ/kg$$

$$h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = 3411.4\, kJ/kg$$

$$h_5 = 2739.3\, kJ/kg$$

$$h_6 = 2073.0\, kJ/kg$$

$$h_7 = h_{f@500\ kPa} = 640.09\, kJ/kg$$

$$h_7 = h_{f@5\ kPa} = 137.75\, kJ/kg$$

$$h_9 = h_8 + w_{pump,in,I} = 144.78\, kJ/kg$$

$$h_{10} = h_7 + w_{pump,in,II} = 647.19\, kJ/kg$$

1 – كمية الحرارة المستنزفة إلى المعمل عندما نأخذ البخار وبشكل كامل من المرجل عبر صمام تخفيض الضغط إلى ضغط التشغيل بالمعمل $(500\ kPa)$ اي ان

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_7 = \dot{m}_1 = 15\ \ kg/s$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = 0.0\ \ kg/s$$

وبالتالي

$$\dot{Q}_{p,max} = \dot{m}_1(h_4 - h_7)$$

$$\dot{Q}_{p,max} = (15\ kg/s\ )[(3411.4 - 640.09)\ kJ/kg]$$

$$\dot{Q}_{p,max} = 41{,}570\ kW$$

2 – العمل المفيد

عند عدم وجود استنزاف ويذهب البخار وبشكل كامل إلى العنفة ومن ثم إلى المكثف ذي الضغط $5\ kPa$ وبالتالي

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_5 = 0.0\ kg/s$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 = \dot{m}_6 = 15\ kg/s$$

وبالتالي

$$\dot{W}_{turb,out} = \dot{m}(h_3 - h_6) = (15\ kg/s\ )[(3411.4 - 2073)\ kJ/kg]$$

$$\dot{W}_{turb,out} = 20{,}076\ kW$$

وبالتالي

$$\dot{W}_{pump,in,I} = (15\ kg/s\ )[7.03\ kJ/kg]$$

$$\dot{W}_{pump,in,I} = 105\ kW$$

فالعمل المفيد هو

$$\dot{W}_{net,out} = \dot{W}_{turb,out} - \dot{W}_{pump,in,I}$$

$$\dot{W}_{net,out} = 20076 - 105 = 19971\ kW = 20\ MW$$

$$\dot{Q_{in}} = \dot{m}_1(h_1 - h_{11})$$

$$\dot{Q_{in}} = (15\ kg/s\ )[(3411.4 - 144.78)\ kJ/kg]$$

$$\dot{Q_{in}} = 48{,}999\ kW$$

3 – كمية الحرارة المستنزفة 10 بالمئة قبل العنفة و70 بالمئة من العنفة. نطبق توازن الطاقة (قانون انخفاض الطاقة) على المعمل *Process Heater* فنجد

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_5 h_5 = \dot{Q}_{p,out} + \dot{m}_7 h_7$$

حيث

$$\dot{m}_4 = 0.1 * 15 = 1.5\ kg/s$$

$$\dot{m}_5 = 0.7 * 15 = 10.5\ kg/s$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 = 12\ kg/s$$

$$\dot{Q}_{p,out} = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_7 h_7 = 26.2\ MW$$

أي أن 26.2 ميغاواط سوف تستعمل في المعمل وسيبقى حوالي 11 ميغاواط لتوليد الكهرباء

10.4 دورة رانكين العضوية *Organic Rankine Cycle (ORC).*

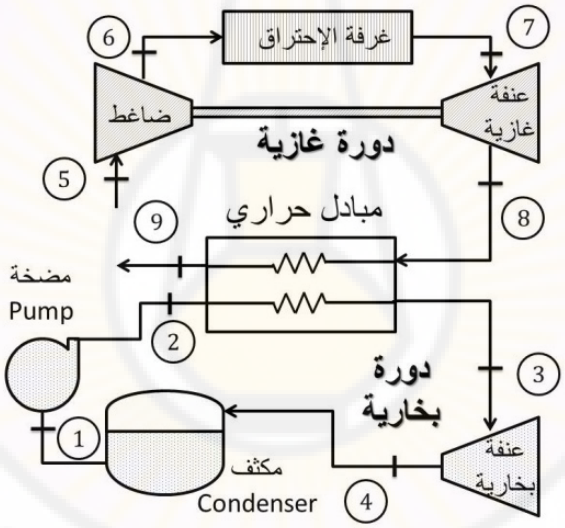
عندما نستعمل وسيط تشغيل مختلف عن الماء ضمن دورة رانكين المثالية فإننا نطلق على هذه الدورة اسم دورة رانكين العضوية *Organic Rankine Cycle (ORC).* المواد العضوية المستعملة في دورة رانكين العضوية قد تكون فريون (CFC, HFC) أو إيزوبنتان *Isopentane* أو بوتان *Butane* أو بروبين *Propane* أو محلول ماء أمونيا. عندما يستعمل محلول أمونيا – ماء في دارة رانكين العضوية تسمى الدورة باسم دورة كالينا *Kalina Cycle.*

تُستعمل دروة رانكين المثالية عندما تكون كمية الحرارة الناتجة عن احتراق الوقود مثل الوقود الإحفري أو التفاعل النووي كبيرة جداً وتكون كمية الحرارة المنتقلة (المضافة) إلى وسيط التشغيل عالية جداً وتصل درجة حرارة البخار الخارج من المرجل إلى (800°C). أما في دورة رانكين العضوية فتكون درجة الحرارة اللازمة لتحميص الوسيط

العضوي بين (80°C) و (100°C) لذلك يمكن استعمال الطاقة الشمسية أو الجيوحرارية أو الوقود العضوي *Biofuel* كمصدر للحرارة.

11.4 دورة (غاز – بخار) مشتركة *Combined Gas-Vapor Power Cycle*.

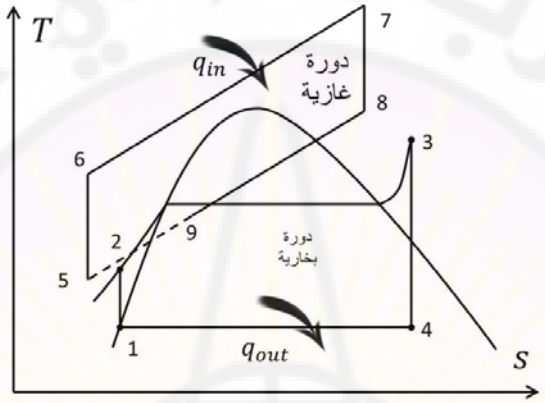
عند مشاركة الدورة الغازية مع الدورة البخارية لرفع المردود فإننا نسمي هذه الدورة بالدورة الغازية – البخارية المشتركة أو اختصاراً الدورة المشتركة *Combined Cycle* كما عو واضح في الشكل (20–4).



الشكل (20–4) عناصر الدورة المشتركة.

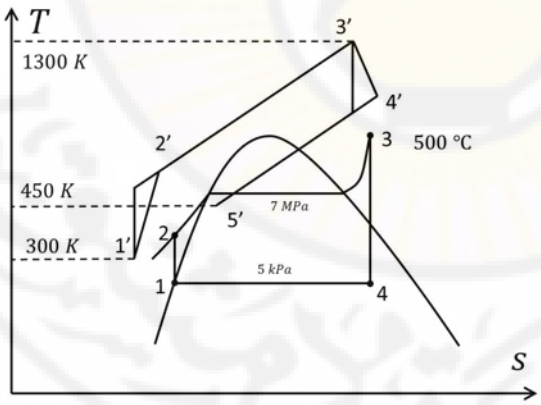
الدورة الغازية المستعملة هي دورة برايتن المثالية والدورة البخارية هي دورة رانكين المثالية. تعمل الدورة الغازية على درجة حرارة (1425°C) بينما تعمل الدورة البخارية على (620°C). إن التبريد الفعال لشفرات العنفة وتغليف الشفرات بمواد مقاومة للحرارة مثل السيراميك يساعد على الحفاظ على مواصفات ونوعية معدن الشفرات المستخدمة في

العنفات. يبين الشكل (21–4) تمثيل الدورة وكافة نقاطها على مخطط $(T-s)$. الدورة العليا هي الدورة الغازية والدورة السفلى هي الدورة البخارية.



الشكل (21–4) تمثيل الدورة المشتركة على مخطط $(T-s)$.

مثال تطبيقي 4–9 – دورة مشتركة *Combined Gas-Steam Power Cycle*.



يبين الشكل مخطط $(T-s)$ لدورة مشتركة. الدورة الغازية لها نسبة ضغط *Pressure Ratio* بمقدار (8). الهواء يدخل الضاغط بدرجة حرارة $(300\ K)$ ويدخل العنفة بدرجة المردود $(1300\ K)$. الإيزونتروبي للضاغط هو 80 بالمئة وللعنفة 85 بالمئة. الدورة البخارية تعمل بين $(7\ MPa)$ و $(5\ kPa)$. البخار يسخن في المبادل الحراري عند درجة حرارة (500°C). الغازات الخارجة من المبادل

تكون بدرجة حرارة $(450\,K)$. حدد 1) نسبة تدفق البخار إلى غازات الاحتراق 2) مردود الدورة المشتركة.

التحليل: يبين المخطط $(T-s)$ نقاط الدورة الغازية والدورة البخارية سوية. نقاط الدورة الغازية فهي بالشكل التالي (1',2',3',4',1') والنقطة 5' هي نقطة الغازات بعد المبادل أما نقاط الدورة البخارية فهي على بالشكل التالي (1,2,3,4,1). التبادل الحراري يكون بين النقطتين (2,3) من الدورة البخارية و (4',5').

<u>للدورة الغازية.</u>

$$h_{4'} = 880.36\,kJ/kg \quad (T_{4'} = 853K)$$

$$q_{in} = 790.58, \quad w_{net} = 210.41\ kJ/kg, \quad \eta_{th} = 26.6\%$$

$$h_{5'} = h_{@450k} = 451.8\,kJ/kg$$

<u>للدورة البخارية.</u>

$$h_2 = 144.78\ kJ/kg \quad (T_2 = 33℃)$$

$$h_3 = 3411.4\ kJ/kg \quad (T_2 = 500℃)$$

$$w_{net} = 1331.4\ kJ/kg, \quad \eta_{th} = 40.8\%$$

1 – نسبة تدفقات البخار إلى غازات الاحتراق. بكتابة التوازن الحراري للمبادل نجد أن

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}_g h_{5'} + \dot{m}_s h_3 = \dot{m}_g h_{4'} + \dot{m}_s h_2$$

$$\dot{m}_g(h_{4'} - h_{5'}) = \dot{m}_s(h_3 - h_2)$$

$$\frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_s} = \frac{(h_3 - h_2)}{(h_{4'} - h_{5'})} = 0.131$$

نلاحظ أنه من 1 كيلوغرام من غازات الاحتراق نحتاج إلى 131.0 من البخار لرفعة من 33 إلى 500 درجة مئوية وتنخفض درجة حرارة غازات الاحتراق من 853 إلى 450 درجة مئوية. إن العمل المفيد المقدم من قبل واحد كيلوغرام من غازات الاحتراق

$$w_{net} = w_{net,gas} - y * w_{net,steam}$$

$$w_{net} = \left(210.41\frac{kJ}{kg}\right) - \left(0.131\frac{steam}{kg\ gas}\right)\left(1331.4\frac{kJ}{kg\ gsteam}\right)$$
$$= 384.8\frac{kJ}{kg\ gas}$$

2 – مردود الدورة

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{384.8}{790.6} = 0.487 \text{ أو } 48.7\%$$

ملخص فصل الدورات البخارية والمشتركة في توليد الطاقة.

- مردود دورة كارنو البخارية

$$\eta_{th,carnot} = 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

- التحليل الطاقي لعناصر دورة رانكين

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{pump,in} - w_{turb,out}) = (h_{exit} - h_{in}) \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

المضخة

$$w_{in,pump} = h_2 - h_1 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

المرجل

$$q_{in} = h_3 - h_2 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

العنفة البخارية

$$w_{turb,out} = h_3 - h_4 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

المكثف

$$q_{out} = h_4 - h_1 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

- مردود دورة رانكين المثالية البسيطة

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

- دورة رانكين المثالية مع التسخين البيني المثالي

$$q_{in} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

$$w_{turb,out} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

- دورة رانكين المثالية مع مسترجع مفتوح مثالي

$$q_{in} = h_5 - h_4 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

$$q_{out} = (1 - y)(h_7 - h_1) \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

$$w_{turb,out} = (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7) \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

$$w_{pump,in} = (1 - y) * w_{pump,in,I} + w_{pump,in,II} \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

$$w_{pump,in,I} = v_1(P_2 - P_1)$$

$$w_{pump,in,II} = v_3(P_4 - P_3)$$

$$y = \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_5}$$

مسائل غير محلولة لفصل
الدورات البخارية والمشتركة في توليد الطاقة.

1. محطة بخارية تعمل على دورة رانكين المثالية البسيطة بين الضغط ($3\ MPa$) و ($50\ kPa$). درجة حرارة دخول البخار إلى العنفة هي ($300°C$) والتدفق بخار الماء ضمن الدورة هو ($35\ kg/s$). ارسم الدورة على مخطط ($T-s$) وحدد 1) المردود الحراري و2) العمل الصافي.
2. محطة بخارية تعمل على درو رانكين مع تسخين بيني. يدخل البخار إلى عنفة الضغط العالي بضغط ($12.5\ MPa$) ودرجة حرارة ($550°C$) وتدفق ($7.7\ kg/s$) ويخرج بضغط ($2\ MPa$). يسخن البخار عند ضغط ثابت إلى درجة حرارة ($450°C$) قبل أن يدخل إلى العنفة الثانية. المردود الإيزونتروبي للعنفة 85 بالمئة والمضخة 90 بالمئة. يخرج البخار من المكثف بشكل ماء مشبع. بفرض أن محتوى الرطوبة لايزيد عن 5% حدد 1) ضغط المكثف 2) العمل الصافي و3) المردود الحراري.
3. محطة بخارية تعمل على دورة رانكين مع مسترجع مثالي. يدخل البخار إلى العنفة بضغط ($6\ MPa$) ودرجة حرارة ($450°C$) ويتكاثف بضغط ($20\ kPa$). يستنزف البخار من العنفة عند الضغط ($0.4\ MPa$) إلى مسترجع مفتوح ويخرج الماء من المسترجع على شكل ماء مشبع. ارسم الدورة على مخطط ($T-s$) وحدد 1) العمل الصافي النوعية و2) المردود الحراري.

الفصل الخامس

Chapter Five

الدورات التبريدية

Refrigeration Cycles

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
h	الإنتالبي النوعي	J/kg
h_{in}	إنتالبي الدخول النوعي	J/kg
h_{exit}	إنتالبي الخروج النوعي	J/kg
m	الكتلة	kg
$\dot{m}$	التدفق الكتلي	kg/sec
P	الضغط	kPa أو bar
Q_L	كمية الحرارة المطروحة إلى المصرف	J
Q_H	كمية الحرارة المقدمة من المصدر الحراري	J
Q_{gen}	كمية الحرارة المتولدة	J
$\dot{Q}_L$	معدل كمية الحرارة المطروحة إلى المصرف	W
$\dot{Q}_H$	معدل كمية الحرارة المقدمة من المصدر الحراري	W
$\dot{Q}_{in}$	معدل كمية الحرارة المقدمة	W
$\dot{Q}_{out}$	معدل كمية الحرارة المطروحة	W
$\dot{Q}$	معدل تغيير كمية الحرارة	W
q_L	كمية الحرارة النوعية المطروحة إلى المصرف	J/kg
q_H	كمية الحرارة النوعية المقدمة من المصدر الحراري	J/kg
q_{in}	كمية الحرارة النوعية المعطاة	J/kg
q_{out}	كمية الحرارة النوعية المطروحة	J/kg
R	ثابت وسيط التشغيل (الغاز)	$J/kg\,K$
s	الإنتروبي النوعي	$J/kg\,K$
s_i, s_{in}	إنتروبي الدخول النوعي	$J/kg\,K$

s_e, s_{out}	إنتروبي الخروج النوعي	$J/kg\ K$
s_{gen}	إنتروبي التوليد النوعي	$J/kg\ K$
$\dot{s}_{gen}$	معدل تغيير إنتروبي التوليد النوعي	$W/kg\ K$
Δs	التغيير في الإنتروبي النوعي	$J/kg\ K$
Δs_{sys}	التغيير في إنتروبي لنظام النوعي	$J/kg\ K$
$\dot{S}_{in}$	معدل التغيير في الإنتروبي الدخول	W/K
$\dot{S}_{out}$	معدل التغيير في الإنتروبي الخروج	W/K
T	درجة الحرارة	K أو ℃
T_H	درجة الحرارة العليا في دورة كارنو المثالية	K أو ℃
T_L	درجة الحرارة الدنيا في دورة كارنو المثالية	K أو ℃
T_{out}	درجة حرارة المرجعية عند حساب الإكسرجي	K أو ℃
$T_{b,in}$	درجة حرارة الحدود عند الدخول في حساب الإكسرجي	K أو ℃
$T_{b,out}$	درجة حرارة الحدود عند الخروج في حساب الإكسرجي	K أو ℃
T_{source}	درجة حرارة المصدر	K أو ℃
V	الحجم	m^3
v	الحجم النوعي	m^3/kg
$\dot{W}$	معدل تغيير العمل	W
w_{net}	العمل الصافي النوعي	J/kg
$w_{net,in}$	العمل الصافي النوعي المقدم	J/kg
$w_{pump,in}$	عمل المضخة النوعي المقدم	J/kg
$w_{turb,out}$	عمل العنفة النوعي المستخرج	J/kg
$w_{comp,in}$	عمل الصاغط النوعي	J/kg

w_{in}	العمل النوعي المقدم	J/kg
w_{out}	العمل النوعي المستخرج	J/kg
$\dot{X}_{des}$	التغيير في إكسرجي الضائع	W
η_{th}	المردود الحراري	لا بعدي
η_c	مردود الضاغط	لا بعدي
COP_R	معامل الأداء محرك تبريدي	لا بعدي
COP_{HP}	معامل الأداء لمضخة حرارية	لا بعدي
$COP_{R,cascade}$	معامل الأداء لدورة تبريدية تسلسلية	لا بعدي
COP_{absor}	معامل الأداء لدورة تبريدية امتصاصية	لا بعدي
$COP_{rev,absor}$	معامل الأداء لدورة تبريدية امتصاصية عكوسة	لا بعدي
$COP_{R,rev}$	معامل الأداء لدورة تبريدية عكوسة	لا بعدي

مقدمة الفصل.

التبريد *Refrigeration* هو من أهم التطبيقات في علوم الترموديناميك حيث يتم نقل الحرارة من مصدر منخفض إلى مصدر مرتفع عن طريق صرف عمل ما (حسب القانون الثاني في الترموديناميك). الأجهزة التي تنتج هذا الفعل تسمى بالمبردات *Refrigerators* والدورات التي تعمل على هذا المبدأ تسمى بالدورات التبريدية. من أهم هذه الدورات دورة البخار المضغوط التبريدية *Vapor-Compression Refrigeration* أو باختصار الدورة التبريدية. تقوم هذه الدورة على ضغط وسيط التبريد *Refrigerant* بالحالة البخارية وتحويله إلى سائل عبر تكثيفه ثم تبخيره. أيضا هناك دورة التبريد الغازية *Gas Refrigeration* حيث يبقى وسيط التبريد بشكل غاز في كافة مراحل الدورة. سنقوم في هذا الفصل بدراسة الدورة التبريدية المركبة *Cascade Refrigeration* التي تستخدام وسائط تشغيل مختلفة والدورة الامتصاصية *Absorption Cycle* التي تعمل على مبدأ امتصاص وسيط تشغيل ضمن وسيط تشغيل آخر قبل ضغطه.

<u>الفوائد العلمية من الفصل</u>

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ فهم مبادئ المبردات والمضخات الحرارية ومعرفة أدائها.
- ✓ تحليل دورة البخار المضغوط التبريدية.
- ✓ تحليل دورة البخار المضغوط التبريدية الحقيقة.
- ✓ تحديد العوامل المؤثرة في اختيار وسيط التبريد الصحيح لأي تطبيق.
- ✓ مناقشة عمليات أنظمة التبريد والمضخات الحرارية.
- ✓ تحليل الدورات التبريدية الغازية.
- ✓ فهم فكرة الدورات التبريدية الامتصاصية.

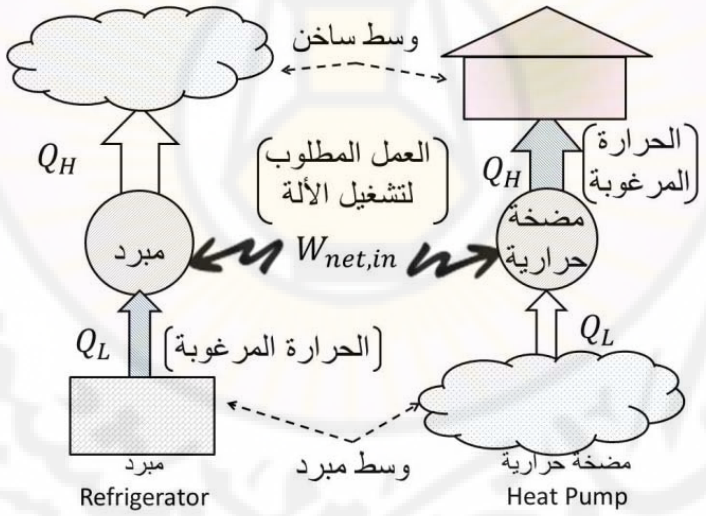
محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.5	المبردات والمضخات الحرارية.	299
2.5	دورة كارنو المعكوسة.	301
3.5	الدورة التبريدية البخارية المثالية.	303
4.5	الدورة التبريدية البخارية الحقيقة.	311
5.5	تحليل القانون الثاني والإكسرجي في الدورات التبريدية.	314
6.5	كيفية اختيار وسيط التبريد.	321
7.5	نظام المضخة الحرارية.	322
8.5	دورات تبريدية متطورة.	324
1.8.5	الدورات التبريدية التسلسلية.	324
2.8.5	الدورات التبريدية المتعددة المراحل.	329
3.8.5	الدورات التبريدية المتعددة الأهداف وبضاغط واحد.	332
4.8.5	الدورات التبريدية المستخدمة لتميع الغاز.	334
9.5	الدورة التبريدية الغازية.	336
10.5	الدورة التبريدية الامتصاصية.	341
ملخص الفصل.		3345
مسائل غير محلولة.		347
نهاية الفصل.		348

1.5 المبردات والمضخات الحرارية.

يقول القانون الثاني في الترموديناميك إن الحرارة تنتقل من الوسط ذي درجة الحرارة المرتفعة إلى الوسط ذي درجة الحرارة المنخفضة وبشكل تلقائي أما الانتقال العكسي للحرارة فيحتاج إلى صرف عمل معين لتحقيق هذه الظاهرة ويسمى الجهاز الذي يقوم بهذه المهمة بالمبرد *Refrigerators*. المبردات هي أجهزة دورية *Cyclic Devices* تستعمل وسيط تشغيل لنقل الحرارة من الوسط ذي درجة الحرارة المنخفضة إلى الوسط ذي درجة الحرارة المرتفعة ويسمى هذا الوسيط بوسيط التبريد *Refrigerants*.

يبين الشكل (1–5) نوعين من دارات التبريد. الدارة الأولى تسمى بالمبرد *Refrigerator* والدارة الثانية تسمى بالمضخة الحرارية *Heat Pump*. الاختلاف بين هاتين الدورتين هو فقط الفعل التبريدي المطلوب من الدورة.



الشكل (1–5) المبرد و المضخة الحرارية.

- في دورة المبرد، تمثل (Q_L) مقدار كمية الحرارة المراد امتصاصها من الفراغ المطلوب (وسط مبرد *Cold Refrigerated Space*) من أجل تبريده إلى درجة حرارة معينة

(T_L). تعبر (Q_L) عن قيمة الحرارة المطلوبة *Desired Output* (الفعل المطلوب) من المبرد لإبقاء الوسط المُبرد عند درجة حرارة معينة (T_L) وتمثل (Q_H) مقدار كمية الحرارة المطروحة إلى وسط بدرجة حرارة مرتفعة (T_H) (وسط ساخن *Warm Environment*) أو إلى الوسط الخارجي.

- في المضخة الحرارية، تمثل(Q_H) مقدار كمية الحرارة المراد امتصاصها من الوسط الخارجي وطرحها في الفراغ المطلوب من أجل رفع درجة حرارته إلى (T_H). تعبر (Q_H) عن قيمة كمية الحرارة المطلوبة *Desired Output* من المضخة الحرارية لإبقاء الوسط عند درجة حرارة معينة (T_H) وتمثل (Q_L) مقدار كمية الحرارة المراد امتصاصها من الوسط الخارجي ذات درجة حرارة منخفضة (T_L).

يمثل $(W_{net,in})$ العمل المصروف على ضاغط المبرد لنقل الحرارة من الوسط المُبرد إلى الوسط الخارجي. الهدف من استخدام المبرد هو أبقاء درجة حرارة الوسط ثابتة من خلال إزالة الحرارة منه وطرح هذه الحرارة إلى الوسط الخارجي (وسط ذو درجة حرارة أعلى). أما الهدف من المضخة الحرارية فهو إبقاء الوسط بدرجة حرارة عالية ويتحقق ذلك من خلال امتصاص الحرارة من الوسط الخارجي (وسط ذو درجة حرارة منخفضة مثلا شتاءً) وتزويدها إلى الوسط المناسب. يعبر عن مردود المبرد أو المضخة الحرارية بمعامل الأداء *Coefficient of Performance (COP)* ويعرف كما يلي

$$COP_R = \frac{\text{الطاقة المطلوبة}}{\text{الطاقة الضرورية}} = \frac{\text{فعل التبريد}}{\text{العمل المبذول}} = \frac{Q_L}{W_{net,in}} \qquad (1\text{-}5)$$

$$COP_{HP} = \frac{\text{الطاقة المطلوبة}}{\text{الطاقة الضرورية}} = \frac{\text{فعل التسخين}}{\text{العمل المبذول}} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} \qquad (2\text{-}5)$$

يجب أن نلاحظ إلى أن كافة معاملات الأداء أكبر من (1). بمقارنة المعادلتين (1−5) و(2−5) نجد أن

$$COP_{HP} = COP_R + 1 \qquad (3\text{-}5)$$

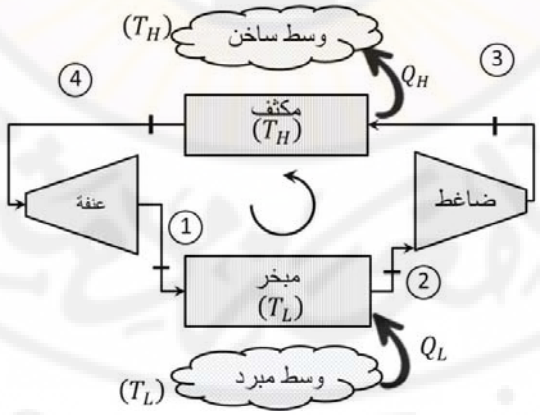
نجد أن المعادلة السابقة محققة من أجل قيم ثابتة لكل من (Q_L) و (Q_H) كما نرى أن قيمة معامل الأداء للمضخة الحرارية أكبر من الواحد $(COP_{HP} > 1)$ لأن معامل الأداء للمبرد (COP_R) ذو قيمة موجبة.

إن الاستطاعة التبريدية *Cooling Capacity* لنظام تبريد (كمية الحرارة الممتصة من الفراغ المُبرد) يعبر عنها بالطن التبريدي *Tons of Refrigeration*. يعرف الطن التبريدي إلى أنه استطاعة نظام تبريدي لتجميد واحد طن من الماء بدرجة حرارة (0°C) إلى جليد بدرجة حرارة (0°C) خلال 24 ساعة.

$$1\ ton = 200\frac{Btu}{min} = 211\frac{kJ}{min} \qquad (4\text{-}5)$$

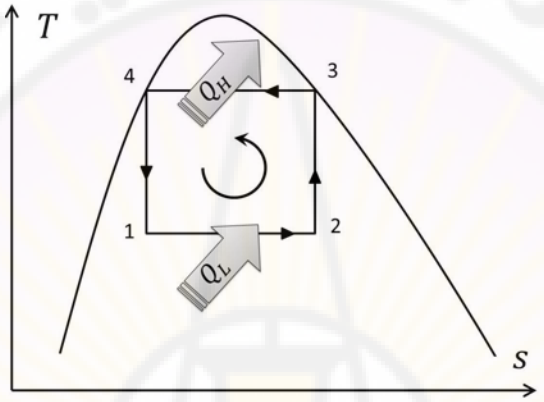
2.5 دورة كارنو المعكوسة *The Reversed Carnot Cycle*.

من أجل مقارنة الدورات التبريدية نقوم بتعريف دورة كارنو المعكوسة. دورة كارنو المعكوسة هي دورة عكوسة كلياً وتتألف من عمليتين إيزوثرميتين تتمان في المبخر والمكثف وعمليتين إيزونتروبيتين تتمان في الضاغط والعنفة كما الشكل (2–5). يبين الشكل (3–5) مخطط دورة كارنو المعكوسة على مخطط $(T - s)$.



الشكل (2–5) عناصر دورة كارنو المعكوسة لدراة تبريدية.

المُبرد الذي يعمل على هذه الدورة المعكوسة يسمى بمُبرد كارنو *Carnot Refrigerator* والمضخة الحرارية التي تعمل أيضاً على الدورة نفسها تسمى بالمضخة الحرارية لكارنو *Carnot Heat Pump*.



الشكل (3–5) دورة كارنو المعكوسة على مخطط $(T - s)$.

بفرض أن دورة كارنو المعكوسة تعمل ضمن منحني الإشباع كما في الشكل (3–5). يقوم وسيط التبريد بامتصاص الحرارة وبشكل إيزوثرمي من مصدر منخفض (Q_L) بدرجة حرارة منخفضة (T_L) والمرافق للعملية $(2 - 1)$ وينضغط بشكل إيزونتروبي خلال العملية $(3 - 2)$ إلى مواصفات النقطة (3) وترتفع درجة الحرارة وسيط الشتغيل إلى (T_H). تطرح الحرارة وبشكل إيزوثرمي إلى مصدر مرتفع (Q_H) وبدرجة حرارة مرتفعة (T_H) خلال العملية $(4 - 3)$ ويتمدد وسيط الشتغيل بشكل إيزونتروبي خلال العملية $(1 - 4)$ إلى مواصفات النقطة (1) وتنخفض درجة الحرارة وسيط التشغيل إلى T_L. يتحول وسيط التبريد من الحالة البخارية المشبعة في العملية $(2 - 1)$ إلى الحالة السائلة المشبعة في المكثف في العملية $(4 - 3)$. يعبر عن معامل الأداء مُبرد كارنو والمضخة الحرارية لكارنو كما يلي

$$COP_{R,Carnot} = \frac{1}{T_H/T_L - 1} \quad (5\text{-}5)$$

$$COP_{HP,Carnot} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} \quad (6\text{-}5)$$

نلاحظ إلى أن معامل الأداء يزداد كما انخفض الفرق بين درجات الحرارة العالية والمنخفضة أي عندما ترتفع (T_L) وتنخفض (T_H).

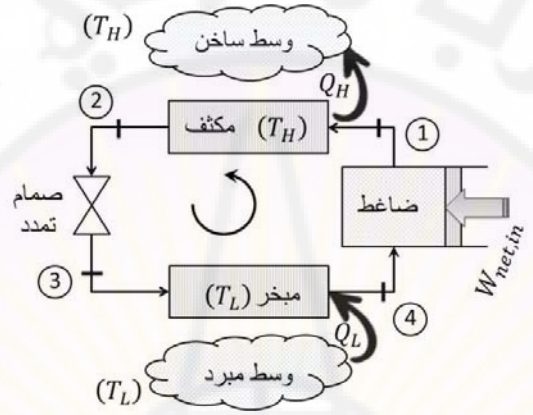
3.5 الدورة التبريدية المثالية *The Ideal Vapor-Compression Refrigeration Cycle*.

يمكن إلغاء الكثير من النواحي غير العملية في دورة كارنو العكوسة بتبخير وسيط التبريد في النقطة (2) وبشكل كامل قبل ضغطه واستبدال العنفة بصمام خنق *Throttling Valve* مثل صمام التمدد *Expansion Valve* أو أنبوب شعري *Capillary Tube*. الدورة التي تنتج من هذه الاستبدالات تسمى بالدورة التبريدية المثالية *Ideal Vapor-Compression Cycle* وهي أكثر استعمالاً في المبردات وأجهزة التكييف والمضخات الحرارية. الشكل (4–5) يبين عناصر الدورة التبريدية المثالية أما الشكل (5–5) يبين مرحل عمل الدورة على مخطط $(T - s)$. تتألف الدورة التبريدية المثالية من أربع عمليات متتالية

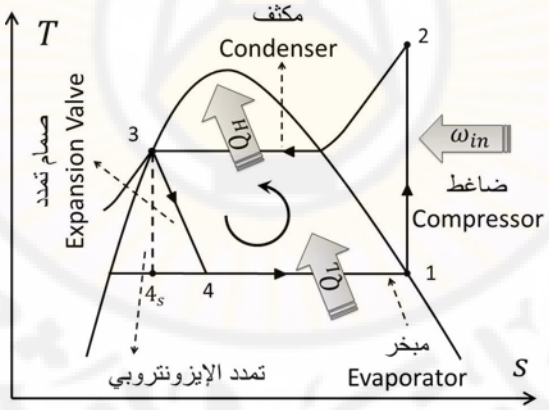
- العملية (2 – 1) هي عملية انضغاط إيزونتروبي في الضاغط.
- العملية (3 – 2) هي عملية طرح حرارة في المكثف بضغط ثابت.
- العملية (4 – 3) هي عملية تمدد إيزونتروبي بواسطة صمام خنق.
- العملية (1 – 4) هي عملية امتصاص حرارة في المبخرة بضغط ثابت.

في الدورة التبريدية المثالية يدخل وسيط التبريد إلى الضاغط عند النقطة (1) وبشكل بخار مشبع ويضغط إيزونتروبياً إلى ضغط المكثف. تزداد درجة حرارة الوسيط خلال عملية الضغط الإيزونتروبي إلى درجة حرارة أكبر من درجة حرارة الوسط الخارجي (أو الوسط الذي ستطرح عنه الحرارة). يدخل وسيط التبريد المكثف على حالة بخار محمص

الموافق للنقطة (2) ويخرج بشكل سائل مشبع عند النقطة (3) بسبب طرح الحرارة إلى الوسط الخارجي.



الشكل (4–5) عناصر الدورة التبريدية المثالية.



الشكل (5–5) مخطط $(T - s)$ للدورة.

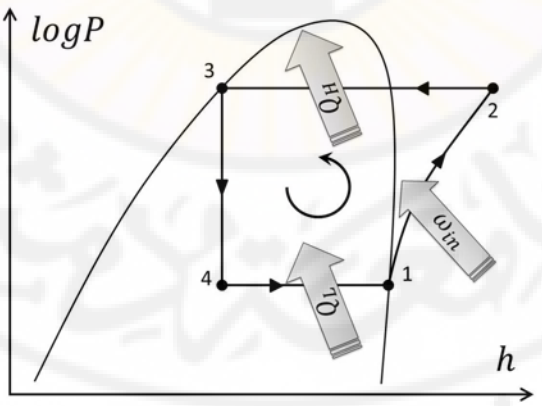
يخنق وسيط التبريد عند النقطة (3) إلى ضغط المبخر بواسطة صمام تمدد أو أنبوب شعري وتنخفض درجة حرارة وسيط التبريد إلى درجة حرارة أقل من الفراغ المراد تبريده

خلال هذه العملية. يدخل وسيط التبريد عند النقطة (4) على شكل مزيج (بخار وسائل بنسب خلط صغيرة) ويتبخر بشكل كامل نتيجة امتصاص الحرارة من الفراغ المُبرد. يخرج الوسيط على شكل بخار من المبخرة ويعود ويدخل الضاغط ويكرر الدورة.

يعمل البراد المنزلي على دورة تبريدية مثالية. الأنبوب الذي يوجد في حجرة التجميد يعمل على شكل مبخرة وبدرجة حرارة أقل من درجة حرارة المنتجات الموجودة في حجرة التجميد فيمتص الحرارة (Q_L) من المنتجات ويعمل على تجميدها، أما الأنبوب الموجود خلف البراد فيعمل كمكثف ليطرح الحرارة الممتصة من حجرة التجميد إلى هواء المطبخ (Q_H). يستعمل البراد أنبوب شعري موجود على مدخل أنبوب المبخر لخنق وسيط التبريد وتحويلة إلى بخار.

<u>قاعدة عامة:</u> إن معامل الأداء يزداد من 2 إلى 4 بالمئة عند ارتفاع درجة حرارة المبخرة درجة واحدة أو في انحفاظ درجة حرارة المكثف درجة واحد.

هناك مخطط أخر يستعمل في الدورات التبريدية وهو مخطط $(logP - h)$ كما هو واضح في الشكل (6-5).



الشكل (6-5) مخطط $(P - h)$ للدورات التبريدية المثالية.

على هذا المخطط تظهر ثلاث من العمليات السابقة على شكل خطوط مستقيمة حيث تتناسب طول خطوط كميات الحرارة المتبادلة في المكثف والمبخرة مع كمية الحرارة المطروحة (Q_H) أو الممتصة (Q_L). يجب أن نلاحظ أيضاً أن الدورة التبريدية المثالية ليست دورة عكوسة داخلياً لوجود عملية خنق لوسيط التبريد وهي عملية غير عكوسة. إذا تم استبدال صمام التمدد (عنصر الخنق) بعنفة إيزونتروبية فإن البخار يدخل المبخرة عند النقطة (4s) بدلا من الحالة (4) كما هو واضح من الشكل (5–5) وبالتالي تزداد استطاعة الدورة وينخفض العمل المصروف على هذه الدورة. كافة عناصر الدورة التبريدية المثالية تعمل بحالة مستقرة وبالتالي فإن كافة العمليات تعمل بشكل مستقر. بإهمال الطاقة الحركية والكامنة بالمقارنة مع كمية الحرارة المتبادلة والعمل الصافي في الدورة يمكن أن نكتب معادلة انخفاض الطاقة لواحدة الكتل (القانون الأول في الترموديناميك) كما يلي

$$(q_{in} + w_{in}) - (w_{out} + q_{out}) = h_{exit} - h_{inlet}$$

أي أن

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{exit} - h_{inlet} \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{7-5}$$

بالنسبة إلى الدورة التبريدية نجد أن

$$(q_L - q_H) + (w_{net,in}) = 0$$

$$w_{net,in} = q_H - q_L$$

فقيمة العمل المبذول في الضاغط يساوي كمية الحرارة المطروحة إلى الوسط الخارجي ناقص كمية الحرارة الممتصة من الفراغ. إن كمية الحرارة المطروحة إلى الوسط الخارجي هي أكبر دوماً من الحرارة الممتصة من الفراغ بكمية العمل المبذول بحسب العلاقة التالية

$$q_H = q_L + w_{net,in} \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{8-5}$$

بتطبيق القانون الأول في الترموديناميك على عناصر الدورة التبريدية المثالية نجد أن التوازن الطاقي على المبخر هو

$$(q_L - 0) + (0 - 0) = h_1 - h_4$$

أي

$$q_L = h_1 - h_4 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{9-5}$$

على الضاغط هو

$$(0 - 0) + (w_{in} - 0) = h_2 - h_1$$

أي أن

$$w_{net,in} = w_{in} = h_2 - h_1 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{10-5}$$

على المكثف هو

$$(0 - q_H) + (0 - 0) = h_3 - h_2$$

أي

$$q_H = h_2 - h_3 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{11-5}$$

على صمام التمدد (تمدد إيزونتروبي) هو

$$(0 - 0) + (0 - 0) = h_4 - h_3$$

أي

$$h_4 = h_3 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right) \tag{12-5}$$

وبالتالي يعبر عن معامل الأداء للمُبرد

$$COP_R = \frac{q_L}{w_{net,in}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \qquad (13\text{-}5)$$

والمضخة الحرارية بالشكل

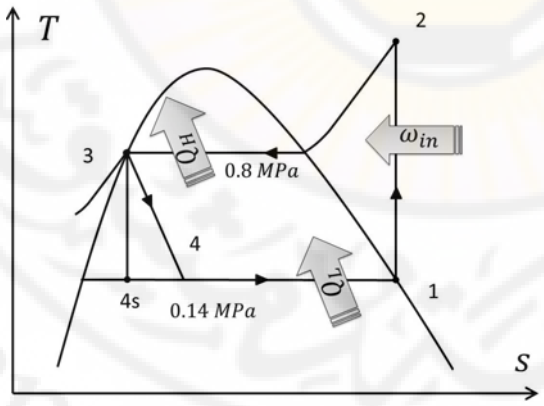
$$COP_{HP} = \frac{q_H}{w_{net,in}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \qquad (14\text{-}5)$$

في الحالة المثالية تكون

$$h_1 = h_{g@P_1}$$
$$h_3 = h_{f@P_3}$$

المثال التطبيقي 5-1 – دورة تبريدية مثالية.

مبرد يستعمل فريون $(134A)$ كوسيط تبريدي في دورة تبريدية مثالية بين ضغط $(0.14\,MPa)$ و $(0.8\,MPa)$. فإذا كان تدفق الفريون هو $(0.05\ kg/s)$ حدد 1) كمية الحرارة الممتصة من الفراغ المراد تبريده وعمل الضاغط و2) كمية الحرارة المطروحة إلى الوسط الخارجي و3) معامل الأداء للدورة.



الفرضيات 1) كافة العناصر تعمل بشكل مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: يبين الشكل المرافق الدورة التبريدية المثالية على مخطط $(T-s)$. يعمل الضاغط بشكل إيزونتروبي ويخرج وسيط التبريد من المكثف على شكل سائل مشبع. بالنظر إلى جداول فريون $(134A)$ إنتالبي لكافة النقاط

الحالة (1) - دخول الضاغط – هي حالة وسيط بخار مشبع أي من جداول الإشباع بدلالة الضغط نجد أن

$$P_1 = 0.14\ MPa$$

$$\boldsymbol{h_1 = h_{g@0.14MPa} = 239.16\ {}^{kJ}/_{kg}}$$

$$s_1 = s_{g@0.14MPa} = 0.94456\ {}^{kJ}/_{kg\ K}$$

الحالة (2) – دخول المكثف

$$P_2 = 0.8\ MPa\ ,\qquad s_2 = s_1$$

$$\boldsymbol{h_2 = 275.39\ \frac{kJ}{kg}}$$

الحالة (3) – دخول صمام التمدد الوسيط هو سائل مشبع

$$P_3 = 0.8\ MPa\ ,$$

$$\boldsymbol{h_3 = h_{f@0.8MPa} = 95.47\ {}^{kJ}/_{kg}}$$

الحالة (4) – دخول المبخر

$$h_{3\ (throttle)} = h_4$$

$$\boldsymbol{h_4 = 95.47\ {}^{kJ}/_{kg}}$$

1 – كمية الحراة الممتصة من الفراغ المراد تبريده و عمل الضاغط يحسب من

$$\dot{Q}_L = \dot{m}\ (h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_L = \left(0.05\frac{kg}{s}\right)\left((239.16 - 95.47)\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\dot{Q}_L = 7.18\ kW$$

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}\ (h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_{in} = \left(0.05\frac{kg}{s}\right)\left((275.39 - 239.16)\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\dot{W}_{in} = 1.81\ kW$$

2 – كمية الحرارة المطروحة إلى الوسط الخارجي

$$\dot{Q}_H = \dot{m}\ (h_2 - h_3)$$

$$\dot{Q}_H = \left(0.05\frac{kg}{s}\right)\left((275.39 - 95.47)\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\dot{Q}_H = 9.0\ kW$$

أو يمكن حسابه من العلاقة

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}_{in} = 8.99\ kW$$

3– معامل الأداء يحسب من العلاقة

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{7.18}{1.81}$$

$$COP_R = 3.97 > 1.0$$

اي ان المبرد يمتص 3.97 وحدات طاقة حرارية من الفراغ المراد تبريده من أجل 1 وحدة من الطاقة الكهربائية.

ملاحظات

- إذا بدلنا صمام التمدد بعنفة إيزونتروبية المبينة بالشكل عند النقطة (4s) نجد أن

$$P_2 = 0.14\ MPa$$

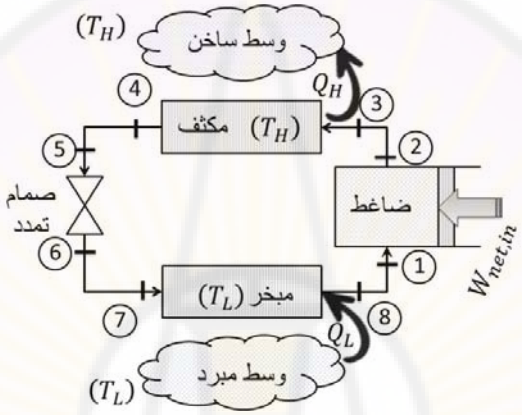
$$s_{4s} = s_3 = 0.35404\ kJ/kg\ K$$

$$h_{4s} = 88.94\ kJ/kg$$

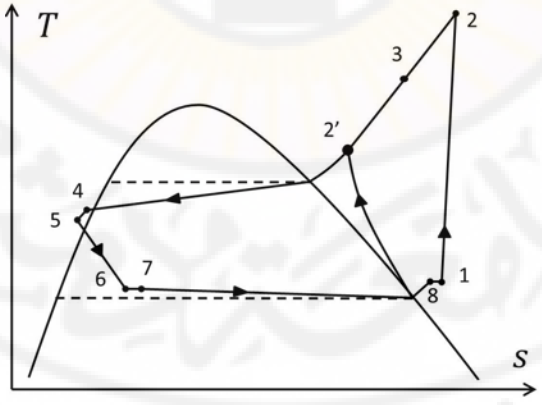
وتنتج العنفة عملاً وقدره $(0.33\ kW)$. هذا ينقص من العمل المصروف على الدورة التبريدية من ***1.81*** **إلى** ***1.48*** كيلوواط ويزيد من كمية الحرارة الممتصة من الفراغ من ***7.18*** **إلى** ***7.51*** كيلوواط ويزيد معامل الأداء من ***3.97*** **إلى** ***5.07*** (زيادة 28 بالمئة).

4.5 الدورة التبريدية الحقيقية *Actual Vapor-Compression Refrigeration Cycle.*

يبين الشكل (5–7) عناصر الدورة التبريدية الحقيقية كما يبين الشكل (5–8) مخطط الدورة التبريدية الحقيقية على $(T - s)$.



الشكل (5–7) عناصر الدورة التبريدية الحقيقية.



الشكل (5–8) مخطط $(T - s)$ للدورة الحقيقية.

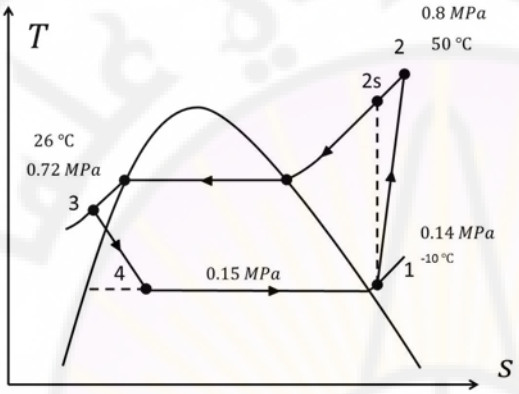
الاختلاف بين الدورة الحقيقية والمثالية هي الضياعات في الأنابيب (الاحتكاك) والضياع الناتج عن التبادل الحراري بين وسيط التشغيل والوسط الخارجي أوبين الفراغ ووسيط التشغيل.

- في الدورة المثالية نفرض أن وسيط التبريد يدخل المبخرة على شكل بخار مشبع ولكن هذا غير صحيح عملياً لأننا لايمكن التحكم بحالة الوسيط التبريدي وبالتالي يصمم النظام على أن يدخل بشكل محمص إلى الضاغط.
- عملية الضغط في الدورة المثالية هي معكوسة داخلياً وأدياباتية أي أنها عمية إيزونتروبية ولكن الدورة الحقيقية تحتوي على احتكاك وهذا يزيد من الإنتروبي والحرارة التي بدورها تزيد لأو تنقص من الإنتروبي وذلك حسب الاتجاه حركة الحرارة. تزداد في العملية $(2-1)$ كمية الإنتروبي بينما تنقص هذه القيمة في العملية $(2'-1)$. العملية $(2'-1)$ مرغوبة بدلاً من العملية الإونتروبية لأن الحجم النوعي لوسيط التبريد والعمل المصروف على الضاعط يكون أصغرياً.
- في الدورة المثالية نفرض أن الوسيط يخرج من المكثف على شكل سائل مشبع ولكن واقعياً ومن غير الممكن التحكم بهذه الحالة لوجود احتكاك ضمن المكثف وفي الأنابيب الواصلة بين الضاغط والمكثف لذلك نقوم على إخراج الوسيط من المكثف بحالة تبريد دوني *Subcooled*.

مثال تطبيقي 5–2 – الدورة التبريدية الحقيقية.

يدخل وسيط الفريون $(134A)$ إلى ضاغط مبرد في حالة محمصة ذات ضغط $(0.14\,MPa)$ و بدرجة حرارة $(-10℃)$ وبتدفق كتلي وقدره $(0.05\,kg/s)$ ويخرج بضغط $(0.8\,MPa)$ ودرجة حرارة $(50℃)$. يبرد الوسيط في مكثف إلى درجة حرارة $(26℃)$ وضغط $(0.72\,MPa)$ ويخنق إلى ضغط $(0.15\,MPa)$. بإهمال الاحتكاك وفقدان الحرارة من الأنابيب وعمليات تبادل الحرارة بين الفراغ والوسط الخارجي حدد 1)

كمية الحرارة الممتصة من الفراغ والعمل المصروف على الضاغط 2) المردود الإيزونتروبي للضاغط و3) ومعامل الأداء للمُبرد.



الفرضيات: 1) كافة العناصر تعمل بشكل مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: يبن الشكل درجات الحرارة والضغوط لوسيط التشغيل ضمن الدورة في مختلف النقاط.

لنحدد كافة المعطيات عن نقاط الدورة

$$P_1 = 0.14\ MPa,\quad T_1 = -10\ MPa$$

$$h_1 = 246.36\ kJ/kg$$

$$P_2 = 0.8\ MPa,\quad T_2 = 50\ MPa$$

$$h_2 = 286.69\ kJ/kg$$

$$P_3 = 0.72\ MPa,\quad T_1 = 26\ MPa$$

$$h_3 = h_{f@26℃} = 87.83\ kJ/kg$$

$$h_3 = h_4\ (throttling)$$

لأن العملية هي عملية خنق كمية الحرارة الممتصة من الفراغ والعمل المصروف على الضاغط

$$\dot{Q}_L = \dot{m}\ (h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_L = \left(0.05\frac{kg}{s}\right)\left((246.36 - 87.83)\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\dot{Q}_L = 7.93\ kW$$

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}\,(h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_{in} = \left(0.05\frac{kg}{s}\right)\left((286.69 - 246.36)\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\dot{W}_{in} = 2.02\ kW$$

1- مردود الضاغط الإيزونتروبي

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

حيث أن إنتالبي النقطة (2s) هو

$$P_{2s} = 0.8\ MPa,$$
$$s_{2s} = s_1 = 0.9724\ kJ/kg\ K$$

$$h_{2s} = 284.21\ kJ/kg$$

بالتعويض نجد أن المردود الإيزونتوربي للضاغط هو

$$\eta_c = \frac{284.21 - 246.36}{286.69 - 246.36}$$

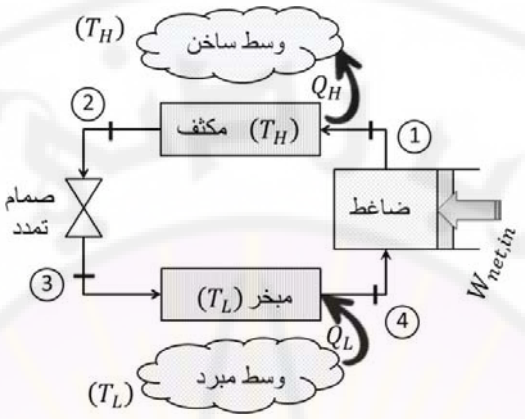
$$\eta_c = 0.939 \text{ او } 93.9\%$$

3 - معامل الأداء

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{7.93}{2.02} = 3.93$$

5.5 تحليل القانون الثاني والإكسرجي في الدورات التبريدية.

نستخدم الدورة التبريدية البسيطة كما هو في الشكل (4-5) السابق والمرفق في تحليل القانون الثاني والإكسرجي في الدورات التبريدية.



بإهمال الضياعات ضمن الأنابيب التي تصل بين عناصر الدورة نجد أن الإكسرجي الضائع العام هو

$$\dot{X}_{des} = T_{out} * \dot{S}_{gen} = T_{out} * (\dot{S}_{out} - \dot{S}_{in})$$

$$\dot{X}_{des} = T_{out} * \left(\left[\sum_{out} \dot{m}\, s + \frac{\dot{Q}_{out}}{T_{b,out}} \right] - \left[\sum_{in} \dot{m}\, s + \frac{\dot{Q}_{in}}{T_{b,in}} \right] \right) (kW)$$

أو يحسب من علاقة توازن الإكسرجي العامة للأنظمة المفتوحة وبحسب عرف الاتجاهات

$$\dot{X}_{destroyed} = \sum \left(1 - \frac{T_{out}}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \left(\sum_{in} \dot{m}\psi - \sum_{out} \dot{m}\psi \right)$$

$$\dot{X}_{destroyed} = \sum \left(1 - \frac{T_{out}}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \dot{m}(\psi_{in} - \psi_{out})$$

إكسرجي الضاغط. في ضاغط الدورة التبريدية البسيطة يكون الضياع في الإكسرجي هو

$$\dot{X}_{des,4-1} = T_{out} * \dot{S}_{gen} = \dot{m} * T_{out} * (s_1 - s_4) \qquad (15\text{-}5)$$

أو من علاقة توازن الإكسرجي

$$\dot{X}_{des,4-1} = -\dot{W}_{in} + \dot{m}(\psi_4 - \psi_1)$$

$$(\psi_4 - \psi_1) = (h_4 - h_1) - T_{out} * (s_4 - s_1)$$

$$\dot{X}_{des,4-1} = -\dot{W}_{in} + \dot{m}\,[(h_4 - h_1) - T_{out} * (s_4 - s_1)]$$

إكسرجي المكثف. في مكثف الدورة التبريدية البسيطة يكون الضياع في الإكسرجي هو

$$\dot{X}_{des,1-2} = T_{out} * \left[\dot{m} * (s_2 - s_1) + \frac{\dot{Q}_H}{T_H}\right]$$

أي أن

$$\dot{X}_{des,1-2} = \dot{m} * T_{out} * \left[(s_2 - s_1) + \frac{(h_2 - h_1)}{T_H}\right] \qquad (16\text{-}5)$$

أو من علاقة توازن الإكسرجي

$$\dot{X}_{des,1-2} = \left(1 - \frac{T_{out}}{T_H}\right)(-\dot{Q}_H) + \dot{m}(\psi_1 - \psi_2)$$

$$(\psi_1 - \psi_2) = (h_1 - h_2) - T_{out} * (s_1 - s_2)$$

$$\dot{X}_{des,1-2} = -\left(1 - \frac{T_{out}}{T_H}\right)\dot{Q}_H + \dot{m}[(h_1 - h_2) - T_{out} * (s_1 - s_2)]$$

إكسرجي صمام الخنق. في صمام خنق الدورة التبريدية البسيطة يكون الضياع في الإكسرجي هو

$$\dot{X}_{des,2-3} = \dot{m} * T_{out} * (s_3 - s_2) \qquad (17\text{-}5)$$

أو من علاقة توازن الإكسرجي

$$\dot{X}_{des,2-3} = \dot{m}(\psi_2 - \psi_3)$$

$$(\psi_2 - \psi_3) = (h_2 - h_3) - T_{out} * (s_2 - s_3)$$

$$\dot{X}_{des,2-3} = \dot{m}[(h_2 - h_3) - T_{out} * (s_2 - s_3)]$$

إكسرجي المبخرة. في مبخر الدورة التبريدية البسيطة يكون الضياع في الإكسرجي هو

$$\dot{X}_{des,3-4} = T_{out} * \left[\dot{m} * (s_4 - s_3) - \frac{\dot{Q}_L}{T_L}\right]$$

أي أن

$$\dot{X}_{des,3-4} = \dot{m} * T_{out} * \left[(s_4 - s_3) - \frac{(h_4 - h_3)}{T_L}\right] \qquad (18\text{-}5)$$

أو من علاقة توازن الإكسرجي

$$\dot{X}_{des,3-4} = \left(1 - \frac{T_{out}}{T_L}\right)\dot{Q}_L + \dot{m}(\psi_3 - \psi_4)$$

$$(\psi_3 - \psi_4) = (h_3 - h_4) - T_{out} * (s_3 - s_4)$$

$$\dot{X}_{des,3-4} = \left(1 - \frac{T_{out}}{T_L}\right)\dot{Q}_L + \dot{m}[(h_3 - h_4) - T_{out} * (s_3 - s_4)]$$

إكسرجي الدورة. إن الإكسرجي الضائع للدورة هو

$$\dot{X}_{des,1-2-3-4-1} = \dot{X}_{des,1-2} + \dot{X}_{des,2-3} + \dot{X}_{des,3-4} + \dot{X}_{des,4-1}$$

أو يمكن حسابه من العلاقة

$$\dot{X}_{des,1-2-3-4-1} = T_{out} * \dot{S}_{gen,1-2-3-4-1}$$

بالتعويض والاختصار نجد أن العلاقة للدورة هي

$$\dot{X}_{des,1-2-3-4-1} = T_{out} * \left(\frac{\dot{Q}_H}{T_H} - \frac{\dot{Q}_L}{T_L}\right)$$

مثال تطبيقي 5–3 – تحليل القانون الثاني في الترموديناميك لدورة تبريدية مثالية.

يستعمل وسيط الفريون (R − 12) في دارة تبريدية بسيطة. درجة حرارة المبخرة هي (−15℃) ودرجة حرارة المكثف (40℃). تدفق وسيط الشتغيل ضمن الدارة هو ($0.1\,kg/s$) درجة حرارة الوسط الخارجي هي (25℃) ينضغط وسيط التبريد من ($150\,kPa$) إلى ضغط ($1200\,kPa$) بإهمال الاحتكاك وفقدان الحرارة من الأنابيب حدد معدل تغيير الإكسرجي الضائع ضمن الدورة.

الفرضيات: 1) كافة العناصر تعمل بشكل مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: يجب حساب بارامترات الدورة لكي نقوم نحسب الإكسرجي .الجدول التالي يعطي القيم في المعادلات السابقة

بارامتر	*1*	*2*	*3*	*4*
$(T, ℃)$	*-15*	*66*	*40*	*-15*
(P, kPa)	*150*	*1200*	*1200*	*150*
$(h, kJ/kg)$	*346.6*	*384.97*	***239.21***	***239.21***
$(s, kJ/kgK)$	***1.5825***	***1.5825***	*1.1315*	*1.1538*

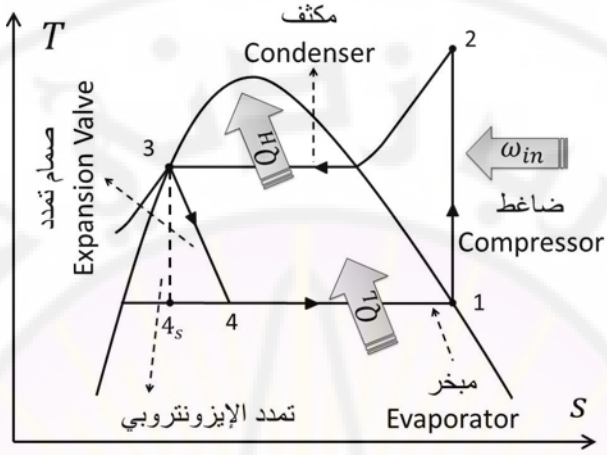
باستخدام العلاقات السابقة نجد أن الإكسرجي المدمر في الضاغط الإيزونتروبي يكون الإكسرجي الضائع

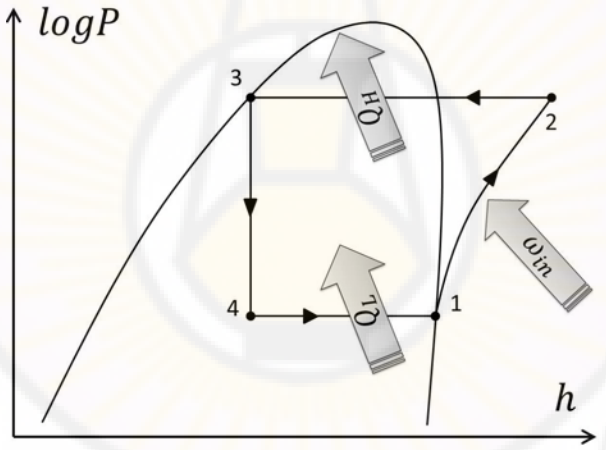
$$\dot{X}_{des,1-2} = T_{out} * \dot{S}_{gen}$$

$$\dot{X}_{des,1-2} = \dot{m} * T_{out} * (s_2 - s_1)$$

$$\dot{X}_{des,1-2} = (0.1\,kg/s) * (25 + 273)K * 0\,kJ/kgK$$

$$\dot{X}_{des,1-2} = 0\,kW$$





في المكثف يكون الإكسرجي الضائع

$$\dot{X}_{des,2-3} = T_{out} * \left[\dot{m} * (s_3 - s_2) + \frac{\dot{Q}_H}{T_H}\right]$$

$$\dot{X}_{des,2-3} = \dot{m} * T_{out} * \left[(s_3 - s_2) + \frac{(h_2 - h_3)}{T_H}\right]$$

$$\dot{X}_{des,2-3} = (0.1\,kg/s) * (25+273)K\left[(1.1315-1.5825) + \frac{(384.97-239.21)}{(40+273)}\right]\frac{kJ}{kgK}$$

$$\dot{X}_{des,2-3} = 0.438\,kW$$

في صمام الخنق

$$\dot{X}_{des,3-4} = \dot{m} * T_{out} * (s_4 - s_3)$$

$$\dot{X}_{des,3-4} = (0.1\,kg/s) * (25+273)K * (1.1538-1.1315)$$

$$\dot{X}_{des,3-4} = 0.6645\,kW$$

في المبخرة

$$\dot{X}_{des,4-1} = T_{out} * \left[\dot{m} * (s_4 - s_1) - \frac{Q_{in}}{T_L}\right]$$

$$\dot{X}_{des,4-1} = \dot{m} * T_{out} * \left[(s_4 - s_1) - \frac{(h_4 - h_1)}{T_L}\right]$$

$$\dot{X}_{des,4-1} = (0.1\,kg/s) * (25+273)K\left[(1.1538-1.5825) - \frac{(239.21-346.6)}{(-15+273)}\right]\frac{kJ}{kgK}$$

$$\dot{X}_{des,4-1} = -0.378\,kW$$

وبالتالي فإن الإكسرجي المدمر للدورة هو

$$\dot{X}_{des,1-2-3-4-1} = \dot{X}_{des,1-2} + \dot{X}_{des,2-3} + \dot{X}_{des,3-4} + \dot{X}_{des,4-1}$$

$$\dot{X}_{des,1-2-3-4-1} = 0 + 0.438 + 0.6645 - 0.378$$

$$\dot{X}_{des,1-2-3-4-1} = 0.7245\,kW$$

لا يمكن اعتبار العلاقة

$$\dot{X}_{des,1-2-3-4-1} = T_{out} * \left(\frac{\dot{Q}_H}{T_H} - \frac{\dot{Q}_L}{T_L}\right)$$

$$\dot{X}_{des,1-2-3-4-1} = \dot{m} * T_{out} * \left(\left[\frac{(h_2 - h_3)}{T_H}\right] - \left[\frac{(h_4 - h_1)}{T_L}\right]\right)$$

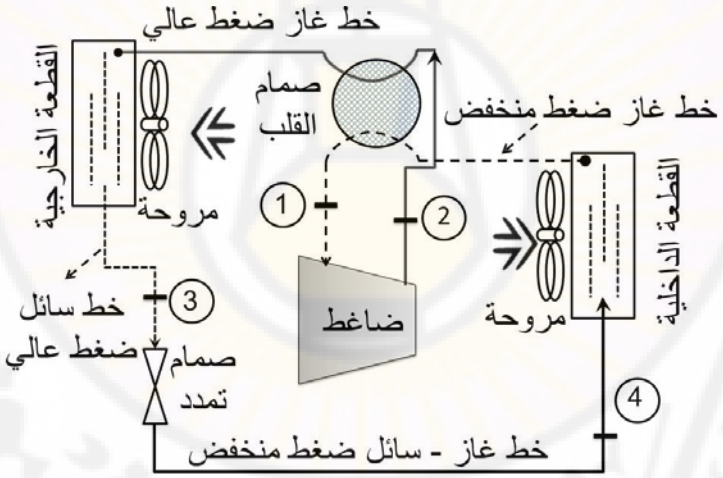
محققة لأن الضاغط في هذه الحالة إيزونتروبي.

6.5 كيفية اختيار وسيط التبريد.

هناك الكثير من الوسائط التي يمكن اختيارها عند تصميم نظام تبريدي. من هذه الوسائط الكلوروفلوروكربون *Chlorofluorocarbon (CFC)* والتي تسمى بالفريونات والأمونيا والهيدروكربونات (مثل بوتان، إيتان، ايتيلين وغيرها) وغاز ثاني أوكسيد الكربون، والهواء (التبريد في الطائرات)، والماء (فوق نقاط التجمد). إن الاختيار المناسب لوسائط التبريد تعتمد على التطبيقات المستخدمة فيها أنظمة التبريد. هناك عاملان مهمان في الاختيار وهما درجة حرارة الفراغ المُبرد (وسط امتصاص الحرارة) ودرجة حرارة الوسط الخارجي (وسط طرح الحرارة). لكي نحصل على تبادل حراري مناسب بين الوسيط والفراغ المُبرد (الوسط الخارجي) يجب أن يكون هناك فرق في درجات الحرارة بين (5°C) و (10°C) فإذا كانت درجة الحرارة في الفراغ المُبرد (−10°C) فيجب أن تكون درجة حرارة وسيط التبريد داخل المبخر (−20°C) ليتم امتصاص الحرارة من الوسط المُبرد. يجب أن نحافظ على الضغط داخل المبخرة أعلى من الضغط الجوي لمنع تسرب الهواء داخل المبخرة أي يجب أن يكون الوسيط التبريدي عند ضغط الإشباع أو أعلى عند درجة الحرارة (−20°C) بهذه الحالة. الأمونيا و($R-134A$) هي من الوسائط التي تحقق الشروط السابقة.

7.5 نظام المضخة الحرارية *Heat Pump Systems*.

تقوم المضخة الحرارية بإعطاء الفعل التبريدي صيفاً والفعل التسخيني شتاءً حيث يتحول المكثف صيفاً إلى مبخرة شتاءً والمبخرة صيفاً إلى مكثفة شتاءً. يبين الشكل (5–9) عناصر المضخة الحرارية التي تعمل على أساس نظام تبريدي (تبريد) صيفاً *Cooling Mode* ويبين الشكل (5–10) عناصر دورة المضخة الحرارية التي تعمل على أساس نظام تسخيني (تدفئة) شتاءً *Heating Mode* حيث يتم نقل الحرارة التي تم امتصاصها من الوسط الخارجي إلى الفراغ. عملية التبديل بين الفعل التبريدي صيفاً والفعل التسخيني شتاءً والذي يتم باستخدام صمام ثلاثي يسمى صمام قلب *Reversing Valve* يقوم بتغيير حركة وسيط الشتغيل ضمن الدارة.

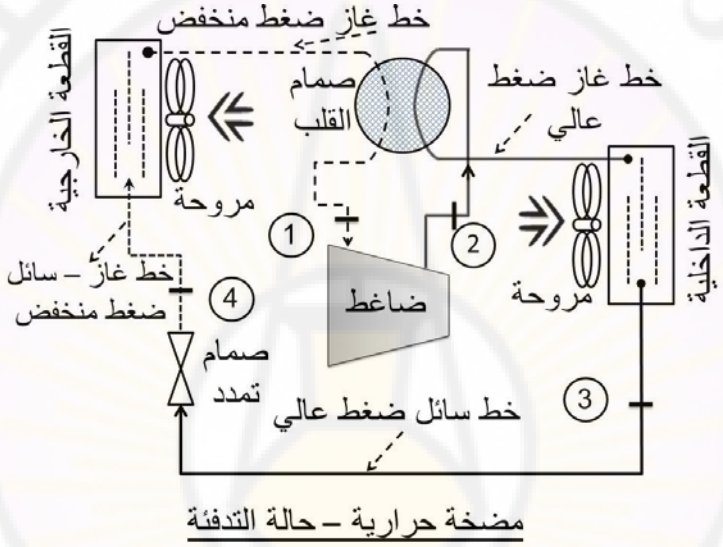


مضخة حرارية – حالة التبريد

الشكل (9–5) مضخة حرارية – حالة تبريد.

من أكبر مشاكل المضخة الحرارية في الشتاء هو الجليد *Frosting* المتكون على المبخرة وخاصة عندما تكون رطوبة الوسط الخارجي عالية جداً. عندما تبلغ درجة حرارة الوسط

الخارجي بين (2°C) و(5°C) يبدأ الجليد بالتشكل على سطح المكثف والذي يؤدي إلى إعاقة عملية التبادل الحراري بين وسيط التبريد وهواء الوسط الخارجي وفشل المضخة الحرارية. يتم التخلص من الجليد المتكون على المبخرة بعكس الدارة أوتوماتيكياً باستخدام حساس على سطح المكثف.



مضخة حرارية – حالة التدفئة

الشكل (5–10) مضخة حرارية – حالة تدفئة.

في أغلب الدارات التبريدية تكون عملية التبادل الحراري بين وسيط التشغيل والوسط الخارجي بواسطة الهواء وتسمى بالأنظمة الهوائية هوائية *Air – Air System*. يمكن استعمال أنظمة هوائية مائية *Air-to-Water System* (أو تسمى مضخة حرارية جيوحرارية *Geothermal Heat Pump*) حيث تكون المبخرة على أعماق 80 متر تحت سطح الأرض وبدرجة حرارة من (5°C) إلى (18°C). في الأنظمة المائية الهوائية يكون معامل الأداء بين (1.5) إلى (4) بحسب درجة حرارة الطبقة الأرضية.

8.5 دورات تبريدية متطورة.

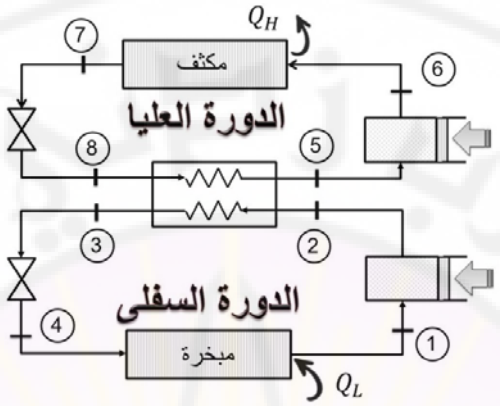
في الدورة التبريدية البسيطة ذات المرحلة الواحدة *Single Stage System* (الضاغط الواحد) يكون مجال درجات الحرارة المطلوبة بين $(+10°C \text{ و} -30°C)$ وعندما تكون درجات الحرارة التبريدية المطلوبة منخفضة جداً اي أقل من $(-30°C)$ فإن الدورة التبريدية بمرحلة واحدة لايمكن أن تحقق ذلك بسبب أن نسبة الضغوط *Compression Ratios* بين المبخرة والمكثفة تكون كبيرة جداً. من مشاكل النسب العالية في الضغوط

- انحفاظ مردود الضاغط.
- ارتفاع من درجة حرارة بخار وسيط التبريد الخارج من الضاغط.
- زيادة في استهلاك الطاقة بالنسبة إلى واحدة الإنتاج التبريدي.

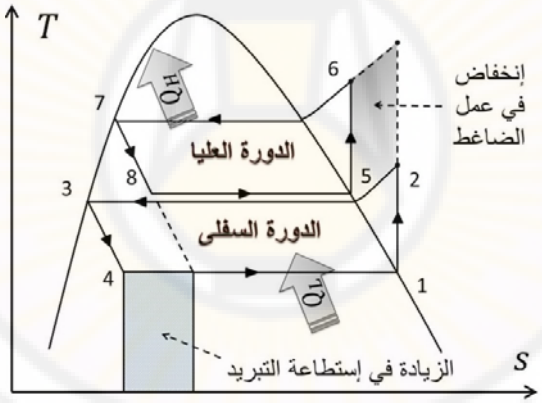
ومن أجل الوصول إلى درجات حرارة منخفضة نقوم باستخدام إما الدورات التبريدية التسلسلية *Cascade Refrigeration Systems* أو الدورات التبريدية المتعددة المراحل *Multistage Refrigeratoin Systems*. يتم في هذه الدرورات ربط الضواغط هذه التسلسل مع تبريد بيني كما شاهدنا في فصل الضواغط من أجل الحصول على نسب ضوغط مرتفعة. تصل درجة حرارة وسيط التبريد في الدورات التبريدية التي تستعمل ضاغطين على التسلسل إلى $(-65°C)$ والدورات التي تستعمل ثلاثة ضواغط إلى $(-100°C)$.

1.8.5 الدورات التبريدية التسلسلية *Cascade Refrigeration Systems*.

تستعمل الدورات التبريدية التسلسلية عندما تكون درجات الحرارة المطلوبة أكبر من $(-70°C)$. تستعمل الدورات التبريدية التسلسلية في تسيل الغاز الطبيعي *Liquefaction*. يبين الشكل (11-5) عناصر الدورة التبريدية التسلسلية بمرحلتين وذات وسيط تبريدي مشترك كما يبين الشكل (12-5) بارامترات الدورة التبريدية التسلسلية بمرحلتين وذات وسيط تبريدي مشترك على مخطط $(T - s)$.



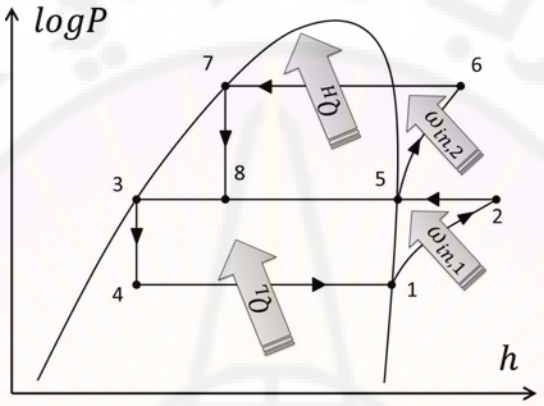
الشكل (11–5) عناصر الدورة التبريدية التسلسلية ثنائية المرحلة ونفس الوسيط.



الشكل (12–5) مخطط $(T-s)$ للدورة التبريدية التسلسلية ثنائية المرحلة ونفس الوسيط.

كما يبين الشكل (13–5) بارامترات الدورة التبريدية التسلسلية بمرحلتين وذات وسيط تبريدي مشترك على مخطط $(logP-h)$. الدورتان متصلتان مع بعضهما البعض بواسطة مبادل حراري *Heat Exchanger* مثالي يعمل على شكل مبخرة للدورة العليا *(A)*

ومكثف للدورة السفلى *(B)*. باعتبار أن المبادل الحراري معزول ومثالي والطاقة الحركية والكامنة مهملة، فإن الحرارة المتبادلة بين



الشكل (13–5) مخطط ($logP - h$) للدورة التبريدية التسلسلية ثنائية المرحلة ونفس الوسيط.

الدورتين متساوية وبالتالي تكون التدفقات من الدورة السفلى والعليا

$$\dot{m}_A(h_5 - h_8) = \dot{m}_B(h_2 - h_3)$$

أي أن

$$\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_B} = \frac{h_2 - h_3}{h_5 - h_8} \qquad (15\text{-}5)$$

ولكن

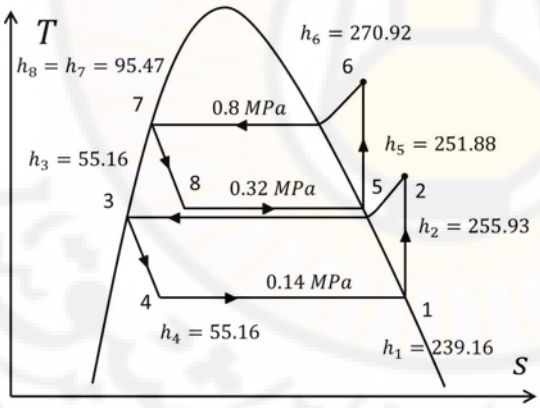
$$COP_{R,cascade} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in,net}}$$

بالتعويض في علاقة معامل الأداء نجد أن

$$COP_{R,cascade} = \frac{\dot{m}_B(h_1 - h_4)}{\dot{m}_A(h_6 - h_5) + \dot{m}_B(h_2 - h_1)} \qquad (16\text{-}5)$$

مثال تطبيقي 5–3 – دورة تبريدية تسلسلية بمرحلتين.

تعمل دورة تبريدية تسلسلية بمرحلتين بين ضغط $(0.8\,MPa)$ و $(0.14\,MPa)$. وسيط التبريد المستخدم في كل دورة هو فريون $(134A)$. التبادل الحراري في المبادل المتعاكس هو أدياباتي حيث يدخل بخار وسيط التبريد بضغط $0.32\,MPa$ (فعليا الدارة السفلية تعمل على ضغط وحرارة أعلى في المبادل لتوفير انتقال حرارة فعال). بفرض أن التدفق الكتلي $(0.05\,kg/s)$، حدد 1) التدفق في الدارة السفلى و2) الحرارة الممتصة من الفراغ والعمل المصروف على الضاغط 3) معامل الأداء الدورة التبريدية التسلسلية.



الفرضيات: 1) كافة العناصر تعمل بشكل مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة 3) المبادل الحراري يعمل بشكل أدياباتي.

التحليل: يبين الشكل درجات الحرارة والضغوط لوسيط التشغيل ضمن الدورة في مختلف النقاط، الدورة العليا هي A والدورة السفلى هي B. أيضا لكلا الدورتين يخرج الوسيط بحالة سائل مشبع من المكثف ويدخل الضاغط بشكل بخار مشبع. كافة المعطيات عن نقاط الدورة محددة على مخطط $(T - s)$.

1- التدفق في الدورة السفلى يحدد من معادلة التوازن الطاقي في المبادل الحراري المثالي

$$\dot{E}_{out} = \dot{E}_{in}$$

$$\dot{m}_A(h_5 - h_8) = \dot{m}_B(h_2 - h_3)$$

بالتعويض في المعادلة السابقة نجد أن

$$\left(0.05\frac{kg}{s}\right)\left\{(251.88 - 95.47)\frac{kJ}{kg}\right\} = \dot{m}_B\left\{(255.93 - 55.16)\frac{kJ}{kg}\right\}$$

$$\dot{m}_B = 0.0390\ kg/s$$

2 – كمية الحرارة الممتصة والعمل المصروف

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_B\ (h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_L = \left(0.0390\frac{kg}{s}\right)\left((239.16 - 55.16)\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\dot{Q}_L = 7.18\ kW$$

$$\dot{W}_{in} = \dot{W}_{in,comp\ I} + \dot{W}_{in,comp\ II}$$

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}_A(h_6 - h_5) + \dot{m}_B(h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_{in} = \left(0.05\frac{kg}{s}\right)(270.92 - 251.88) + \left(0.039\frac{kg}{s}\right)(255.93 - 239.16)$$

$$\dot{W}_{in} = 1.61\ kW$$

3 – معامل الأداء للدورة

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{7.18}{1.61}$$

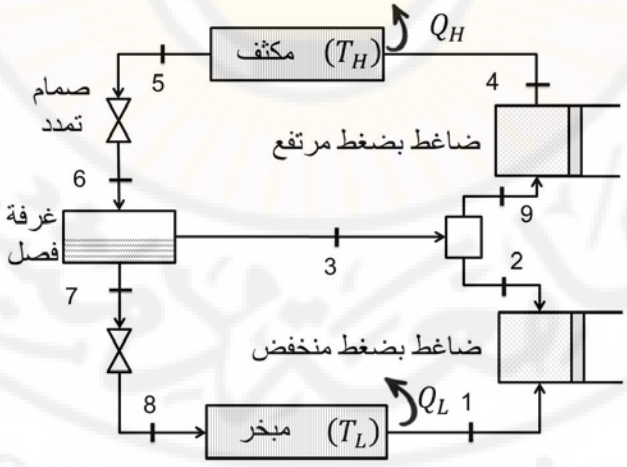
$$COP_R = 4.46$$

ملاحظة: نجد من هذا المثال أن معامل الأداء ارتفع من 3.97 (مثال تطبيقي 5 – 1) إلى 4.46 بسبب وجود الدورات التسلسلية. يمكن زيادة هذا العامل برفع عدد الدورة المتسلسلة.

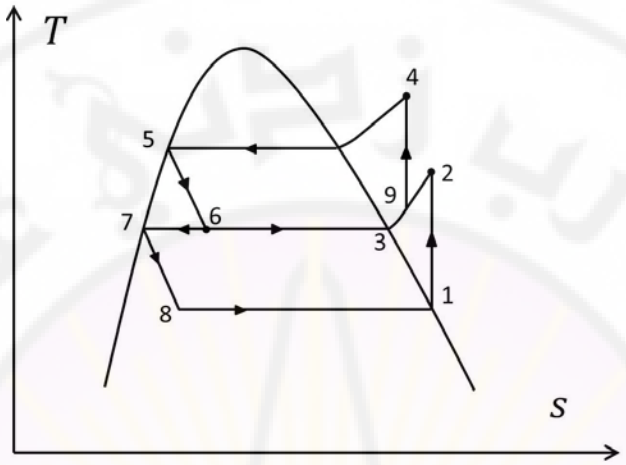
2.8.5 الدورات التبريدية المتعددة المراحل *Multistage Refrigeration Systems*.

عندما تكون درجة الحرارة التبريدية منخفضة جداً عندما نحول المبادل الحراري ذا الجريان العكوس إلى غرفة مزج *Mixing Chamber* أو ما تسمى غرفة الانفلات *Flash Chamber* في الدورة التبريدية التسلسلية فإننا نحصل على مواصفات تبادلية أفضل في الدورة. تسمى هذه الدورات بالدورات التبريدية المتعددة المراحل *Multistage Refrigeration Systems*.

يبين الشكل (14–5) عناصر الدورة التبريدية التسلسلية المتعددة المراحل كما يبين الشكل (15–5) مخطط $(T-s)$ لهذه الدورة. في هذا النظام يتمدد وسيط التبريد بواسطة صمام تمدد إلى ضغط غرفة فصل *Flash Intercooler* ويتبخر جزء من السائل خلال هذه العملية. يمتزج البخار المشبع عند النقطة (3) مع البخار المحمص من الدورة السفلى في النقطة (2) ويدخل المزيج إلى ضاغط الدورة العليا عند النقطة (9). يتمدد السائل المشبع الموافق للنقطة (7) بواسط صمام التمدد ويدخل الوسيط التبريدي إلى المبخرة لامتصاص حرارة الفراغ.



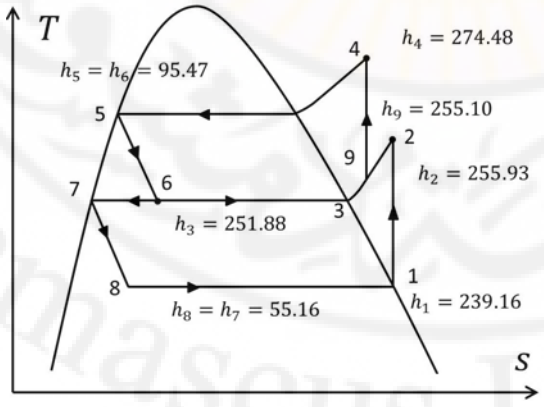
الشكل (14–5) عناصر الدورة التبريدية المتعددة المراحل مع غرفة فصل.



الشكل (15–5) مخطط $(T - s)$ للدورة التبريدية المتعددة المراحل مع فصل.

<u>مثال تطبيقي 5–4 – دورة تبريدية متعددة المراحل مع غرفة فصل (إنفلات).</u>

تعمل دورة تبريدية تسلسلية بمرحلتين بين ضغط $(0.8\ MPa)$ و $(0.14\ MPa)$. وسيط التبريد المستخدم في كل دورة هو فريون $(134A)$. يخرج وسيط التبريد إلى المكثف على شكل سائل مشبع ويخنق إلى ضغط $(0.32\ MPa)$ يساوي ضغط غرفة الفصل. بفرض أن الضواغط في الدورة هي ضواغط إيزونتربية حدد 1) كمية وسيط التبريد المتحولة إلى بخار (مخنوقة) في غرفة الفصل 2) الحرارة الممتصة من الفراغ والعمل المصروف على الضاغط 3) معامل الأداء للدورة التبريدية متعددة المراحل.



الفرضيات: 1) كافة العناصر تعمل بشكل مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة 3) غرفة المزج تعمل بشكل أدياباتي.

التحليل: يبين الشكل درجات الحرارة والضغوط لوسيط التشغيل ضمن الدورة في مختلف النقاط، أيضا يخرج الوسيط بحالة سائل مشبع من المكثف ويدخل الضاغط بشكل بخار مشبع كافة المعطيات عن نقاط الدورة محددة على مخطط $(T-S)$. كمية وسيط التبريد المخنوق (المتحول إلى بخار) يحدد من الحالة (6) من مخطط $(T-s)$ كما يلي

$$\aleph_6 = \frac{h_6 - h_f}{h_{fg}}$$

$$\aleph_6 = \frac{95.47 - 55.16}{196.71}$$

$$\aleph_6 = 0.2049$$

كمية الحرارة الممتصة والعمل المصروف

$$q_L = (1 - \aleph_6)(h_1 - h_6)$$

$$q_L = (1 - 0.2049)\left((239.16 - 55.16)\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$q_L = 146.3\ \frac{kJ}{kg}$$

$$W_{in} = W_{in,pump\ I} + W_{in,pump\ II}$$

$$W_{in} = (1 - \aleph_6)(h_2 - h_1) + (h_4 - h_9)$$

الإنتالبي للحالة (9) يحسب من توازن الطاقة لغرفة الفصل

$$\dot{E}_{out} = \dot{E}_{in}$$

$$h_9 = \aleph_6 h_3 + (1 - \aleph_6)h_2$$

$$h_9 = (0.2049)(251.88) + (1 - 0.2049)(255.93)$$

$$h_9 = 255.10\frac{kJ}{kg}$$

وأيضا تكون

$$s_9 = 0.9416\ kJ/kg\ K$$

أيضا يكون إنتالبي الحالة (4)

$$s_4 = s_9 \text{ و } 0.8\ MPa$$

$$h_4 = 274.48\ kJ/kg$$

بالتعويض نجد أن العمل المصروف

$$W_{in} = 32.71\ kJ/kg$$

معامل الأداء للدورة

$$COP_R = \frac{q_L}{w_{in}} = \frac{146.3}{32.71} = 4.47$$

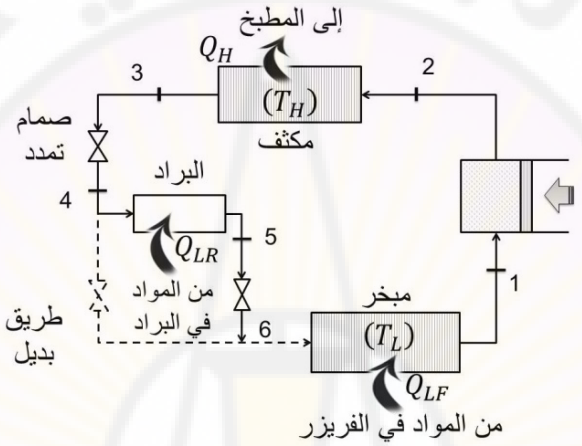
ملاحظة:

نجد من هذا المثال أن معامل الأداء ارتفع من 3.97 (مثال تطبيقي 5 – 1) إلى 4.46 (مثال تطبيقي 3–3) باستخدام الدورات التسلسلية إلى 4.47 في الدورات التمتعددة المراحل.

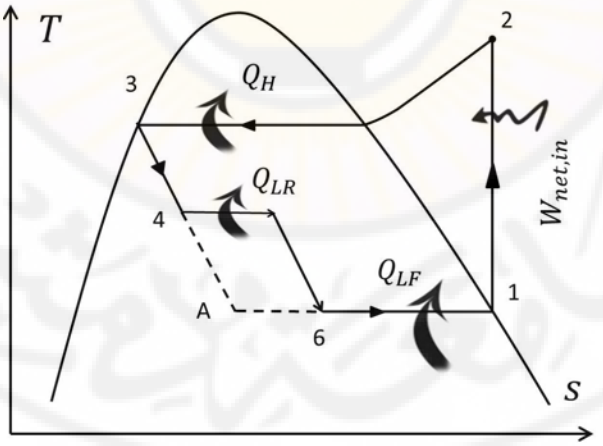
3.8.5 الدورات التبريدية المتعددة الأهداف وبضاغط واحد.

في بعض الأحيان تكون هناك حاجة إلى عملية تبريد بدرجات حرارة مختلفة. يمكن أن نحصل من عملية تبريد واحدة على مجموعة من درجات الحرارة من خلال عمليات خنق متعددة للوصول إلى تلك الدرجات وباستخدام ضاغط واحد. تسمى هذه الدورات بالدورات التبريدية المتعددة الأهداف وبضاغط واحد *Multipurpose Refrigeration Systems with Single Compressor*. يبين الشكل (5–16) عناصر الدورة التبريدية المتعددة الأهداف وبضاغط واحد لبراد منزلي. يبين الشكل (5–17)

العمليات التي تتم في الدورة التبريدية المتعددة الأهداف وبضاغط واحد لبراد منزلي. يمكن أن نحقق هذه الدورة عملياً بأخذ الوسيط المتكاثف من المكثفة وتحويله إلى مجموعة من صمامات الخنق وبالتالي الحصول على درجات تبريدية مختلفة.



الشكل (16–5) عناصر الدورة التبريدية المتعددة الأهداف وبضاغط واحد.



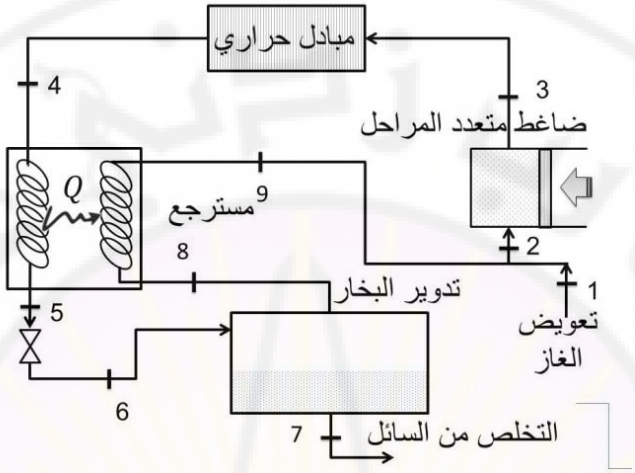
الشكل (17–5) مخطط $(T - s)$ للدورة التبريدية المتعددة الأهداف وبضاغط واحد.

4.8.5 الدورات التبريدية المستخدمة لتمييع الغاز.

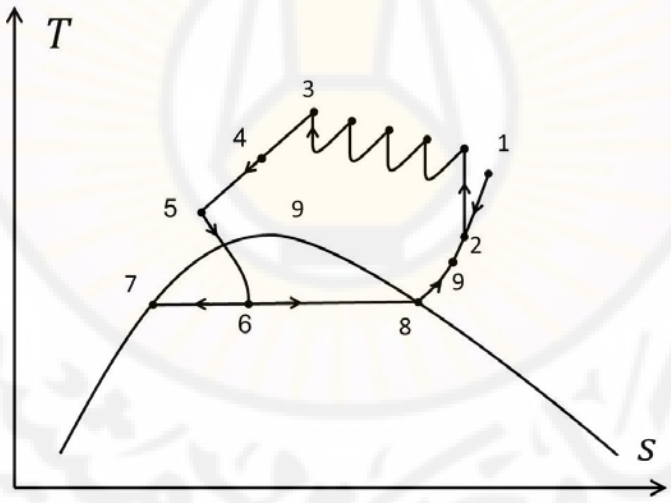
من أهم تطبيقات الدورات التبريدية هي عملية تحول وسيط التشغيل من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة. تسمى هذه الدورات بدورات تمييع الغازات *Liquefaction of Gases*. أمثلة عن العمليات الهندسية والعملية التي تعتمد على وجود وسيط التشغيل بشكل سائل وبدرجات حرارة منخفضة جداً *Cryogenic Temperatures* تحت (−100℃) هي

- ✓ عملية فصل الهيدروجين والأوكسيجين الموجود في الهواء عن طريق التبريد بالصعق *Cryogenic Cooling*.
- ✓ تحضير السائل الدفع المستخدم في الصواريخ.
- ✓ دراسة خواص المعادن في درجات حرارة منخفضة وخصوصاً معامل انتقال الحرارة.
- ✓ دراسة خاصية التوصيل السريع *Superconductivity Phenomena*.

كافة الغازات تحت درجة الحرارة الحرجة *Critical Point* تكون على شكل غاز ولايمكن أن توجد بشكل سائل فمثلا يتحول غاز الهيليوم إلى سائل عند درجة حرارة (−268℃) أما غاز الهيدوجين فيتحول إلى حالة سائلة عند (−240℃) وغاز النتروجين عند (−147℃) ودارات التبريد السابقة لايمكن أن تعطينا مثل تلك درجات الحرارة. سنعالج في هذه الفقرة كيفية تحول وسيط التشغيل إلى الحالة السائلة باستخدام دورة لايند وهامسون *Linde - Hampson Cycle*. يبين الشكل (18−5) عناصر دورة لايند هامسون كما يبين الشكل (19−5) نقاط دورة لايند هامسون على مخطط $(T-s)$. توضح الدورة إلى أن وسيط تشغيل تعويضي *Makeup Gas* والموافق للنقطة (1) يخلط مع جزء من وسيط التشغيل غير المتكاثف عند النقطة (9) فتتكون الحالة (2). يضغط وسيط التشغيل عند النقطة (2) بواسط ضاغط أحادي المرحلة أو متعدد المراحل إلى النقطة (3). يمكن الاقتراب في عملية الانضغاط تلك إلى عملية انضغاط إيزوثرمية والموافقة للعملية $(1-3)$ على مخطط $(T-s)$ بواسطة مبدأ التبريد البيني المثالي *Ideal Intercooling*.



الشكل (18–5) عناصر دورة ليند هامسون.



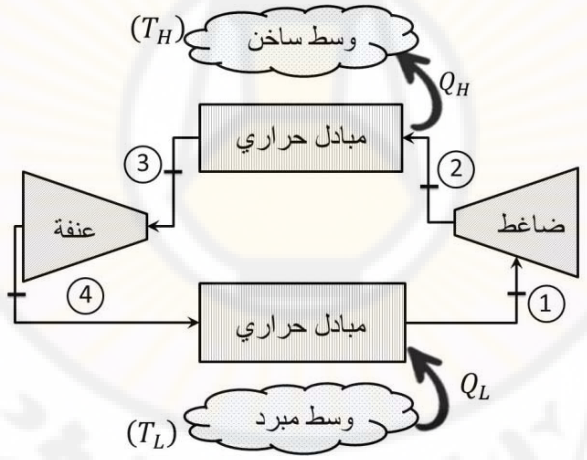
الشكل (19–5) مخطط $(T - s)$ **للدورة.**

يبرد الغاز ذو الضغط العالي والخارج من الضاغط في مبادل حراري خاص بواسطة وسيط تبريد معين أو بوساطة دورة تبريد منفصلة إلى النقطة (4). يبرد وسيط التشغيل

أكثر بواسطة مبادل حراري عكسي استرجاعي *Regenerative* إلى النقطة (5) ويمدد بالخنق إلى مزيج بخار وسائل مشبع كما في النقطة (6). يفصل السائل عن البخار كما في النقطة (7) ويجمع ضمن حاويات معينة للاستخدام ويعود البخار كما في النقطة (8) ليمزج مع وسيط التشغيل التعويضي لإعادة الدورة.

9.5 الدورة التبريدية الغازية *Gas Refrigeration Cycles*.

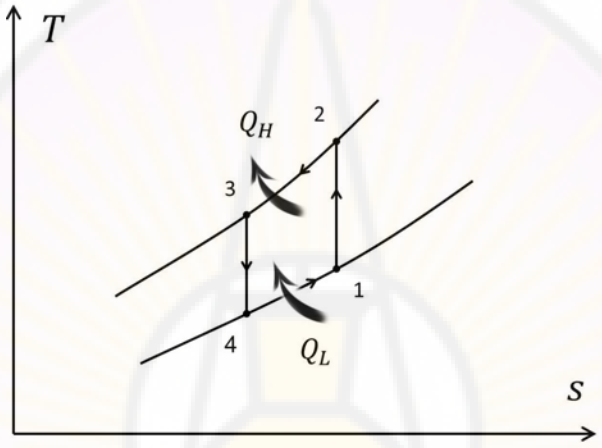
تسمى الدورة التبريدية الغازية باسم دورة برايتون العكسية لأنها تتألف من عمليتين بضغط ثابت وعمليتين إيزونتروبيتن. يتم استبدال صمام الخنق في الدورة التبريدية المثالية بجهاز تمدد *Expansion Engine*. يبين الشكل (20–5) عناصر الدورة التبريدية الغازية كما يبين الشكل (21–5) مخطط $(T-s)$ للدورة التبريدية العكسية.



الشكل (20–5) عناصر الدورة التبريدية الغازية.

يضغط وسيط التشغيل في العملية (2 – 1) إلى ضغط مرتفع بعملية إيزونتروبية وترتفع درجة حرارة وسيط الشتغيل إلى النقطة (2). يبرد وسيط التشغيل في المكثف في العملية (3 – 2) بطرح الحرارة إلى الوسط الخارجي بعملية إيزوبارية. يتمدد وسيك التشغيل

ضمن جهاز التمدد (العنفة في هذه الحالة) خلال العملية (4 – 3) بعملية إيزونتروبية حيث تنخفض درجة حرارته إلى المقطة (4). يقوم وسيط التشغيل بامتصاص كمية الحرارة المطلوبة من الفراغ خلال العملية (1 – 4) بعملية إيزوبارية ويصل إلى درجة حرارة النقطة (1).



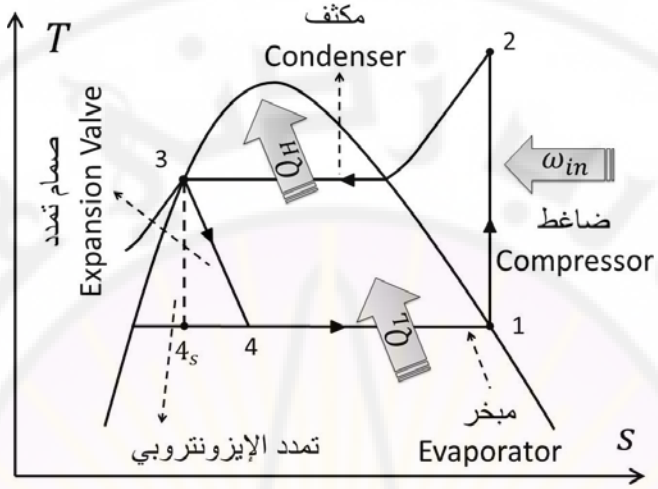
الشكل (21–5) مخطط $(T - s)$ للدورة.

كافة العمليات في الدورة هي عكوسة داخلياً والدورة تنفذ بواسطة وسيط تشغيل مثالي. يعطى معامل الأداء للدورة التبريدية الغازية بالشكل

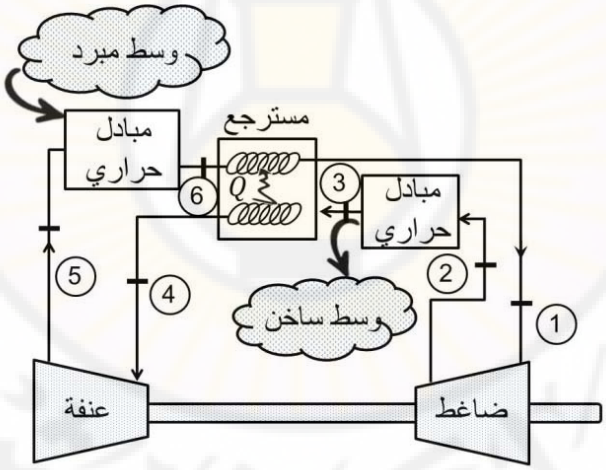
$$COP_R = \frac{q_L}{W_{net,in}} = \frac{q_L}{W_{comp,in} - W_{turb,out}}$$

$$COP_R = \frac{h_1 - h_4}{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}$$

يبين الشكل (22–5) عناصر الدورة التبريدية الغازية الاسترجاعية ويبين الشكل (23–5) مخطط الدورة على $(T - s)$.



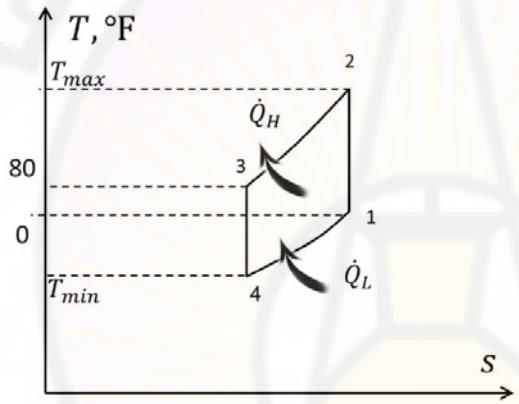
الشكل (22–5) عناصر الدورة التبريدية الغازية الاسترجاعية.



الشكل (23–5) مخطط ($T - s$) الدورة التبريدية الغازية الاسترجاعية.

مثال تطبيقي 5–5 – دورة تبريدية غازية مثالية بسيطة.

تعمل دورة تبريدية غازية مثالية بسيطة مستخدمة الهواء كوسيط تشغيل للحفاظ على درجة حرارة فراغ (0°F) حيث يتم طرح الحرارة الممتصة من الفراغ إلى الوسط الخارجي ذات درجة حرارة (80°F). نسبة الضغط هي (4). حدد 1) الحراة الدنيا والعليا في الدارة 2) معامل الأداء لهذه الدورة و3) كمية التبريد لتدفق كتلي $(0.1\ lbm/s)$.



الفرضيات 1) كافة العناصر تعمل بشكل مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة 3) الهواء هو وسيط التبريد وهو غاز مثالي والحرارة النوعية متغيرة.

التحليل: يبين الشكل درجات الحرارة لوسيط التشغيل ضمن الدورة في مختلف النقاط، الضاغط والعنفة يعملان بشكل إيزونتروبي.

1 – لتحديد درجات الحرارة الدنيا والعليا في الدارة يجب أن نحدد من العلاقات الإيزونتروبية ومن الجداول المتعلقة بالهواء التالي

$$T_1 = 400R \rightarrow$$

$$\rightarrow h_1 = 109.90\ Btu/lbm,\quad P_{r,1} = 0.7913$$

$$P_{r,2} = \frac{P_2}{P_1} P_{r,1} = 4 * (0.7913)$$

$$P_{r,2} = 3.165$$

وبالتالي نجد أن

$$h_2 = 163.50\ Btu/lbm, T_2 = 683R\ (223°F)$$

$$T_3 = 540R$$

$$\rightarrow h_3 = 129.06\ Btu/lbm, \quad P_{r,3} = 1.386$$

$$P_{r,4} = \frac{P_4}{P_3} P_{r,3} = 0.25 * (1.386)$$

$$P_{r,4} = 0.3465$$

وبالتالي نجد أن

$$h_2 = 86.7\ Btu/lbm, T_2 = 363R\ (-97°F)$$

2 – معامل الأداء للدورة

$$COP_R = \frac{q_L}{W_{net,in}}$$

$$COP_R = \frac{q_L}{W_{comp,in} - W_{turb,out}}$$

$$COP_R = \frac{h_1 - h_4}{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}$$

$$COP_R = \frac{23.2}{53.6 - 42.36}$$

$$COP_R = 2.06$$

3 – كمية التبريد

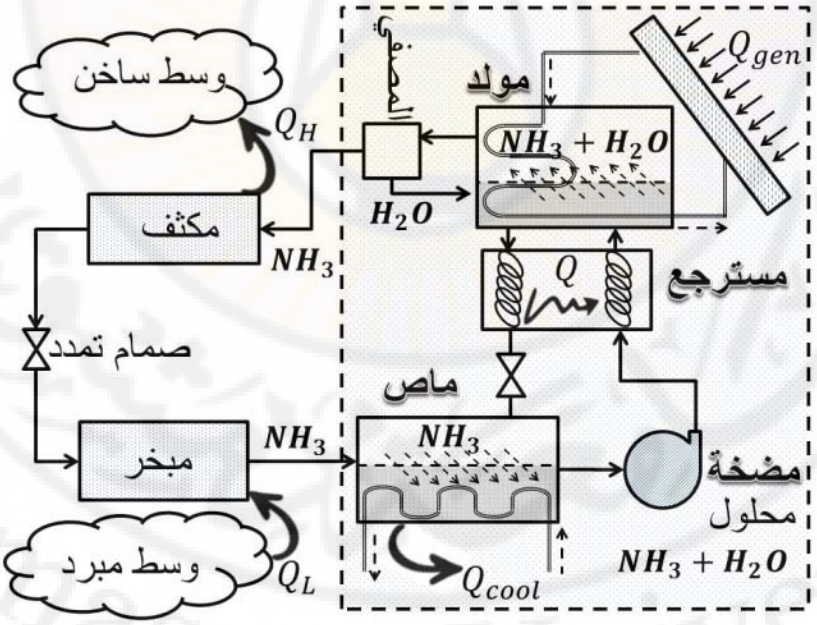
$$\dot{Q}_{ref} = \dot{m} * q_L$$

$$\dot{Q}_{ref} = (0.1\ lbm/s) * (23.2\ Btu/lbm)$$

$$\dot{Q}_{ref} = 2.32\ Btu/s$$

10.5 الدورة التبريدية الامتصاصية (*Absorption Refrigeration Systems (ARS*).

عند توافر منبع طاقي بديل بدرجة حرارة بين (100℃) و (200℃) مثل الطاقة الشمسية أو الطاقة الجيوحرارية أو الطاقة الضائعة والناتجة عن التوليد المشترك *Cogeneration* في محطات التوليد الكهربائية نستخدم المبردات الامتصاصية التي تعتمد وبشكل أساسي على هذه المنتجات الحرارية. تعتمد الدورات التبريدية الامتصاصية في عملها على عملية كيميائية تمتص وسيط التبريد المستخدم في الدارة بواسطة مادة أخرى ناقلة تسمى المادة الناقلة الوسيطة *Transport Medium*. في دورة أمونيا – ماء الامتصاصية يكون الأمونيا (NH_3) وسيط التبريد في الدارة ويكون الماء العنصر الماص (المادة الناقلة الوسيطة) أما في دورة ماء – ليثيوم بروميد *Lithium Bromide* الامتصاصية ودورة ماء – ليثيوم كلوريد *Lithium Chloride* الامتصاصية يكون الماء هو وسيط التبريد في الدارة وتكون المادة الأخرى المادة الناقلة.



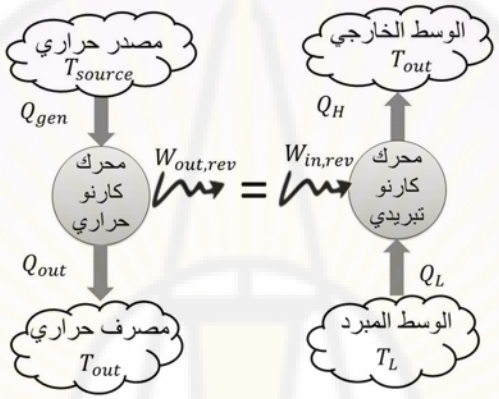
الشكل (24–5) عناصر دورة أمونيا – ماء الامتصاصية.

لايمكن استعمال الدورات الامتصاصية عند درجات حرارة أقل من نقطة تجمد الماء لذلك فإن التطبيق الأساسي لهذه الدورات يكون في مجال التكييف.

يبين الشكل (24–5) عناصر دورة أمونيا – ماء الامتصاصية التي تشبة إلى حد كبير الدورة التبريدية البخارية المثالية ولكن باستبدال الضاغط في الدورة التبريدية البخارية المثالية بمكانيزم امتصاصي موضح داخل الخط المقطع. يتألف هذا الميكانيزم من 1) عنصر ماص *Absorber* لحرارة الوسط المبرد 2) مضخة 3) مسترجع *Regenerator* 4) مولد *Generator* 5) مصفي *Rectifier*. يخرج بخار الأمونيا من المبخرة ويدخل إلى العنصر الماص حيث ينحل ويتفاعل مع الماء ويتحول إلى محلول $(NH_3 + H_2O)$. هذا التفاعل بين الأمونيا والماء هو تفاعل ناشر للحرارة إلى الوسط الخارجي *Exothermic Reaction*. تتناسب كمية الأمونيا الممتصة في الماء **طرداً** مع درجة حرارة الماء وبالتالي يجب أن نقوم بتبريد الماء إلى درجات حرارة منخفضة لنحصل على أعلى نسبة امتصاص. يضخ المحلول $(NH_3 + H_2O)$ المتكون في العنصر الماص بواسطة مضخة إلى مولد الدارة. يقوم المولد باستقبال كمية معينة من الحرارة من وسط ما كالشمس مثلاً ويضيفها إلى المحلول فيتبخر جزء من هذا المحلول إلى خليط من بخار ماء وبخار أمونيا. يدخل هذا الخليط إلى المصفي لإزالة بخار الماء الموجود في الخليط ويعيده إلى المولد. يدخل بخار الأمونيا إلى المكثف ليتحول إلى سائل مشبع ثم يمدد بواسطة صمام تمدد (خانق) ويدخل إلى المبخرة وتعاد الدورة. الفائدة من الدورة التبريدية الامتصاصية هي أننا نقوم بضغط سائل (محلول أمونيا– ماء) في الدورة الامتصاصية بدلاً من ضغط بخار (بخار وسيط التبريد) في الدورة التبريدية البخارية المثالية وبما أن عمل الدورة التبريدية في الحالة المستقرة يتناسب مع الحجم النوعي لوسيط التبريد فإن العمل اللازم للدورة الامتصاصية يكون صغير. معامل الأداء للدورة التبريدية الامتصاصية هو

$$COP_{absor} = \frac{Q_L}{Q_{gen} + W_{pump,in}} = \frac{Q_L}{Q_{gen}} \qquad (17\text{-}5)$$

في المعادلة (17−5) يمكن إهمال عمل المضخة لأنه صغير جداً. يمكن تحقيق معامل الأداء الأعظمي في الدارة الامتصاصية عندما تكون كافة المراحل عكوسة. إذا فرضنا أن كمية الحرارة الممتصة من وسط ما (Q_{gen}) تذهب إلى محرك كارنو حراري كما في الشكل (25−5)



الشكل (25−5) معامل الأداء الأعظمي للدارة الامتصاصية.

فيكون مردود هذا المحرك

$$\eta_{th,rev} = \frac{W_{rev}}{Q_{gen}}$$

$$W_{rev} = \eta_{th,rev} * Q_{gen}$$

إذا استخدمنا العمل العكوس الناتج من محرك كارنو الحراري ليزود مبرد كارنو تبريدي كما في الشكل فيكون معامل الأداء لهذا المبرد

$$COP_{R,rev} = \frac{Q_L}{W_{rev}}$$

$$COP_{R,rev} = \frac{Q_L}{\eta_{th,rev} * Q_{gen}}$$

$$COP_{R,rev} * \eta_{th,rev} = \frac{Q_L}{Q_{gen}}$$

فإن معامل الأداء الأعظمي في الدارة الامتصاصية السابقة يكون

$$COP_{rev,absor} = \frac{Q_L}{Q_{gen}} = COP_{R,rev} * \eta_{th,rev}$$

باستخدام علاقة كالفن يكون معامل الأداء الأعظمي للدراة الامتصاصية بالشكل

$$COP_{rev,absor} = \left(\frac{T_L}{T_{out} - T_L}\right) * \left(1 - \frac{T_{out}}{T_{source}}\right) \qquad (18\text{-}5)$$

حيث (T_L) درجة الحرارة الترموديناميكية للوسط المبرد و(T_{out}) درجة حرارة الوسط المحيط و(T_{source}) درجة حرارة المصدر.

ملخص فصل الدورات التبريدية.

- معامل الأداء للمبرد والمضخة الحرارية

$$COP_R = \frac{\text{الطاقة المطلوبة}}{\text{الطاقة الضرورية}} = \frac{\text{فعل التبريد}}{\text{العمل المبذول}} = \frac{Q_L}{W_{net,in}}$$

$$COP_{HP} = \frac{\text{الطاقة المطلوبة}}{\text{الطاقة الضرورية}} = \frac{\text{فعل التسخين}}{\text{العمل المبذول}} = \frac{Q_H}{W_{net,in}}$$

$$COP_{HP} = COP_R + 1$$

- معامل الأداء لدورة كارنو العكوسة

$$COP_{R,Carnot} = \frac{1}{T_H/T_L - 1}$$

$$COP_{HP,Carnot} = \frac{1}{1 - T_L/T_H}$$

- الدورة التبريدية المثالية

$$w_{net,in} = q_H - q_L$$

للضاغط

$$w_{net,in} = w_{in} = h_2 - h_1 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

للمكثف

$$q_H = h_2 - h_3 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

لصمام التمدد

$$h_4 = h_3 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

للمبخر

$$q_L = h_1 - h_4 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

معامل الأداء

$$COP_R = \frac{q_L}{w_{net,in}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$COP_{HP} = \frac{q_H}{w_{net,in}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

- الدورة التبريدية الغازية

$$COP_R = \frac{q_L}{W_{net,in}} = \frac{q_L}{W_{comp,in} - W_{turb,out}}$$

$$COP_R = \frac{h_1 - h_4}{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}$$

- الدورة التبريدية الامتصاصية

$$COP_{absor} = \frac{Q_L}{Q_{gen} + W_{pump,in}} = \frac{Q_L}{Q_{gen}}$$

$$COP_{rev,absor} = \frac{Q_L}{Q_{gen}} = \eta_{th,rev} * COP_{R,rev}$$

$$COP_{rev,absor} = \left(1 - \frac{T_{out}}{T_{source}}\right)\left(\frac{T_L}{T_{out} - T_L}\right)$$

مسائل غير محلولة لفصل
الدورات التبريدية.

1. يستخدم براد منزلي وسيط التشغيل $(134A)$ والذي يعمل عى دورة تبريدية مثالية بين الضغط $(0.12\ MPa)$ و $(0.7\ MPa)$. التدفق لوسيط التشغيل هو $(0.05\ kg/s)$. ارسم الدورة على مخطط $(T-s)$ وحدد 1) كمية الحرارة المزالة من غرفة البراد واستطاعة الضاغط 2) كمية الحرارة المطروحة إلى الوسط الخارجي و3) معامل الأداء للبراد.

2. يدخل وسيط التشغيل $(134A)$ إلى ضاغط دورة تبريدية مثالية على شكل بخار محمص بالشروط $[0.14\ MPa, -10°C]$ وبتدفق $(0.12\ kg/s)$ ويخرج منه بالشروط $[0.7\ MPa, 50°C]$. يبرد الوسيط في مكثف إلى الشروط التالية $[0.65\ MPa, 24°C]$ ويخنق إلى $[0.15\ MPa]$. بإهمال الضياعات ضمن الأنابيب ارسم الدورة على مخطط $(T-s)$ وحدد 1) كمية الحرارة المزالة من الفراغ المبرد واستطاعة الضاغط 2) المردود الإيزونتروبي للضاغط و3) مردود الدورة.

3. تعمل مضخة حرارية على دورة تبريدية مثالية باستخدام وسيط التبريد $(134A)$ لتسخين منزل إلى درجة حرارة (75°F) باستخدام الحرارة الجوفية للأرض حيث درجة الحرارة هي (50°F). كمية الحرارة المفقودة من المنزل هي $(60000\ Btu/h)$. ضغط المبخرة هو $(50\ psia)$ والمكثف $(120\ psia)$. حدد الطاقة المقدمة إلى المضخة وماهي كمية الكهرباء الموفرة باستخدام المصدر الحراري الجوفي بدلاً من المقاومة الكهربائية.

4. مضخة حرارية تعمل على وسيط تشغيل $(134A)$ لتسخين منزل باستعمال حرارة مياه جوفية ذات درجة الحرارة (8°C). يخسر المنزل كمية من الحرارة قدرها $(60000\ kJ/h)$. يدخل الوسيط إلى الضاغط بالشروط $[280\ kPa, 0°C]$ ويخرج منه بالشروط $[1\ MPa, 60°C]$. يخرج الوسيط من المكثف عند (30°C). حدد 1) الطاقة

المقدمة إلى المضخة 2) كمية الحرارة الممتصة من الجوف المائي و3) الطاقة الموفرة باستخدام المياة الجوفية بدلاً من استعمال وشيعة كهربائية.

5. دورة تبريدية غازية تستخدم الهواء كوسيط تشغيل لإبقاء على وسط بدرجة حرارة $[-23℃]$ عندما يكون الوسط الخارجي $[27℃]$. إذا كانت نسبة الضغط (3) حدد 1) درجات الحرارة الأعظمية والأصغرية ضمن الدورة 2) معامل الأداء للدورة و3) معدل التبريد من أجل تدفق لوسيط التشغيل قدره $[0.08\ kg/s]$.

6. تزود كمية من الحرارة إلى دورة تبريدية امتصاصية من جوف أرضي (جيوحراري) عند درجة حرارة $(130℃)$ بقيمة $(500\ MJ/h)$. إذا كان الوسط الخارجي بدرجة حرارة $(25℃)$ ودرجة حرارة الفراغ المبرد هي $(-30℃)$ حدد أعظم معدل تدفق لكمية الحرارة من الوسط المبرد.

الفصل السادس

Chapter Six

ترموديناميك المزيج الغازي

Thermodynamics of Gas Mixtures

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
$c_{v,mix}$	الحرارة النوعية عند حجم ثابت للخليط لواحدة الكتل	J/kgK
$\bar{c}_{v,mix}$	الحرارة النوعية عند حجم ثابت للخليط لواحدة المولات	$J/kmolK$
$c_{v,i}$	الحرارة النوعية عند حجم ثابت لعنصر لواحدة الكتل	J/kgK
$\bar{c}_{v,i}$	الحرارة النوعية عند حجم ثابت لعنصر لواحدة المولات	$J/kmolK$
$c_{P,mix}$	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت للخليط لواحدة الكتل	J/kgK
$\bar{c}_{P,mix}$	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت للخليط لواحدة المولات	$J/kmolK$
$c_{P,i}$	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت لعنصر لواحدة الكتل	J/kgK
$\bar{c}_{P,i}$	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت لعنصر لواحدة المولات	$J/kmolK$
H_{mix}	إنتالبي الخليط	J
h_{mix}	الإنتالبي النوعي لخليط	J/kg
$\bar{h}_{mix}$	إنتالبي الخليط بالنسبة إلى واحدة المولات	$J/kmol$
h_i	الإنتالبي النوعي لعنصر	J/kg
$\bar{h}_i$	إنتالبي العنصر بالنسبة إلى واحدة المولات	$J/kmol$

i	عداد العناصر ضمن الخليط	لا بعدي
k	عنصر ضمن الخليط	لا بعدي
$m_m ix$	كتلة الخليط	kg
m_i, m_k	كتلة العنصر ضمن الخليط	kg
mf_k	الكسر الكتلي لعنصر ضمن الخليط	لابعدي
N_{mix}	عدد مولات الخليط	$kmol$
N_i, N_k	عدد مولات العنصر ضمن الخليط	$kmol$
P	الضغط	kPa أو bar
P_{mix}	ضغط الخليط	bar أو kPa
P_i, P_k	ضغط العنصر ضمن الخليط	bar أو kPa
$P_{cr,i}$	الضغط الحرج للعنصر ضمن الخليط	bar أو kPa
$P'_{cr,mix}$	الضغط العياري الحرج للخليط	bar أو kPa
R_{mix}	ثابت الخليط	$J/kg\,K$
R_u	ثابت الغازات العام	$J/kg\,K$
$r_{v,mix}$	كسر الحجوم	لابعدي
$r_{P,mix}$	كسر الضغوط	لابعدي
S_{mix}	إنتروبي الخليط	J/K
s	الإنتروبي النوعي	$J/kg\,K$
s_i	الإنتروبي النوعي لعنصر	$J/kg\,K$
$\bar{s}_i$	إنتروبي العنصر بالنسبة إلى واحدة المولات	$J/kmol\,K$
s_{mix}	الإنتروبي النوعي لخليط	$J/kg\,K$
$\bar{s}_{mix}$	إنتروبي الخليط بالنسبة إلى واحدة المولات	$J/kmol\,K$
T	درجة الحرارة	K أو ℃
T_{mix}	درجة الحرارة الخليط	K أو ℃

$T_{cr,i}$	درجة الحرارة الحرجة للعنصر ضمن الخليط	K أو ℃
$T'_{cr,mix}$	درجة الحرارة العيارية الحرجة للخليط	K أو ℃
U_{mix}	الطاقة الداخلية للخليط	J
u_i	الطاقة الداخلية النوعية لعنصر	J/kg
$\bar{u}_i$	الطاقة الداخلية العنصر بالنسبة إلى واحدة المولات	$J/kmol$
u_{mix}	الطاقة الداخلية النوعية لخليط	J/kg
$\bar{u}_{mix}$	الطاقة الداخلية الخليط بالنسبة إلى واحدة المولات	$J/kmol$
u	الطاقة الداخلية النوعية	J/kg
V	الحجم	m^3
V_{mix}	حجم الخليط	m^3
v	الحجم النوعي	m^3/kg
v_i, v_k	الحجم النوعي للعنصر ضمن الخليط	m^3/kg
y_i, y_k	الكسر المولي	لا بعدي
z_{mix}	معامل الانضغاط للخليط	لا بعدي
z_i, z_k	معامل الانضغاط للعنصر ضمن الخليط	لا بعدي
$\eta_{th,carnot}$	المردود الحراري لدورة كارنو المثالية	لا بعدي
μ_{mix}	الكتلة المولية الظاهرية	$kg/kmol$
μ_i, μ_k	الكتلة المولية للعنصر ضمن الخليط	$kg/kmol$

مقدمة الفصل.

في الفصول السابقة تعرفنا على البارامترات الترموديناميكية لوسيط تشغيل ذي طور واحد فقط مثل الماء ووضعنا لها الأسس الترموديناميكية المناسبة ولكن في التطبيقات الهندسية يكون وسيط التشغيل عبارة عن مجموعة من المواد أو الوسائط المختلطة ذات الطور الواحد تسمى بالخليط *Mixture* فكيف يمكننا فهم بارامترات هذه الخلائط ومعالجتها ترموديناميكاً.

سنقوم في هذا الفصل بالتعامل مع الخليط بأنه مجموعة من **الغازات غير المتفاعلة** والتي تشكل وسيط تشغيل ذا طور واحد متجانس *Homogeneous*. تعتمد مواصفات أو بارامترات هذا الخليط على 1) بارامترات كل مكون *Component* أو *Constitute* من مكونات هذا الخليط 2) وعلى كمية كل مكون من المكونات ضمن هذا الخليط.

لكي نتعامل مع هذا الخليط يجب علينا أن نضع القواعد والشروط اللازمة لتحديد وتوصيف بارامترات هذا الخليط من خلال معرفة 1) مكونات هذا الخليط بالتفصيل 2) وبارامترات كل مكون من مكوناته على حدة. سندرس هذا الخليط بأنه وسيط تشغيل مثالي ثم نضع القواعد المناسبة لمقاربته مع الحالة الحقيقية كما فعلنا عندما قاربنا الغاز المثالي مع الغاز الحقيقي. يجب الإشارة إلى أن القواعد والشروط السابقة التي طبقت على الخلائط الغازية يمكن أن تستخدم لمعرفة بارامترات كل من خلائط السوائل والتي تسمى محاليل *Solutions* وخلائط المواد الصلبة.

الفوائد العلمية من الفصل

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ تطوير العلاقات الأساسية للخلائط الغازية غير المتفاعلة وتحديد بارامتراتها الترموديناميكية.
- ✓ إيجاد علاقة تحدد كل مكون من مكونات الخليط مثل النسب الكتلية *Mass Fraction* والنسب المولية *Mole Fraction* والنسب الحجمية *Volume Faction*.

- ✓ تطبيق القواعد والنتائج على الخلائط المثالية ومقاربتها مع الخلائط الحقيقية.
- ✓ معرفة تصرف هذه الخلائط على مخطط $(P - v - T)$ اعتماداً على قانون دالتون *Dalton's Law* للضغوط الجزئية وقانون أماغات *Amagat's Law* للحجموم الجزئية.

محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.6	تركيب الخليط الغازي والنسب الكتلية والمولية للخليط.	356
2.6	أداء الخليط الغازي على مخطط $(P-v-T)$ للغازات المثالية والحقيقية.	361
1.2.6	قانون دالتون وأماغات للغازات المثالية.	362
2.2.6	قانون دالتون وأماغات للغازات الحقيقية.	364
3.6	بارامترات الخليط الغازي المثالي والحقيقي.	370
1.3.6	الحرارة النوعية للخليط.	370
2.3.6	الطاقة الداخلية للخليط.	371
3.3.6	إنتالبي الخليط.	378
4.3.6	إنتروبي الخليط.	378
	ملخص الفصل.	382
	مسائل غير محلولة.	386
	نهاية الفصل.	386

1.6 تركيب الخليط الغازي والنسب الكتلية والمولية.

يتحدد تركيب الخليط الغازي *Composition of Gas Mixtures* من خلال معرفة مركبات *Composition* هذا الخليط والخواص الفيزيائية لهذه المركبات. هناك طريقتان لوصف مكونات الخليط، الطريقة الأولى هي تحديد عدد مولات كل عنصر من عناصر الخليط والتي تسمى بالتحليل المولي *Molar Analysis* والطريقة الثانية هي تحديد كتل كل عنصر من عناصر الخليط والتي تسمى بالتحليل الوزني *Gravimetric Analysis*.

بفرض أن لدينا خليطاً مكوناً من (k) مركب وذا كتلة (m_{mix}) وعدد مولات (N_{mix}) حيث أن كتلة الخليط تساوي مجموع كتل كل عنصر مكون لهذا الخليط

$$m_{mix} = \sum_{i=1}^{k} m_i \qquad (kg) \tag{1-6}$$

وعدد مولاته تساوي مجموع مولات كل عنصر مكون لهذا الخليط

$$N_{mix} = \sum_{i=1}^{k} N_i \quad (kmol) \tag{2-6}$$

نسبة كتلة العنصر إلى كتلة الخليط تسمى الكسر الكتلي *Mass Fraction (mf)* للعنصر (k) تعطي بالعلاقة

$$(mf)_k = \frac{m_k}{m_{mix}} \tag{3-6}$$

ونسبة عدد مولات العنصر إلى عدد مولات الخليط تسمى الكسر المولي *Mole Fraction (y)* للعنصر (k) وتعطى بالعلاقة

$$y_k = \frac{N_k}{N_{mix}} \tag{4-6}$$

عند تقسيم المعادلة $(1-6)$ على كتلة الخليط (m_{mix}) يكون مجموع الكسور الكتلية لمركبات الخليط يساوي الواحد كما في العلاقة

$$\sum_{i=1}^{k}(mf)_i = 1 \qquad (5\text{-}6)$$

وعند تقسيم المعادلة (2-6) على عدد مولات الخليط (N_{mix}) يكون مجموع الكسور المولية لمركبات الخليط تساوي الواحد كما في العلاقة

$$\sum_{i=1}^{k} y_i = 1 \qquad (6\text{-}6)$$

وبما أن كتلة الخليط هي عدد مولات هذه الخليط مضروباً بالكتلة المولية للخليط فيمكن أن نعبر عن الكتلة المولية الظاهرية *Apparent Molar Mass* (μ_m) للخليط بالعلاقة التالية

$$\mu_{mix} = \frac{m_{mix}}{N_{mix}} \quad \left(\frac{kg}{kmol}\right) \qquad (7\text{-}6)$$

يمكن كتابتها بدلالة الكسر المولي للخليط بالشكل

$$\mu_{mix} = \frac{\sum m_k}{N_{mix}} = \frac{\sum(N_k\mu_k)}{N_{mix}}$$

أي أن

$$\mu_{mix} = \sum_{i=1}^{k}(y_i * \mu_i) \qquad (8\text{-}6)$$

أو يمكن كتابتها بدلالة الكسر الكتلي بالشكل

$$\mu_{mix} = \frac{m_{mix}}{\sum m_k/\mu_k} = \frac{1}{(\sum m_k/\mu_k)/m_{mix}} = 1/\left(\sum \frac{m_k}{\mu_k * m_{mix}}\right)$$

أي أن

$$\mu_{mix} = 1 \Big/ \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{mf_i}{\mu_i}\right) \qquad (9\text{-}6)$$

نلاحظ أن العلاقة بين الكسر المولي والكسر الكتلي للخليط يعطى بالعلاقة

$$\sum_{i=1}^{k} (y_i * \mu_i) = 1 \Big/ \sum_{i=1}^{k} mf_i/\mu_i$$

اي ان

$$(mf)_k = \left(\frac{\mu_k}{\mu_{mix}}\right) * y_k \qquad (10\text{-}6)$$

يعطى ثابت الخليط بتقسيم ثابت الغازات العامة على الكتلة المولية الظاهرية للخليط بالعلاقة

$$R_{mix} = \frac{R_u}{\mu_{mix}} \qquad (11\text{-}6)$$

المثال التطبيقي 6-1 – الكسر المولي والكتلي لخليط.

خليط يتألف من $(O_2, 3kg)$ و $(N_2, 5kg)$ و $(CH_4, 3kg)$ حدد 1) الكسر الكتلي لكل عنصر من عناصر الخليط و2) الكسر المولي لكل عنصر من عناصر الخليط و3) الكتلة المولية الظاهرية وثابت الخليط.

التحليل: 1) الكتلة الكلية للخليط هي

$$m_{mix} = m_{O_2} + m_{N_2} + m_{ch_4} = 3 + 5 + 12 = 20\ kg$$

الكسر الكتلي لكل عنصر هو

$$mf_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{m_m} = \frac{3}{20} = 0.15$$

$$mf_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{m_m} = \frac{5}{20} = 0.25$$

$$mf_{ch_4} = \frac{m_{ch_4}}{m_m} = \frac{12}{20} = 0.6$$

والعلاقة التالية محققة

$$\sum_{i=1}^{k} (mf)_i = 1$$

2) الكتلة المولية لكل عنصر هي

$$N_{o_2} = \frac{m_{o_2}}{\mu_{o_2}} = \frac{3\ kg}{32\ kg/kmol} = 0.094\ kmol$$

$$N_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{\mu_{N_2}} = \frac{5\ kg}{28\ kg/kmol} = 0.179\ kmol$$

$$N_{ch_4} = \frac{m_{ch_4}}{\mu_{ch_4}} = \frac{12\ kg}{16\ kg/kmol} = 0.75\ kmol$$

$$N_{mix} = N_{o_2} + N_{N_2} + N_{ch_4} = 0.094 + 0.179 + 0.75 = 1.023\ kmol$$

$$y_{o_2} = \frac{N_{o_2}}{N_{mix}} = \frac{0.094\ kmol}{1.023\ kmol} = 0.092$$

$$y_{N_2} = \frac{N_{N_2}}{N_{mix}} = \frac{0.179\ kmol}{1.023\ kmol} = 0.175$$

$$y_{ch_4} = \frac{N_{ch_4}}{N_{mix}} = \frac{0.75\ kmol}{1.023\ kmol} = 0.733$$

والعلاقة التالية محققة

$$\sum_{i=1}^{k} y_i = 1$$

3) الكتلة الظاهرية هي

$$\mu_{mix} = \frac{m_{mix}}{N_{mix}} = \frac{20\ kg}{1.023\ kmol} = 19.6\ kg/kmol$$

$$\mu_{mix} = \sum y_i\ \mu_i = y_{o_2}\mu_{o_2} + y_{N_2}\mu_{N_2} + y_{ch_4}\mu_{ch_4}$$

$$\mu_{mix} = (0.092 * 32\ kg/kmol) + (0.175 * 28\ kg/kmol) + (0.733 * 16\ kg/kmol)$$

$$\mu_{mix} = 19.6\ kg/kmol$$

والعلاقة التالية محققة

$$(mf)_k = \left(\frac{\mu_k}{\mu_{mix}}\right) * y_k$$

فمثلاً لعنصر الأوكسجين هو

$$(mf)_{O_2} = \left(\frac{32}{19.6}\right) * 0.092$$

$$(mf)_{O_2} = 0.15$$

وثابت الخليط هو

$$R_{mix} = \frac{R_u}{\mu_m ix}$$

$$R_{mix} = \frac{8.314\ kJ/(kmol\ K)}{19.6\ kg/kmol} = 0.424\ kJ/kgK$$

المثال التطبيقي 6-2 الكتلة المولية للهواء الجاف.

احسب الكتلة المولية للهواء الجاف الذي يتألف من $(O_2, 21\%)$ و $(N_2, 78\%)$ و $(Ar, 1\%)$ وثابت الهواء الجاف.

التحليل: تحسب الكتلة المولية من العلاقة

$$\mu_{mix} = \frac{m_{mix}}{N_{mix}}$$

$$m_{mix} = 78 + 21 + 1 = 100\ kg$$

$$N_{mix} = N_{o_2} + N_{N_2} + N_{Ar}$$

$$N_{o_2} = \frac{m_{o_2}}{\mu_{o_2}} = \frac{21\ kg}{32\ kg/kmol} = 0.65\ kmol$$

$$N_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{\mu_{N_2}} = \frac{78\ kg}{28\ kg/kmol} = 2.78\ kmol$$

$$N_{Ar} = \frac{m_{ch_4}}{\mu_{Ar}} = \frac{1\ kg}{40\ kg/kmol} = 0.02\ kmol$$

$$N_{mix} = 0.65 + 2.78 + 0.02 = 3.45\ kmol$$

$$\mu_{mix} = \frac{100\ kg}{3.45\ kmol}$$

$$\mu_{mix} = \mu_{air} = \mathbf{28.98}\ \frac{\boldsymbol{kg}}{\boldsymbol{kmol}}$$

ثابت الهواء الجاف هو

$$R_{mix} = \frac{R_u}{\mu_{mix}}$$

$$R_{mix} = \frac{8.314\ kJ/(kmol\ K)}{28.98\ kg/kmol}$$

$$R_{mix} = R_{air} = \mathbf{0.287}\ \frac{\boldsymbol{kJ}}{\boldsymbol{kgK}}$$

2.6 أداء الخليط الغازي على مخطط ($P - v - T$) للغازات المثالية والحقيقية.

هناك قانونان يمكن استخدامهما للتعرف على المواصفات الفيزيائية لأي خليط.

القانون الأول الذي يمكن استخدامه هو قانون دالتون للضغوط *Dalton's Law of*

Additive Pressures والقانون الثاني هو قانون أماغات للحجوم *Amagat's Law of Additive Volumes*. يطبق قانون دالتون وأماغات على الغازات المثالية والحقيقية معاً لأنها قوانين تم الحصول عليها تجريبياً.

- يقول قانون دالتون للضغوط إن الضغط الكلي لخليط (مزيج من غازات لاتتفاعل مع بعضها البعض) بدرجة حرارة وحجم معين يساوي مجموع الضغوط الجزئية لمكونات الخليط فيما لو شغل كل عنصر من عناصر هذا الخليط الحجم نفسه وبدرجة الحرارة نفسها. يعطى قانون دالتون للضغوط

$$P_{mix} = \sum_{i=1}^{k} P_i\,(T_{mix}, V_{mix}) \quad (kPa) \qquad (12\text{-}6)$$

في المعادلة السابقة يسمى (P_i) بضغط العنصر *Component Pressure* المكون للخليط ويحسب عند درجة حرارة وحجم الخليط (T_{mix}, V_{mix}).

- يقول قانون أماغات للحجوم إن الحجم الكلي لخليط (مزيج من غازات لاتتفاعل مع بعضها البعض) بدرجة حرارة وضغط معين يساوي مجموع الحجوم الجزئية لمكونات الخليط فيما لو كان كل عنصر من عناصر الخليط يملك ضغط ودرجة حرارة الخليط نفسه. يعطى قانون أماغات للحجوم

$$V_{mix} = \sum_{i=1}^{k} V_i\,(T_{mix}, P_{mix}) \quad (m^3) \qquad (13\text{-}6)$$

في المعادلات السابقة يسمى (V_i) بحجم العنصر *Component Volume* المكون للخليط ويحسب عند درجة حرارة وضغط الخليط (T_{mix}, P_{mix}).

1.2.6 قانون دالتون وأماغات للغازات المثالية.

في الغازات المثالية تسمى نسبة ضغط مكون من مكونات الخليط عند درجة حرارة وحجم الخليط إلى الضغط الكلي للخليط بكسر الضغط ويعطي بالعلاقة

$$r_{p,mix} = \frac{P_k(T_{mix}, V_{mix})}{P_{mix}} \qquad (14\text{-}6)$$

باستخدام معادلة الغاز المثالي نلاحظ أن كسر الضغط يساوي

$$r_{p,mix} = \left(\frac{N_k * R_u * T_{mix}}{V_{mix}}\right) \Big/ \left(\frac{N_{mix} * R_u * T_{mix}}{V_{mix}}\right)$$

$$r_{p,mix} = \frac{N_k}{N_{mix}} = y_k$$

أما نسبة حجم مكون من مكونات الخليط عند درجة حرارة وضغط الخليط إلى الحجم الكلي فتسمى بكسر الحجم وتساوي

$$r_{v,mix} = \frac{V_k(T_{mix}, P_{mix})}{V_{mix}} \qquad (15\text{-}6)$$

باستخدام معادلة الغاز المثالي نلاحظ أن كسر الحجم يساوي

$$r_{v,mix} = \frac{N_k * R_u * T_{mix}/P_{mix}}{N_{mix} * R_u * T_{mix}/P_{mix}}$$

$$r_{v,mix} = \frac{N_k}{N_{mix}} = y_k$$

نلاحظ أن كسر الضغط وكسر الحجم والكسر المولي متساوية

$$r_{p,mix} = r_{v,mix} = \frac{N_k}{N_{mix}} = y_k$$

أي أن

$$\frac{P_k(T_{mix}, V_{mix})}{P_{mix}} = \frac{V_k(T_{mix}, V_{mix})}{V_{mix}} = \frac{N_k}{N_{mix}} = y_k \qquad (16\text{-}6)$$

القيمة $(y_k * P_{mix})$ تسمى الضغط الجزئي لمكون من مكونات الخليط و$(y_k * V_{mix})$ تسمى الحجم الجزئي لمكون من مكونات الخليط.

2.2.6 قانون دالتون وأماغات للغازات الحقيقية.

لحساب الخواص الفيزيائية لخليط حقيقي من الغازات نستخدم معادلة الغاز الحقيقي للخليط

$$P_{mix}V_{mix} = Z_{mix}N_{mix}R_uT \qquad (17\text{-}6)$$

بتطبيق قانون دالتون للضغوط أو قانون أماغات للحجوم على الخليط الحقيقي يمكن التحقق من أن معامل الانضغاط الكلي للخليط (Z_{mix}) يساوي مجموع معاملات الانضغاط للغازات المكونة للخليط

$$\sum_{i=1}^{k} P_i * V_i = Z_{mix} * \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{N_i}{y_i}\right) * R_uT$$

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{P_i * V_i}{N_i * R_uT} * y_i = Z_{mix}$$

باستخدام معادلة الغاز الحقيقي لعنصر كما يلي

$$P_kV_k = Z_kN_kR_uT$$

$$\frac{P_kV_k}{N_kR_uT} = Z_k$$

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{P_iV_i}{N_iR_uT} = \sum_{i=1}^{k} Z_i$$

بالتعويض لمكونات الخليط نجد أن

$$Z_{mix} = \sum_{i=1}^{k} y_i * Z_i \qquad (18\text{-}6)$$

يعطي قانون أماغات للحجوم قيماً أدق لمعامل الانضغاط الكلي للخليط لأنه يأخذ بعين الاعتبار القوى المتبادلة بين مكونات الخليط عند ضغط الخليط في حين أن قانون دالتون للضغوط يهملها. لذلك يستخدم قانون دالتون في حساب معامل الانضغاط الكلي

للخليط عند الضغوط المنخفضة ويستخدم قانون أماغات في حساب معامل الانضغاط الكلي للخليط عند الضغوط المرتفعة.

من أجل معرفة أداء الخليط الغازي على مخطط $(P-v-T)$ نختار ضغطاً عيارياً حرجاً *Pseudo-critical Pressure* يتوافق مع ضغط النقطة الحرجة ودرجة حرارة عيارية حرجة *Pseudo-critical Temperature* تتوافق مع درجة الحرارة الحرجة. هذه القيم تعطى بحسب قاعدة كي *Kay's Rule* كما يلي

الضغط العياري الحرج

$$P'_{cr,mix} = \sum_{i=1}^{k} \left(y_i * P_{cr,i}\right) \qquad (19\text{-}6)$$

درجة الحرارة الحرجة

$$T'_{cr,mix} = \sum_{i=1}^{k} \left(y_i * T_{cr,i}\right) * \qquad (20\text{-}6)$$

وبالتالي يمكن استخدام الضغط ودرجة الحرارة المستعارة في حساب معامل الانضغاط الكلي لخليط. من أجل الحصول على قيم أدق للخواص الفيزيائية للخليط نستخدم معادلات أدق مثل فاندرفالس أو غيرها من المعادلات الأخرى للغازات الحقيقية.

<u>المثال التطبيقي 6-3 – أداء الخليط الغازي غير مثالي.</u>

يحتوي خزان صلب على خليط من $(N_2, 3\ kmol)$ و $(CO_2, 5\ kmol)$ عند درجة حرارة $(300\ K)$ و $(15\ MPa)$ حدد حجم الخزان باستخدام 1) معادلة الغاز المثالي 2) قاعدة كي و3) معامل الانضغاط من قانون أماغات للحجوم و4) معامل الانضغاط من قانون دالتون للضغوط.

التحليل:

1) باعتبار أن الخليط هو خليط غازي مثالي فنجد أن الحجم الكلي هو

$$V_{mix} = \frac{N_{mix} * R_u * T_{mix}}{P_{mix}}$$

$$N_{mix} = N_{CO_2} + N_{N_2} = 3 + 5 = 8\ kmol$$

$$V_{mix} = \frac{(8\ kmol)\left(8.314 \frac{kPa * m^3}{kmol\ K}\right)(300K)}{15000\ kPa}$$

$$V_{mix} = 1.330\ m^3$$

2) حجم الخليط باستخدام قاعدة كي. الضغط العياري الحرج يعطى من العلاقة

$$P'_{cr,mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * P_{cr,i})$$

$$P'_{cr,mix} = \sum_{i=1}^{k} y_i * P_{cr,i} = y_{N_2} * P_{cr,N_2} + y_{CO_2} * P_{cr,CO_2}$$

الكسور المولية هي

$$y_{N_2} = \frac{N_{N_2}}{N_{mix}} = \frac{2\ kmol}{8\ kmol} = 0.25$$

$$y_{Co_2} = \frac{N_{CO_2}}{N_{mix}} = \frac{6\ kmol}{8\ kmol} = 0.75$$

من الجداول نجد القيم الحرجة للضغط لكل عنصر من عناصر الخليط

$$P_{cr,N_2} = 3.39\ MPa$$

$$P_{cr,CO_2} = 7.39\ MPa$$

بالتعويض نجد أن

$$P'_{cr,mix} = 0.25 * 3.39MPa + 0.75 * 7.39MPa$$

$$P'_{cr,mix} = 6.39\ MPa$$

درجة العيارية الحرجة للخليط هي

$$T'_{cr,mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * T_{cr,i})$$

$$T'_{cr,mix} = \sum_{i=1}^{k} y_i * T_{cr,i} = y_{N_2} * T_{N_2} + y_{CO_2} * T_{CO_2}$$

من الجداول نجد القيم الحرجة لدرجة الحرارة لكل عنصر من عناصر الخليط

$$T_{N_2} = 126.2K$$

$$T_{CO_2} = 304.2K$$

بالتعويض في معادلة درجة الحرارة العيارية الحرجة

$$T'_{cr,mix} = 0.25 * 126.2K + 0.75 * 304.2K$$

$$T'_{cr,mix} = 259.7\ K$$

وبالتالي يجب إيجاد درجة الحرارة المرجعية والضغط المرجعي لإيجاد معامل الانضغاط من المخططات. القيم المرجعية هي

$$T_R = \frac{T_{mix}}{T'_{cr,mix}} = \frac{300\ K}{259.7\ K} = 1.16$$

$$P_R = \frac{P_{mix}}{P'_{cr,mix}} = \frac{15\ MPa}{6.39\ MPa} = 2.35$$

من مخطط معامل الانضغاط نجد أن

$$Z_{mix} = 0.49$$

$$V_{mix} = \frac{Z_{mix} * N_{mix} * R_u * T_{mix}}{P_{mix}}$$

$$V_{mix} = \frac{0.49 * (8\ kmol)\left(8.314\ \frac{kPa * m^3}{kmol\ K}\right)(300K)}{15000\ kPa}$$

$$V_{mix} = 0.652\ m^3$$

أو يمكن حسابها وبشكل مباشر من العلاقة

$$V_{mix} = Z_{mix} * V_{ideal}$$

$$V_{mix} = 0.49 * 1.330\ m^3 = 0.652\ m^3$$

3) حجم الخليط بدلالة قانون أماغات للحجوم. لتقيم معاملات الانضغاط لكل غاز من الخليط نأخذ المخططات. لغاز النتروجين نجد أن

$$T_{R,N_2} = \frac{T_{mix}}{T_{cr,N_2}} = \frac{300\ K}{126.2\ K} = 2.38$$

$$P_{R,N_2} = \frac{P_{mix}}{P_{cr,N_2}} = \frac{15\ MPa}{3.39\ MPa} = 4.42$$

معامل الانضغاط لغاز النتروجين هو

$$Z_{N_2} = 1.02$$

لغاز ثاني أوكسيد الكربون نجد أن

$$T_{R,CO_2} = \frac{T_{mix}}{T_{cr,CO_2}} = \frac{300\ K}{304.2\ K} = 0.99$$

$$P_{R,CO_2} = \frac{P_{mix}}{P_{cr,CO_2}} = \frac{15\ MPa}{7.39\ MPa} = 2.03$$

معامل الانضغاط لغاز ثاني أوكسيد الكربون هو

$$Z_{CO_2} = 0.30$$

بالنسبة للخليط يكون

$$Z_{mix} = \sum y_i * Z_i = y_{N_2} * Z_{N_2} + y_{CO_2} * Z_{CO_2}$$

$$Z_{mix} = 0.48$$

باستخدام معادلة الغاز الحقيقي

$$V_{mix} = \frac{Z_{mix} * N_{mix} * R_u * T_{mix}}{P_{mix}} = Z_{mix} * V_{ideal} = 0.638\ m^3$$

4) حجم الخليط باستخدام قانون دالتون للضغوط. يجب فرض قيمة الحجم وبالتالي نأخذ الحجم المثالي المحسوب سابقاً

$$V_{R,N_2} = \frac{\bar{V}_{N_2}}{R_u T_{cr,N_2}/P_{cr,N_2}} = \frac{V_{mix}/N_{N_2}}{R_u T_{cr,N_2}/P_{cr,N_2}}$$

$$V_{R,N_2} = \frac{(1.33\ m^3)(2\ kmol)}{(8.314\ kPa * m^3/kmolK)(126.2K)(3390\ kPa)}$$

$$V_{R,N_2} = 2.15$$

$$V_{R,CO_2} = \frac{(1.33\ m^3)(6\ kmol)}{(8.314\ kPa * m^3/kmolK)(304.2K)(7390\ kPa)}$$

$$V_{R,CO_2} = 0.648$$

من مخططات معامل الانضغاط نجد أن

$$Z_{N_2} = 0.99$$

$$Z_{CO_2} = 0.56$$

$$Z_{mix} = \sum y_i Z_i = y_{N_2} * Z_{N_2} + y_{CO_2} * Z_{CO_2}$$

$$Z_{mx} = 0.67$$

وبالتالي

$$V_{mix} = \frac{Z_{mix} * N_{mix} * R_u * T_{mix}}{P_{mix}} = Z_{mix} * V_{ideal} = 0.891\ m^3$$

هذه القيمة أقل 33% من القيمة المفروضة وبالتالي نعيد الحسابات السابقة من أجل هذه القيمة الجديدة لنحصل على تقارب في القيمة. عندما نكرر الحسابات نجد أن قيمة

الحجم هي *0.738* والحساب التالي يكون الحجم *0.678* والحساب التالي *0.648* وهذا كاف لأن الفرق بين القيمتين الأخيرتين هو صغير.

مناقشة: من المسالة نجد أن قيم الحجم هي

خليط غاز مثالي $V_{mix} = 1.330\ m^3$

قاعدة كي $V_{mix} = 0.652\ m^3$

قانون أماغات للحجوم $V_{mix} = 0.638\ m^3$

قانون دالتون للضغوط $V_{mix} = 0.648\ m^3$

نلاحظ أن القيم قريبة جداً ولكنها بعيدة قليلاً عن قيمة الغاز المثالي لذلك قد تؤدي معاملة الخليط على أساس غاز مثالي إلى أخطاء كبيرة.

3.6 بارامترات الخليط الغازي المثالي والحقيقي.

لكي يتم التعامل مع الخليط بأنه وسيط تشغيل واحد يجب تحديد بارامتراته العامة.

1.3.6 الحرارة النوعية للخليط.

تعطى الحرارة النوعية عند حجم ثابت للخليط بدلالة واحدة المولات بالعلاقة

$$\bar{c}_{v,mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * \bar{c}_{v,i}) \quad \left(\frac{kJ}{kmol\ K}\right) \qquad (21\text{-}6)$$

والحرارة النوعية عند حجم ثابت بدلالة واحدة الكتل بالعلاقة

$$c_{v,mix} = \sum_{i=1}^{k} (mf_i * c_{v,i}) \quad \left(\frac{kJ}{kg\ K}\right) \qquad (22\text{-}6)$$

تعطى الحرارة النوعية عند ضغط ثابت للخليط بدلالة واحدة المولات بالعلاقة

$$\bar{c}_{P,mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * \bar{c}_{P,i}) \qquad \left(\frac{kJ}{kmol\ K}\right) \tag{23-6}$$

الحرارة النوعية عند ضغط ثابت للخليط بدلالة واحدة الكتل بالعلاقة

$$c_{P,mix} = \sum_{i=1}^{k} (mf_i * c_{P,i}) \quad \left(\frac{kJ}{kg\ K}\right) \tag{24-6}$$

2.3.6 الطاقة الداخلية للخليط.

تساوي الطاقة الداخلية للخليط مجموع الطاقات الداخلية للعناصر المكونة للخليط وتعطى بالعلاقة

$$U_{mix} = \sum_{i=1}^{k} U_i$$

أي أن

$$U_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (m_i * u_i) = \sum_{i=1}^{k} (N_i * \bar{u}_i) \quad (kJ) \tag{25-6}$$

تمثل $(\bar{u}_i, kJ/kmol)$ الطاقة الداخلية للعنصربالنسبة إلى واحدة المولات. الطاقة الداخلية للخليط بالنسبة إلى واحدة المولات بالعلاقة

$$\bar{u}_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * \bar{u}_i) \quad \left(\frac{kJ}{kmol\ K}\right) \tag{26-6}$$

الطاقة الداخلية النوعية

$$u_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (mf_i * u_i) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \tag{27-6}$$

في حال كانت الحرارة النوعية ثابت فيمكن التعبير عن التغيير في الطاقة الداخلية للخليط المثالي بالشكل

$$\Delta u_{mix} = \sum_{i=1}^{k} c_{v,i}(T_2 - T_1) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \tag{28-6}$$

المثال التطبيقي 6-4 – الطاقة الداخلية لخليط.

يحتوي خزان صلب معزول على غازين منفصلين يحتوي القسم الأول على غاز ثاني أوكسيد الكربون بالمواصفات التالية $(CO_2, 0.3\ kmol, 25°C, 100\ kPa)$ ويحتوي القسم الثاني على غاز الهيدروجين بالمواصفات التالية $(H_2, 4\ kmol, 50°C, 300\ kPa)$، تمت إزالة الفاصل وسمح للغازات بالخلط حدد درجة حرارة المزيج وضغطه.

الفرضيات: 1) الغازات مثالية والخليط مثالي 2) نهمل الطاقة الحركية والكامنة للنظام

التحليل: من القانون الأول في الترموديناميك على الخزان الصلب المعزول نجد أن

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E$$

$$Q - W = \Delta U$$

$$\Delta U = 0$$

$$U_{mix,2} = U_1$$

ولكن الطاقة الداخلية للغازات في الحالة قبل المزج هي

$$U_1 = \sum U_i = U_{CO_2} + U_{H_2}$$

باعتبار أن الغازات مثالية فإن

$$U_{CO_2} = m_{CO_2} * c_{v,CO_2} * T_{CO_2}$$

$$U_{H_2} = m_{H_2} * c_{v,H_2} * T_{H_2}$$

من الجداول نجد أن

$$c_{v,CO_2@25℃} = 0.6548\ \frac{kJ}{kg\ K}$$

$$c_{v,H_2@50℃} = 10.241 \frac{kJ}{kg\ K}$$

كتلة الغازات ضمن الحجوم هي

$$m_{CO_2} = \mu_{CO_2} * N_{CO_2}$$

$$m_{CO_2} = 44 \frac{kg}{kmol} * 0.3\ kmol$$

$$m_{CO_2} = 13.2\ kg$$

$$m_{H_2} = \mu_{H_2} * N_{H_2}$$

$$m_{H_2} = 2 \frac{kg}{kmol} * 4\ kmol$$

$$m_{H_2} = 8\ kg$$

كتلة الخليط هي

$$m_{mix} = m_{CO_2} + m_{H_2}$$

$$m_{mix} = 21.2\ kg$$

بالتعويض نجد أن

$$U_{CO_2} = 13.2\ kg * 0.6548\ \frac{kJ}{kg\ K} * 298K$$

$$U_{CO_2} = 2575.72\ kJ$$

$$U_{H_2} = 8\ kg * 10.241 \frac{kJ}{kg\ K} * 323$$

$$U_{H_2} = 26462.75\ kJ$$

$$U_1 = 2575.72\ kJ + 26462.75\ kJ$$

$$U_1 = 29038.47\ kg$$

الطاقة الداخلية للخليط حيث الخليط الغازي مثالي فيكون

$$U_{mix,2} = m_{mix} * \left(\sum_{i=1}^{2} mf_i * c_{v,i}\right) * T_{mix}$$

$$U_{mix,2} = 21.2\ kg * \left[\frac{13.2}{21.2} * 0.6548\ \frac{kJ}{kg\ K} + \frac{8}{21.2} * 10.241\ \frac{kJ}{kg\ K}\right] * T_{mix}$$

$$U_{mix,2} = 90.57 * T_{mix}$$

$$90.57 * T_{mix} = 29038.47\ kg$$

$$T_{mix} = 320.5\ K = 47.6℃$$

يحسب الضغط من علاقة الغاز المثالي

$$P_{mix} * V_{mix} = N_{mix} * R_u * T_{mix}$$

حجم الخليط هو حجم الخزان أي

$$V_{mix} = V_{CO_2} + V_{H_2}$$

$$V_{mix} = \left[\frac{N_{CO_2} * R_u * T_{CO_2}}{P_{CO_2}} + \frac{N_{H_2} * R_u * T_{H_2}}{P_{H_2}}\right]$$

$$V_{mix} = \left(\frac{0.3\ kmol * 298K}{100\ kPa} + \frac{4\ kmol * 323K}{300\ kPa}\right) * 8.314\ \frac{kJ}{kmol\ K}$$

$$V_{mix} = 43.24\ m^3$$

بالتعويض نجد أن

$$P_{mix} * \left[\frac{N_{CO_2} * R_u * T_{CO_2}}{P_{CO_2}} + \frac{N_{H_2} * R_u * T_{H_2}}{P_{H_2}}\right] = N_{mix} * R_u * T_{mix}$$

$$P_{mix} * \left[\frac{N_{CO_2} * T_{CO_2}}{P_{CO_2}} + \frac{N_{H_2} * T_{H_2}}{P_{H_2}}\right] = N_{mix} * T_{mix}$$

$$P_{mix} * \left[\frac{0.3kmol * 298K}{100\ kPa} + \frac{4kmol * 323K}{300\ kPa}\right] = 4.3kmol * 320.5K$$

$$P_{mix} = 264.8\ kPa$$

يمكن أيضاً حساب الخليط من قانون دالتون

$$P_{mix} = \sum_{i=1}^{k} P_i\,(T_{mix}, V_{mix}) \quad (kPa)$$

الضغط الجزئي لغاز أوكسيد الكربون يحسب من العلاقة

$$P_{CO_2} * V_{mix} = N_{CO_2} * R_u * T_{mix}$$

$$P_{H_2} * V_{mix} = N_{H_2} * R_u * T_{mix}$$

$$P_{mix} = P_{CO_2} + P_{H_2}$$

$$P_{mix} = \left(N_{CO_2} + N_{H_2}\right)\frac{R_u * T_{mix}}{V_{mix}}$$

$$P_{mix} = (4.3\ kmol)\frac{8.314\ \frac{kJ}{kmol\ K} * 320.5K}{43.24\ m^3}$$

$$P_{mix} = 264.8\ kPa$$

أو يمكن حسابها من العلاقة

$$\frac{P_k(T_{mix}, V_{mix})}{P_{mix}} = \frac{V_k(T_{mix}, V_{mix})}{V_{mix}} = \frac{N_k}{N_{mix}} = y_k$$

$$P_{mix} = \frac{P_k(T_{mix}, V_{mix})}{y_k}$$

$$P_{mix} = \frac{P_{H_2}(T_{mix}, V_{mix})}{y_{H_2}}$$

$$P_{H_2}(T_{mix}, V_{mix}) = \frac{N_{H_2} * R_u * T_{mix}}{V_{mix}}$$

$$P_{H_2}(T_{mix}, V_{mix}) = \frac{4\ kmol * 8.314\ \frac{kJ}{kmol\ K} * 320.5\ K}{43.24\ m^3}$$

$$P_{H_2}(T_{mix}, V_{mix}) = 246.5\ kPa$$

بالتعويض نجد أن ضغط الخليط

$$P_{mix} = \frac{246.5\ kPa}{4/4.3} = 264.8\ kPa$$

المثال التطبيقي 6-5 – خلط غازين مثاليين في خزان.

يحتوي خزان صلب معزول خارجياً على غازين مفصولين عن بعضهما بفاصل. الأول هو غاز الأوكسجين بكتلة $(O_2, 7\ kg)$ ودرجة حرارة (40°C) وضغط $(0.1\ MPa)$ الثاني هو غاز النتروجين بكتلة $(N_2, 4\ kg)$ ودرجة حرارة (20°C) وضغط $(0.15\ MPa)$. نزيل الفاصل بين الغازين ويسمح للغازين بالخلط. حدد 1) درجة حرارة الخليط و2) ضغط الخليط بعد الوصول إلى حالة التوازن.

الفرضيات: 1) الخزان معزول ولا يتم تبادل الحرارة مع الوسط الخارجي و2)الخليط بعد المزج هو غاز مثالي لأن الأوكسجين ذو البارامترات الحرجة $(T_{cr} = -118°C, P_{cr} = 5\ MPa)$ والنتروجين ذو البارامترات الحرجة $(T_{cr} = -147°C, P_{cr} = 3.4\ MPa)$ لأن درجات الحرارة أعلى بكثير من درجات الحرارة الحرجة ولأن الضغوط هي أقل بكثير من الضغوط الحرجة 3) لا يوجد عمل في النظام 4) النظام مغلق ولا يوجد عمل حدود.

التحليل:

1) بتطبيق قانون انحفاظ الطاقة على النظام المغلق نجد أن

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{sys}$$

$$0 = \Delta U = \Delta U_{N_2} + \Delta U_{O_2}$$

$$\left[m_{N_2} * c_{v,N_2} * (T_{mix} - T_1)_{N_2} + m_{O_2} * c_{v,O_2} * (T_{mix} - T_1)_{O_2}\right] = 0$$

$$4kg * \left(0.743 \frac{kJ}{kgK}\right)(T_{mix} - 20℃) + 7kg * \left(0.658 \frac{kJ}{kgK}\right)(T_{mix} - 40℃) = 0$$

$$T_{mix} = 32.2℃$$

2) الضغط النهائي هو

$$P_{mix}V_{mix} = N_{mix}R_uT_{mix}$$

$$N_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{\mu_{N_2}} = \frac{7\ kg}{32\ kg/kmol} = 0.219\ kmol$$

$$N_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}} = \frac{4\ kg}{28\ kg/kmol} = 0.143\ kmol$$

$$N_{mix} = N_{O_2} + N_{N_2} = 0.143 + 0.219 = 0.362\ kmol$$

$$V_{O_2} = N_{O_2} * R_u * \left(\frac{T_1}{P_1}\right)$$

$$V_{O_2} = \frac{(0.219\ kmol)(8.314\ kPa\ m^3/kmol\ K)(313K)}{100\ kPa} = 5.7\ m^3$$

$$V_{N_2} = \frac{(0.143\ kmol)(8.314\ kPa\ m^3/kmol\ K)(293K)}{150\ kPa} = 2.32\ m^3$$

$$V_{mix} = V_{O_2} + V_{N_2} = 5.7 + 2.32 = 8.02m^3$$

بالتعويض في معادلة الحالة نجد أن

$$P_{mix} = \frac{(0.362\ kmol)(8.314\ kPa\ m^3/kmol\ K)(305.2\ K)}{8.02m^3} = 114.5\ kPa$$

3.3.6 إنتالبي الخليط.

يساوي إنتالبي الخليط مجموع إنتالبي العناصر المكونة للخليط ويعطى بالعلاقة

$$H_{mix} = \sum_{i=1}^{k} H_i$$

أي أن

$$H_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (m_i * h_i) = \sum_{i=1}^{k} (N_i * \bar{h}_i) \quad (kJ) \qquad (29\text{-}6)$$

تمثل $(\bar{h}_i, kJ/kmol)$ الإنتالبي بالنسبة إلى واحدة المولات. إنتالبي الخليط بالنسبة إلى واحدة المولات بالعلاقة

$$\bar{h}_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * \bar{h}_i) \quad \left(\frac{kJ}{kmol}\right) \qquad (30\text{-}6)$$

الإنتالبي النوعي لخليط

$$h_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (mf_i * h_i) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (31\text{-}6)$$

في حال كانت الحرارة النوعية ثابتة فيمكن التعبير عن التغيير في الإنتالبي للخليط بالشكل

$$\Delta h_{mix} = \sum_{i=1}^{k} c_{P,i}(T_2 - T_1) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (31-6)$$

4.3.6 إنتروبي الخليط.

يساوي إنتروبي الخليط مجموع إنتروبي العناصر المكونة للخليط وتعطى بالعلاقة

$$S_{mix} = \sum_{i=1}^{k} S_i$$

$$S_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (m_i * s_i) = \sum_{i=1}^{k} (N_i * \bar{s}_i) \qquad \left(\frac{kJ}{K}\right) \tag{32-6}$$

تمثل $(\bar{s}_i, kJ/kmol)$ إنتروبي العنصربالنسبة إلى واحدة المولات. إنتروبي الخليط بالنسبة إلى واحدة المولات بالعلاقة

$$\bar{s}_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * \bar{s}_i) \qquad \left(\frac{kJ}{kmol\ K}\right) \tag{33-6}$$

الإنتروبي النوعي لخليط

$$s_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (mf_i * s_i) \qquad \left(\frac{kJ}{kg\ K}\right) \tag{34-6}$$

في حال كانت الحرارة النوعية ثابتة فيمكن التعبير عن التغيير في إنتروبي للخليط بالشكل

$$\Delta s_{mix} = \sum_{i=1}^{k} \left(c_{P,i}\ ln\ \frac{T_2}{T_1} - R_i\ ln \frac{P_{i2}}{P_{i1}}\right) \qquad \left(\frac{kJ}{kgK}\right) \tag{35-6}$$

<u>المثال التطبيقي 6-6 – ضياع الإكسرجي عند خلط الغازات.</u>

يحتوي خزان صلب على غازين مفصولين عن بعضهما بفاصل. الأول هو غاز الأوكسجين بكتلة $(O_2, 3\ kmol)$ الثاني هو غاز ثاني أوكسيد الكربون بكتلة $(Co_2, 5\ kmol)$ ودرجة حرارة كل غاز هي (25°C) وضغط كل غاز هو $(200\ kPa)$. نزيل الفاصل بين الغازين ويسمح للغازين بالخلط. بفرض أن الوسط الخارجي ذو درجة حرارة (25°C) حدد التغيير في الإنتروبي والضياع في الإكسرجي في حال الخلط.

الفرضيات: 1) النظام مغلق ولا يوجد عمل حدود.الخليط 2) الخليط بعد المزج هو غاز مثالي لأن كلا من الأوكسجين ذو البارامترات الحرجة $(T_{cr} = -118℃, P_{cr} = 5\ MPa)$ وثاني أوكسيد الكربون ذو البارامترات الحرجة $(T_{cr} = 31℃, P_{cr} = 7.4\ MPa)$ لأن درجات الحرارة أعلى بكثير من درجات الحرارة الحرجة ولأن الضغوط هي أقل بكثير من الضغوط الحرجة 3) لا يوجد عمل في النظام.

التحليل:

$$\Delta S_{mix} = \sum \Delta S_i = \sum N_i\, \Delta \bar{s}_i$$

$$\Delta S_{mix} = \sum N_i \left(\bar{c}_{P,i}\, ln \frac{T_{i,2}}{T_{i,1}} - R_u\, ln \frac{P_{i,2}}{P_{i,1}} \right)$$

$$\Delta S_{mix} = -R_u \sum N_i\, ln \frac{y_{i,2} * P_{mix,2}}{P_{i,1}}$$

$$\Delta S_{mix} = -R_u \sum N_i\, ln\, y_{i,2}$$

نلاحظ إلى أن التغيير في الإنتروبي لا علاقة له بتركيب الخليط ولا بالكسر المولي للخليط.

$$\Delta S_{mix} = -R_u * \left(N_{O_2}\, ln\, y_{O_2} + N_{CO_2}\, ln\, y_{CO_2} \right)$$

$$N_{mix} = N_{O_2} + N_{CO_2}$$

$$N_{mix} = 3 + 5 = 8\ kmol$$

$$y_{CO_2} = \frac{N_{CO_2}}{N_m}$$

$$y_{CO_2} = \frac{5\ kmol}{8\ kmol} = 0.625$$

$$y_{O_2} = \frac{N_{O_2}}{N_m}$$

$$y_{O_2} = \frac{3\ kmol}{8\ kmol} = 0.375$$

بالتعويض في معادلة الإنتروبي

$$\Delta S_{mix} = -\left(8.314 \frac{kPa\ m^3}{kmol\ K}\right)\{(3\ kmol * ln\ 0.375) + (5\ kmol * ln\ 0.625)\}$$

$$\Delta S_{mix} = 44\ kJ/K$$

ضياع الإكسرجي يكون

$$X_{des} = T_{out} * S_{gen} = T_{out} * \Delta S_{sys}$$

$$X_{des} = 298K * \frac{44kJ}{K} = 13.1\ MJ$$

نلاحظ إلى أن عملية الخلط ذات ضياع كبير في الطاقة.

ملخص الفصل ترموديناميك المزيج الغازي.

- الكسر الكتلي للخليط

$$(mf)_k = \frac{m_k}{m_{mix}}$$

- الكسر المولي للخليط

$$y_k = \frac{N_k}{N_{mix}}$$

- العلاقة بين الكسر المولي والكسر الكتلي

$$(mf)_k = \left(\frac{\mu_k}{\mu_{mix}}\right) * y_k$$

- الكتلة المولية الظاهرية للخليط

$$\mu_{mix} = \frac{m_{mix}}{N_{mix}} \quad \left(\frac{kg}{kmol}\right)$$

$$\mu_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * \mu_i)$$

$$\mu_{mix} = 1 \Big/ \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{mf_i}{\mu_i}\right)$$

- ثابت الخليط

$$R_{mix} = \frac{R_u}{\mu_{mix}}$$

- قانون دالتون للضغوط

$$P_{mix} = \sum_{i=1}^{k} P_i\,(T_{mix}, V_{mix}) \quad (kPa)$$

- قانون أماغات للحجوم

$$V_{mix} = \sum_{i=1}^{k} V_i\,(T_{mix}, P_{mix}) \quad (m^3)$$

- كسر الضغط وكسر الحجم والكسر المولي

$$\frac{P_k(T_{mix}, V_{mix})}{P_{mix}} = \frac{V_k(T_{mix}, V_{mix})}{V_{mix}} = \frac{N_k}{N_{mix}} = y_k$$

- معامل الانضغاط للخليط الحقيقي

$$Z_{mix} = \sum_{i=1}^{k} y_i * Z_i$$

- قاعدة كي في حساب القيم العيارية الحرجة للخليط

$$P'_{cr,mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * P_{cr,i})$$

$$T'_{cr,mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * T_{cr,i})$$

- الحرارة النوعية للخليط

عند حجم ثابت

$$\bar{c}_{v,mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * \bar{c}_{v,i}) \quad \left(\frac{kJ}{kmol\ K}\right)$$

$$c_{v,mix} = \sum_{i=1}^{k} (mf_i * c_{v,i}) \quad \left(\frac{kJ}{kg\ K}\right)$$

عند ضغط ثابت

$$\bar{c}_{P,mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * \bar{c}_{P,i}) \quad \left(\frac{kJ}{kmol\ K}\right)$$

$$c_{P,mix} = \sum_{i=1}^{k} (mf_i * c_{P,i}) \quad \left(\frac{kJ}{kg\ K}\right)$$

- الطاقة الداخلية للخليط

$$U_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (m_i * u_i) = \sum_{i=1}^{k} (N_i * \bar{u}_i) \quad (kJ)$$

$$\bar{u}_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * \bar{u}_i) \quad \left(\frac{kJ}{kmol\ K}\right)$$

$$u_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (mf_i * u_i) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

عند حرارة نوعية ثابتة، التغيير في الطاقة الداخلية

$$\Delta u_{mix} = \sum_{i=1}^{k} c_{v,i}(T_2 - T_1) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

- إنتالبي الخليط

$$H_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (m_i * h_i) = \sum_{i=1}^{k} (N_i * \bar{h}_i) \quad (kJ)$$

$$\bar{h}_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * \bar{h}_i) \quad \left(\frac{kJ}{kmol}\right)$$

$$h_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (mf_i * h_i) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

عند حرارة نوعية ثابتة، التغيير في الإنتالبي

$$\Delta h_{mix} = \sum_{i=1}^{k} c_{P,i}(T_2 - T_1) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

- إنتروبي الخليط

$$S_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (m_i * s_i) = \sum_{i=1}^{k} (N_i * \bar{s}_i) \qquad \left(\frac{kJ}{K}\right)$$

$$\bar{s}_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (y_i * \bar{s}_i) \qquad \left(\frac{kJ}{kmol\ K}\right)$$

$$s_{mix} = \sum_{i=1}^{k} (mf_i * s_i) \qquad \left(\frac{kJ}{kg\ K}\right)$$

عند حرارة نوعية ثابتة، التغيير في الإنتروبي

$$\Delta s_{mix} = \sum_{i=1}^{k} \left(c_{P,i}\ ln\ \frac{T_2}{T_1} - R_i\ ln \frac{P_{i2}}{P_{i1}}\right) \quad \left(\frac{kJ}{kgK}\right)$$

مسائل غير محلولة لفصل
ترموديناميك المزيج الغازي.

1. حدد الكسر المولي لخليط غازي يحتوي على 75% من (CH_4) و25% من (CO_2) كنسب كتلية وحدد ثابت الخليط.
2. خليط يحتوي على $(H_2, 8\ kmol)$ وعلى $(N_2, 2\ kmol)$. حدد كتلة كل من الغازات في الخليط والكتلة وثابت الخليط.
3. خليط بدرجة حرارة $(300\ K)$ وضغط$(200\ kPa)$ ويحتوي على $(CH_4, 3\ kg)$ وعلى $(CO_2, 1\ kg)$. حدد الضغوط الجزئية للعناصر والكتلة المولية الظاهرية للخليط.
4. أسطوانة – مكبس تحتوي على الأكسجين بكتلة $(14\ kg)$ وعلى هيدوجين بكتلة $(2\ kg)$ بدرجة حرارة $(150\ K)$ وضغط $(5000\ kPa)$ تنتقل الحرارة إلى النظام فيتمدد الخليط بضغط ثابت إلى $(200\ K)$. حدد كمية الحرارة المنتقلة بفرض أن الخليط نظامي.
5. ينقسم خزان بحجم $(0.9\ m^3)$ إلى قسمين متساويين. يحتوي القسم الأول على نيون بالشروط $(100\ kPa, 20°C)$ والقسم الثاني يحتوي على الأرغون بالشروط $(200\ kPa, 50°C)$. يزال الفاصل بين القسمين ويسمح للغازات بالاختلاط. كمية الحرارة المطروحة إلى الخارج نتيجة الخلط هي $(15\ kJ)$. حدد 1) درجة الحرارة النهائية و2) الضغط النهائي.
6. نظام أسطوانة – مكبس يحتوي على خليط من $(H_2, 0.5\ kg)$ وعلى $(N_2, 1.6\ kg)$ بالشروط $(100\ kPa, 300\ K)$. يتم انتقال الحرارة إلى الخليط بعملية إيزوبارية حتى يتضاعف الحجم. بفرض أن الحرارة النوعية ثابتة حدد 1) كمية الحرارة المنتقلة إلى الخليط و2) التغيير في الإنتروبي.

الفصل السابع

Chapter Seven

خليط غاز وبخار

(هواء رطب)

Gas and Vapor Mixture

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
c_v	الحرارة النوعية عند حجم ثابت	$J/kg\,K$
c_P	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت	$J/kg\,K$
c_{P_a}	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت للهواء الجاف	$J/kg\,K$
c_a	الحرارة النوعية للهواء الجاف	$J/kg\,K$
c_s	الحرارة النوعية للهواء الرطب	$J/kg\,K$
$\dot{E}_{in}$	معدل دخول الطاقة	kW
$\dot{E}_{out}$	معدل خرود الطاقة	kW
g	تسارع الجاذبية الأرضية	m/s^2
h	الإنتالبي النوعي	J/kg
h_{in}	إنتالبي الدخول النوعي	J/kg
h_{exit}	إنتالبي الخروج النوعي	J/kg
h_a	الإنتالبي النوعي للهواء الجاف	J/kg
h_v	الإنتالبي النوعي لبخار الماء	J/kg
h_o	الإنتالبي المرجعي النوعي	J/kg
h_c	معامل انتقال الحرارة بالحمل	W/m^2K
h_{fg}	إنتالبي التحول الطوري	J/kg
m	الكتلة	kg
m_v	كتلة بخار الماء	kg
$m_{v(sat)}$	كتلة بخار الماء في حال الإشباع	kg
$\dot{m}$	التدفق الكتلي	kg/sec
$\dot{m}_v$	التدفق الكتلي لبخار الماء	kg/sec

$\dot{m}_a$	التدفق الكتلي للهواء الجاف	kg/sec
$\dot{m}_w$	التدفق الكتلي للماء	kg/sec
P	الضغط الكلي – ضغط الهواء الرطب	kPa أو bar
P_a	ضغط الهواء الجاف	kPa أو bar
P_v	ضغط بخار الماء ضمن الهواء الرطب	kPa أو bar
$P_{v(sat)}$	ضغط بخار الماء ضمن الهواء الرطب في حالة الإشباع	kPa أو bar
$P_{v(T_w)}$	ضغط بخار الماء عند درجة الحرارة الرطبة	kPa أو bar
$P_{v\,(surface)}$	ضغط بخار الماء في الطبقة القريبة من سطح مائي	kPa أو bar
P_o	ضغط مرجعي	kPa أو bar
$\dot{Q}_{in}$	معدل كمية الحرارة المقدمة	W
$\dot{Q}_{out}$	معدل كمية الحرارة المطروحة	W
$\dot{Q}$	معدل تغيير كمية الحرارة	W
R	ثابت وسيط التشغيل (الغاز)	$J/kg\,K$
R_a	ثابت الهواء الجاف	$J/kg\,K$
R_v	ثابت بخار الماء	$J/kg\,K$
RH	الرطوبة النسبية	%
T	درجة الحرارة	K أو ℃
T_{wet}	درجة الحرارة الرطبة	K أو ℃
T_{dew}	درجة الحرارة نقطة الندى	K أو ℃
T_{sat}	درجة الحرارة الإشباع	K أو ℃
V	السرعة	m/s
$\dot{W}$	معدل تغيير العمل	W

$\dot{W}_{in}$	معدل تغيير العمل المقدم	W
$\dot{W}_{out}$	معدل تغيير العمل المستخرج	W
z	الارتفاع	m
α	معامل انتقال الكتلة	$\frac{kg}{(m^2 s\ kPa)}$
β	ثابت	
θ	ثابت	kPa
ϑ	ثابت	
ε	ثابت	℃
φ	الرطوبة النسبية	%
ω	الرطوبة المطلقة	$kg_v/kg_{d.a.}$
ω_{in}	الرطوبة المطلقة عند الخول	$kg_v/kg_{d.a.}$
ω_{out}	الرطوبة المطلقة عند الخروج	$kg_v/kg_{d.a.}$
ω_{sat}	الرطوبة المطلقة في حال الإشباع	$kg_v/kg_{d.a.}$
ρ	الكثافة	kg/m^3
ρ_a	كثافة الهواء الجاف	kg/m^3
ρ_v	كثافة بخار الماء	kg/m^3
$\rho_{v(sat)}$	كثافة بخار الماء عند الإشباع	kg/m^3

مقدمة الفصل.

يتألف الهواء الرطب من مجموعة من الغازات بما فيها بخار الماء وبالتالي فهو خليط ولكن ليس بخليط متجانس ذي طور واحد. لكي نتمكن من دراسة الهواء الرطب يجب علينا فصل الهواء الرطب إلى قسمين. القسم الأول يحتوي على بخار الماء الموجود داخل الهواء الرطب والقسم الثاني يحتوي على خليط غازي متجانس من الغازات الأحادية الذرة *Monoatomic* غير القابلة للتكاثف *Non-Condensing Gases* ويسمى هذا القسم بالهواء الجاف *Dry Air*.

في هذا البحث سنتعرف على بارامترات الهواء الرطب من ضغط وكثافة ودرجة حرارة رطبة ورطوبة نسبية ورطوبة مطلقة (مضمون الرطوبة) ودرجة حرارة الندى وإنتالبي الهواء الرطب وندرسها جميعاً. وسنحدد هذه البارامترات على مخططات الهواء الرطب مثل مخطط رامزين *Ramzin Chart* ومخطط موليير *Mollier* والمخطط البسايكومتريك *Psychometric Chart*. وسندرس العمليات التي يقوم بها الهواء الرطب من تجفيف وترطيب وتكييف وتسخين للهواء الرطب وتمثيلها على تلك المخططات.

الفوائد العلمية من الفصل

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ تعريف الهواء الرطب على شكل خليط.
- ✓ تحديد الفرق بين الهواء الجاف والهواء الرطب.
- ✓ تعريف الرطوبة النسبية وإيجادها.
- ✓ تعريف الرطوبة المطلقة للهواء الرطب (محتوى الرطوبة) وكيفية استخدامها.
- ✓ تحديد درجة حرارة نقطة الندى للهواء الرطب.
- ✓ تحديد المحتوى الطاقي للهواء الرطب لحالة ما.
- ✓ شرح المخططات التي تستخدم في الهواء الرطب وكيفية تحديد البارامترات (حالة الهواء الرطب) عليها.

- ✓ فهم عمليات الهواء الرطب في مجموعة من الأجهزة الهندسية وتطبيقاتها.
- ✓ تمثيل العمليات التي يقوم بها الهواء الرطب ضمن هذه الأجهزة على المخططات.

محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.7	تعريف الهواء الرطب.	395
2.7	بارامترات الهواء الرطب.	396
1.2.7	ضغط الهواء الرطب.	396
2.2.7	درجة حرارة الندى.	397
3.2.7	الرطوبة النسبية.	397
4.2.7	الرطوبة المطلقة.	400
5.2.7	إنتالبي الهواء الرطب.	405
6.2.7	درجة الرحرارة الرطبة	407
7.2.7	درجة حرارة الإشباع الأدياباتية.	413
8.2.7	كثافة الهواء الرطب.	414
3.7	مخططات الهواء الرطب.	416
1.3.7	مخطط رامزين.	419
2.3.7	مخطط موليير.	422
3.3.7	المخطط البسايكومتريك.	423
1.7	تطبيقات الهواء الرطب.	424
1.4.7	التأثير المشترك بين الهواء والماء في الطبقة الحدية.	424
2.4.7	العمليات في أجهزة التجفيف.	426
3.4.7	العمليات في أجهزة التكييف.	430
1.3.4.7	عمليات التبريد أو التسخين المحسوس.	430
2.3.4.7	عمليات التسخين مع الترطيب.	431
3.3.4.7	عمليات التبريد مع التكثيف.	435

4.3.4.7 عمليات التبريد التبخيرية. 438
5.3.4.7 عمليات الخلط الأدياباتي. 438
6.3.4.7 عمليات التبريد في الأبراج المائية. 443
ملخص الفصل. 447
مسائل غير محلولة. 449
نهاية الفصل. 450

1.7 تعريف الهواء الرطب.

يتألف الهواء الرطب من مجموعة من الغازات المختلفة ويشكل الأوكسجين 23% والنتروجين 78% والباقي غازات أخرى كما هو واضح بالجدول (1−7).

الجدول (1−7) مركبات الهواء الرطب.

الغاز	نسبة الغاز في الهواء (%) حجماً	نسبة الغاز في الهواء (%) وزناً	الكتلة المولية $(kg/kmol)$	الصيغة	الغليان (°C)
الأوكسجين	20.95	20.2	32	O_2	−182.95
النتروجين	78.09	75.47	28.02	N_2	−195.79
ثاني أوكسيد الكربون	0.03	$46 * 10^{-3}$	44.01	Co_2	−78.5
العدروجين	$5 * 10^{-4}$	0	2.02	H_2	−252.87
أرغون	0.933	1.28	39.94	Ar	−186
نيون	$18 * 10^{-4}$	$12 * 10^{-3}$	20.18	Ne	−246
هيليوم	$5 * 10^{-4}$	$7 * 10^{-5}$	4	He	−269
كريبتون	$1 * 10^{-4}$	$3 * 10^{-4}$	83.8	Kr	−153.4
إكسنون	$9 * 10^{-6}$	$4 * 10^{-5}$	131.29	Xe	−108.1

لكي نتمكن من دراسة الهواء الرطب يجب فصل الهواء الرطب إلى قسمين. القسم الأول يحتوي على بخار الماء الموجود داخل الهواء الرطب والقسم الثاني يحتوي على خليط من الغازات الأحادية الذرة *Monoatomic* غير القابلة للتكاثف *Non-Condensing Gases*

ويسمى هذا القسم بالهواء الجاف *Dry Air* فقط وتُعامل مركبات الهواء الرطب على أنهما غازات مثالية وينطبق عليها قانون الغازات المثالية *Ideal Gas Law*.

2.7 بارمترات الهواء الرطب.

هناك مجموعة من البارامترات التي تصف حالة الهواء الرطب وهي

1.2.7 ضغط الهواء الرطب (*P*) *Humid (Moist) Air Pressure (P).*

يكون ضغط الهواء الرطب الموجود ضمن خزان صلب مغلق وبحسب قانون دالتون للضغوط الجزئية مساوياً إلى مجموع الضغوط الجزئية لكل مكون من مكونات الهواء الرطب عند درجة حرارة الخليط وحجم الخليط أي

$$P = P_{d.a.} + P_v \qquad (kPa) \qquad (1\text{-}7)$$

حيث أن

$P_{d.a.}$ الضغط الجزئي للهواء الجاف.

P_v الضغط الجزئي لبخار الماء.

عندما يكون بخار الماء الموجود ضمن الهواء الرطب مشبعاً فيرمز له بالرمز $P_{v(sat)}$ وتؤخذ قيمته من جداول الإشباع لبخار الماء بدلالة درجة حرارة الهواء.

هناك بعض المراجع التي تعطي قيم الضغط الجزئي لبخار الماء المشبع $P_{v(sat)}$ بدلالة درجة حرارة الهواء باستخدام معادلات رياضية تجريبية فمثلا تستخدم المعادلة الرياضية التجريبية التالية لحساب ضغط بخار الماء المشبع $(P_{v(sat)})$ الموجود فوق سطح مائي بالشكل

$$P_{v(sat)(water)} = 610.78 * e^{\{17.2694*[T/(T+238.3)]\}} \ (Pa) \qquad (2\text{-}7)$$

وتستخدم المعادلة الرياضية التجريبية التالية لحساب ضغط بخار الماء المشبع $(P_{v(sat)})$ الموجود فوق سطح من الجليد *(ice)* بالشكل

$$P_{v(sat)(ice)} = e^{\{28.916+[(-6140.4)/(T+273)]\}} \quad (Pa) \qquad (3\text{-}7)$$

حيث $(T, ℃)$ هي درجة حرارة الهواء الرطب.

2.2.7 كثافة الهواء الرطب (ρ) *Humid (Moist) Air Density*.

يمكن حساب كثافة الهواء الجاف وكثافة بخار الماء من معادلة الغاز المثالي (معادلة الحالة)

$$P_{d.a.} = \rho_{d.a.} * R_{d.a.} * T$$

$$\rho_{d.a.} = 0.0035 * P_{d.a.}/T \qquad \left(\frac{kg}{m^3}\right)$$

وتحسب كثافة بخار الماء وباستخدام معادلة الغاز المثالي حيث

$$P_v = \rho_v * R_v * T$$

$$\rho_v = 0.0022 * P_v/T \qquad \left(\frac{kg}{m^3}\right)$$

باستخدام معادلة انحفاظ الكتلة على نظام مغلق يحتوي على هواء رطب بحجم ثابت نجد أن

$$m = m_{d.a} + m_v$$

وبالتقسيم على الحجم نجد أن كثافة الهواء الرطب تعطى بالعلاقة

$$\rho = \rho_{d.a.} + \rho_v \quad (kg/m^3) \qquad (4\text{-}7)$$

3.2.7 درجة حرارة الندى (T_{dew}) *Dew Point Temperature*.

هي درجة حرارة الهواء لحظة ظهور قطرات الماء فيه (حد الإشباع) عند تبريده إيزوبارياً. تعطى درجة حرارة الندى بالعلاقة

$$T_{dew} = T_{sat\ (at\ P_v)}$$

$$P_v = P_{sat\ (at\ T_{dew})} \qquad (5\text{-}7)$$

أي تصبح درجة حرارة الهواء الرطب مساوية إلى درجة حرارة الإشباع للبخار عند ضغطه الجزئي. يمكن حساب درجة حرارة الندى للهواء الرطب من معادلة ماغنوس *Magnus* التالية

$$T_{dew} = \frac{\varepsilon \, ln\left(\frac{P_v}{\theta}\right)}{\beta - ln\left(\frac{P_v}{\theta}\right)} \quad (℃) \qquad (6\text{-}7)$$

وبالتالي يكون الضغط الجزئي لبخار الماء

$$P_v = \theta \, e^{\frac{\beta \, T_{dew}}{(\epsilon + T_{dew})}} \qquad kPa \qquad (7\text{-}7)$$

حيث(T_{dew}) بالدرجة و (P_v) الضغط الجزئي للبخار بالكيلوباسكال أما الثوابت فلها القيم التالية

$$\theta = 0.6112 \; kPa$$

$$\beta = 17.62$$

$$\varepsilon = 243.12℃$$

هذه العلاقة صالحة بين درجات حرارة $(-40℃)$ إلى $(65℃)$. يمكن استخدام درجة حرارة الندى في حساب الضغط الجزئي لبخار الماء غير المشبع والمشبع عند الضغط الجوي النظامي ودرجة حرارة الهواء الرطب من العلاقات التالية

$$P_v = 6.11 * 10^{\{(T_{dew}/(T_{dew}+237.7))*7.5\}} \; (mbar) \qquad (8\text{-}7)$$

$$P_{v(sat)} = 6.11 * 10^{\left\{\left(T/(T+237.7)\right)*7.5\right\}} \; (mbar) \qquad (9\text{-}7)$$

درجة حرارة الهواء الرطب بالدرجة سليزيوس. يتم قياس درجة حرارة الندى بواسطة الهيغرومتر *Hygrometer* أو مايسمى هيغرومتر المرآة المبردة *Chilled Mirror*

Hygrometer (CMH) حيث يتم تبريد مرآة إلى درجة حرارة يبدأ فيها بخار الماء الموجود في الهواء المحيط بها بالتكاثف. درجة حرارة المرآة هي درجة حرارة الندى. الهيغرومتر هو جهاز المخبري.

المثال التطبيقي 7–1 – درجة حرارة الندى.

درجة حرارة الهيغرومتر هي ($T_{dew} = 45℃$)، احسب الضغط الجزئي لبخار الماء الموجود في الهواء الرطب المحيط.

الفرضيات 1) الهواء الرطب غاز مثالي.

التحليل: درجة الحرارة الندى تحسب من العلاقة

$$T_{dew} = T_{sat\ (at\ P_v)}$$

$$P_v = P_{sat\ (at\ T_{dew})}$$

من جداول الإشباع بدلالة درجة الحرارة نجد أن ضغط الإشباع الموافق لضغط البخار هو

$$\rightarrow P_v = P_{sat\ (at\ 45)} = 0.09593\ bar$$

من معادلة مانغوس نجد أن:

$$P_v = \theta\ e^{\frac{\beta\ T_{dew}}{(\epsilon + T_{dew})}}\ \ kPa$$

وبالتعويض نجد أن

$$P_v = 0.6112\ e^{\frac{17.62*45}{(243.12+45)}}$$

$$P_v = 9.57970\ kPa = 0.095797\ bar$$

أو يمكن حسابه من العلاقة

$$P_v = 6.11 * 10^{7.5*\{T_{dew}/(T_{dew}+237.7)\}} \ (mbar)$$

$$P_v = 6.11 * 10^{7.5*\{45/(45+237.7)\}} \ (mbar)$$

$$P_v = 95.474 \ mbar = 0.09547 \ bar$$

4.2.7 الرطوبة النسبية (φ or RH) Relative Humidity.

تعرف الرطوبة النسبية بأنها النسبة بين كمية بخار الماء الموجود في الهواء الرطب إلى أكبر كمية ممكنة لبخار الماء يمكن للهواء الرطب حمله (حالة الإشباع) لنفس ضغط ودرجة حرارة الهواء الرطب.

$$\varphi \ (or \ RH) = \frac{mass \ of \ vapor \ in \ air}{mass \ of \ vapor \ in \ saturated \ air}$$

وتعطى علاقة الرطوبة النسبية رياضياً

$$\varphi = \frac{m_v}{m_{v(sat)}} = \frac{\rho_v}{\rho_{v(sat)}}$$

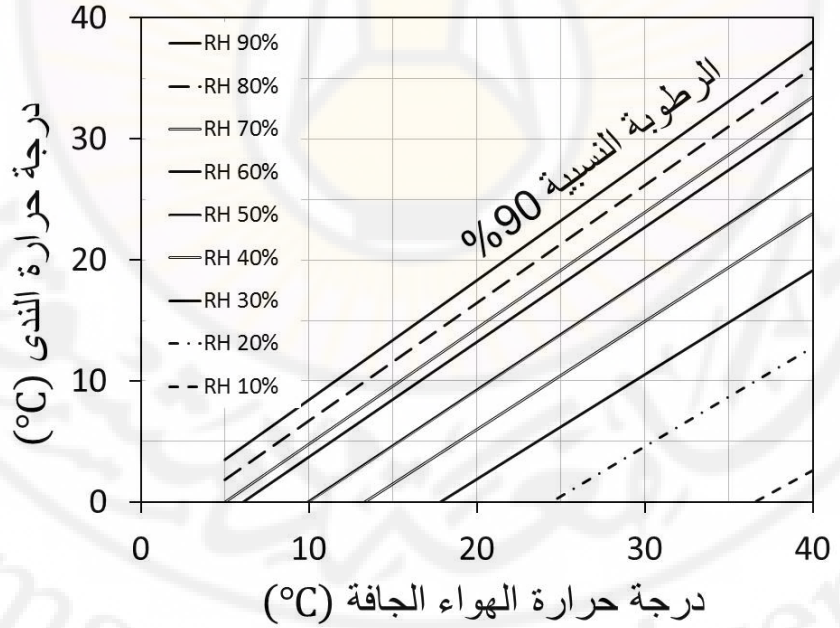
الصيغة الأكثر انتشاراً هي بدلالة الضغط الجزئي لبخار الماء إلى الضغط الجزئي لبخار الماء المشبع

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{v(sat)}} \qquad (10\text{-}7)$$

يمكن قراءة الرطوبة النسبية من الجداول أو من المخططات كما هو واضح في الجدول (7−2) والشكل (7−1). يبين الشكل (7−1) إمكانية إيجاد الرطوبة النسبية بدلالة درجة حرارة الهواء الجافة ودرجة حرارة الندى *Dew Temperature* من معادلة ماغنوس (7−6) السابق ذكرها حيث تم رسم المخطط من القيم الموجودة في الجدول (7−2).

الجدول (2–7) الرطوبة النسبية بدلالة درجة حرارة الندى.

درجة حرارة الهواء الجافة	درجة حرارة الندى								
	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10
5	3.50	1.83							
10	**8.43**	**6.71**	**4.78**	**2.58**	**0.04**				
15	13.4	11.6	9.57	7.29	4.65	1.49			
20	**18.3**	**16.4**	**14.4**	**12.0**	**9.26**	**5.98**	**1.88**		
25	23.2	21.3	19.2	16.7	13.9	10.5	6.21	0.46	
30	**28.2**	**26.2**	**23.9**	**21.4**	**18.4**	**15.0**	**10.5**	**4.58**	
35	33.1	31.0	28.7	26.1	23.0	19.4	14.8	8.69	
40	**38.0**	**35.9**	**33.5**	**30.8**	**27.6**	**23.8**	**19.1**	**12.8**	**2.61**



الشكل (1–7) الرطوبة النسبية بدلالة درجة حرارة الندى.

الجدول (3–7) الرطوبة النسبية بدلالة درجة حرارة الهواء الجافة.

الرطوبة النسبية %

درجة الحرارة الجافة – الرطبة (°C)

درجة الحرارة الجافة (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
2	84	68	52	37	22	8									
4	**85**	**71**	**57**	**43**	**29**	**16**	**3**								
6	86	73	60	48	35	24	11								
8	**87**	**75**	**63**	**51**	**40**	**29**	**19**	**8**							
10	88	77	66	55	44	34	24	15	6						
12	**89**	**78**	**68**	**58**	**48**	**39**	**29**	**21**	**12**						
14	90	79	70	60	51	42	34	26	18	10					
16	**90**	**81**	**71**	**63**	**54**	**46**	**38**	**30**	**23**	**15**					
18	91	82	73	65	57	49	41	34	27	20	7				
20	**91**	**83**	**74**	**66**	**59**	**51**	**44**	**37**	**31**	**24**	**12**				
22	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	17	6			
24	**92**	**84**	**77**	**69**	**62**	**56**	**49**	**43**	**37**	**31**	**20**	**10**			
26	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34	24	14	5		
28	**93**	**85**	**78**	**72**	**65**	**59**	**53**	**48**	**42**	**37**	**27**	**18**	**9**		
30	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39	30	21	13	5	
32	**93**	**86**	**80**	**74**	**68**	**62**	**57**	**51**	**46**	**41**	**32**	**24**	**16**	**9**	
34	93	87	81	75	69	63	58	53	48	43	35	26	19	12	5
36	**94**	**87**	**81**	**75**	**70**	**64**	**59**	**54**	**50**	**45**	**37**	**29**	**21**	**15**	**8**
38	94	88	82	76	71	66	61	56	51	47	39	31	24	17	11
40	**94**	**88**	**82**	**77**	**72**	**67**	**62**	**57**	**53**	**48**	**40**	**33**	**26**	**20**	**14**
42	94	88	83	77	72	67	63	58	54	50	42	34	28	21	16
44	**94**	**89**	**83**	**78**	**73**	**68**	**64**	**59**	**55**	**51**	**43**	**36**	**29**	**23**	**18**

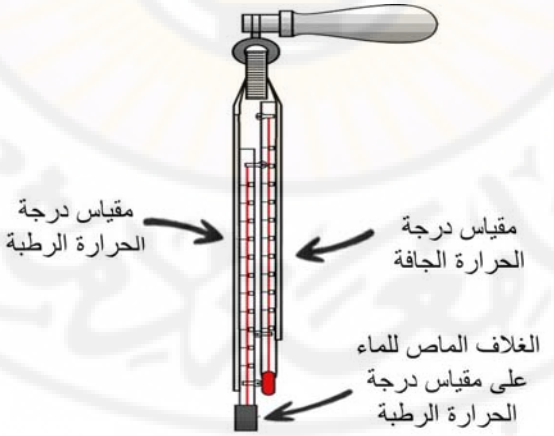
يبين الجدول (3–7) إمكانية إيجاد الرطوبة النسبية *Relative Humidity* بدلالة الحرارة الجافة *Dry Air Temperature,*(°C) للهواء في مجال [2 – 44°C] والفرق بين درجة الحرارة الجافة والحرارة الرطبة *Wet Temperature* في مجال [1 – 20°C].

يمكن رسم العلاقة بين درجة الحرارة الجافة والرطوبة النسبية اعتماداً على القيم الموجودة في هذا الجدول. تتم أيضاً قراءة الرطوبة النسبية باستعمال هيغرومتر توتر الشعرة *Hair Tension Hygrometer* حيث يستعمل تمدد شعرة الإنسان عند امتصاصها لبخار الماء

الموجود في الهواء في قياس نسبة الرطوبة. يمكن قراءة الرطوبة النسبية للهواء الرطب إما تقليدياً أو ميكانيكياً. نقوم في الحالة التقليدية باستخدام ميزان لقياس درجة الحرارة الجافة وميزان آخر لقياس درجة الحرارة الرطبة. قياس درجة الحرارة الرطبة يكون بلف قطعة شاش على نهاية ميزان زئبقي ووضع الطرف الآخر من قطعة الشاش ضمن حوض مائي كما في الشكل (2-7).



الشكل (2-7) مقياس الرطوبة النسبية تقليدياً.



الشكل (7-3) مقياس البسايكرومتر.

نقوم في الحالة الميكانيكية باستخدام جهاز يسمى البسايكرومتر *Psychrometer* والمبين في الشكل (3−7). يقوم مقياس البسايكرومتر بقياس درجة الحرارة الجافة *Dry Bulb* ودرجة الحرارة الرطبة *Wet Bulb* بتدوير هذا المقياس بسرعة دورانية ثابتة (600 دورة بالدقيقة) ولفترة زمنية معينة (على الأقل دقيقة) لكي يتمكن الماء المُشبّع للطبقة المغلفة *Wick* لنهاية مقياس درجة الحرارة الرطبة من التبخر. تقرأ الرطوبة النسبية في الحالة التقليدية أو الميكانيكية من الجدول المرافق للأجهزة من خلال قيم درجة الحرارة الجافة والرطبة.

المثال التطبيقي 7−2 – الرطوبة النسبية.

درجة حرارة البسايكومتر هي $(T_{wet} = 48℃, T_{dry} = 50℃)$، احسب ضغط بخار الماء.

الفرضيات: الهواء غاز مثالي

التحليل: من جدول البسايكومتر أو من مخططات العلاقة بين درجات الحرارة الرطبة والجافة نحصل على الرطوبة النسبية للهواء بقيمة $(\varphi = 82\ \%)$.

إن الضغط الجزئي لبخار الماء يمكن الحصول عليه من الرطوبة النسبية

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{v\,(sat)}}$$

نحصل على ضغط الإشباع من جداول الإشباع بدلالة درجة الحرارة الجافة

$$P_{v(sat)} = P_{sat(at\ 50℃)} = 12.35\ kPa$$

بالتعويض نجد

$$P_v = \varphi * P_{v(sat)} = 10.127\ kPa$$

مناقشة:

الضغط الجزئي لبخار الماء ضمن الهواء الرطب هو تقريباً 1% من ضغط الهواء الرطب.

5.2.7 الرطوبة المطلقة (ω) *Absolute Humidity*.

تعرف الرطوبة المطلقة بالنسبة بين كمية البخار إلى كيلوغرام واحد من الهواء الجاف

$$\omega = \frac{mass\ of\ water\ vapor}{mass\ of\ dry\ air}$$

أي أن

$$\omega = \frac{m_v}{m_{d.a.}} = \frac{\rho_v}{\rho_{d.a.}} \qquad \left(\frac{kg_v}{kg_{(d.a.)}}\right) \tag{11-7}$$

تستخدم العلاقة السابقة بشكل واسع في أجهزة التكييف لأنها تعبر عن وحدات الرطوبة المطلقة على المخططات البسايكومترية *Psychometric Charts* المعروفة. في بعض الأحيان نستخدم الوحدات $(g_v/kg_{(d.a.)})$ لأن كتلة بخار الماء الموجود في الهواء الرطب أقل بكثير من كتلة الهواء الجاف. في بعض المراجع تسمى الرطوبة المطلقة بمضمون الرطوبة *Water Content* أو الرطوبة النوعية *Specific Humidity*. نفرض أن كلاً من بخار الماء والهواء الجاف غازات مثالية وبالتعويض في العلاقة (11−7) نجد أن

$$\omega = \frac{P_v\, V/R_v T}{P_{d.a.}\, V/R_a T}$$

$$\omega = \frac{P_v * R_{d.a.}}{P_{d.a.} * R_v}$$

ولكن

$$P_{d.a.} = P - P_v$$

$$\frac{R_{d.a.}}{R_v} = \frac{0.287}{0.461} = 0.622$$

أي أن

$$\omega = 0.622\ \frac{P_v}{P - P_v} \qquad (12\text{-}7)$$

يمكن الربط بين الرطوبة النسبية والرطوبة المطلقة بتعويض ضغط البخار الجزئي من علاقة الرطوبة النسبية في علاقة الرطوبة المطلقة فنجد أن

$$\varphi = \frac{\omega * P}{(0.622 + \omega) * P_v} \qquad (13\text{-}7)$$

أو

$$\omega = \frac{0.622 * \varphi * P_v}{P - (\varphi * P_v)} \qquad (14\text{-}7)$$

المثال التطبيقي 7−3 – الرطوبة المطلقة.

درجة حرارة البسايكومتر هي $(T_{wet} = 48℃, T_{d.a.} = 50℃)$، احسب الرطوبة المطلقة للهواء الرطب.

الفرضيات: الهواء غاز مثالي

التحليل: من جدول البسايكومتر أو من مخططات العلاقة بين درجة الحرارة الرطبة والجافة نحصل على الرطوبة النسبية للهواء $\varphi = 82\ \%$.

تحسب الرطوبة المطلقة من العلاقة

$$\omega = 0.622\ \frac{P_v}{P - P_v}$$

إن الضغط الجزئي لبخار الماء يمكن الحصول عليه من الرطوبة النسبية

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{v\,(sat)}}$$

نحصل على ضغط الإشباع من جداول الإشباع بدلالو درجة الحرارة الجافة للهواء

$$P_{v(sat)} = P_{sat(at\ 50℃)} = 12.35\ kPa$$

بالتعويض نجد

$$P_v = \varphi * P_{v(sat)}$$

$$P_v = 10.127\ kPa$$

بالتعويض في علاقة الرطوبة المطلقة نجد أن كمية الماء الموجودة في كتلة واحد كيلوغرام هواء رطب هي

$$\omega = 0.622 * \frac{10.127}{100 - 10.127}$$

$$\omega = 70\ g_v/kg_{d.a.}$$

6.2.7 إنتالبي الهواء الرطب (h) *Enthalpy of Humid Air*.

إنتالبي الهواء الرطب هو مجموع إنتالبي بخار الماء والهواء الجاف وينسب إلى $(1 + \omega)\ kg$ من الهواء الجاف في هو مبين في الشكل (4−7).

$$h = h_{dry\ air} + \omega * h_{vapor} \qquad (15\text{-}7)$$

☒ **إنتالبي الهواء الجاف.**

في مجال التكييف يسمى إنتالبي الهواء الجاف بالحرارة المحسوسة *Sensible Heat* ويمكن تعريف هذا الإنتالبي بكمية الحرارة اللازمة لتسخين باقي مكونات الهواء

الرطب (الهواء الجاف). بما أن الهواء الجاف هو غاز مثالي وبفرض أن الحرارة النوعية تعطى للهواء الجاف بالعلاقة

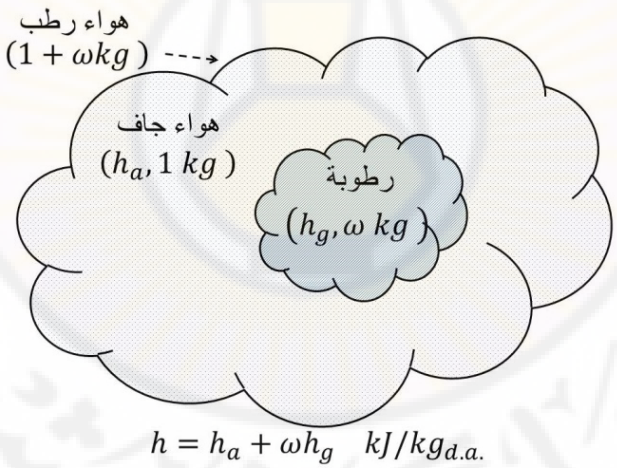
$$c_{d.a.,P} = 1.0029 + 5.4 * 10^{-5} * T \ \ (kJ/kg°\text{C})$$

فإن إنتالبي الهواء الجاف هو

$$h_{dry\ air} = \ c_{d.a.,P} * T \quad \left({}^{kJ}/_{kg_{d.a.}}\right)$$

في كافة تطبيقات الهواء الرطب حيث أن درجة حرارة الهواء تكون صغيرة فيمكن إهمال الحد الثاني من علاقة الحرارة النوعية ويتحول إنتالبي الهواء الجاف إلى العلاقة

$$h_{dry\ air} = \ T \ \ (kJ/kg) \qquad (16\text{-}7)$$



الشكل (4–7) خليط الهواء الجاف وبخار الماء.

☒ **<u>إنتالبي بخار الماء</u>.**

في مجال التكييف يسمى إنتالبي بخار الماء بالحرارة الكامنة *Latent Heat* ويعطى بالعلاقة

$$h_{vapor} = h_o\ (0℃) + \int_0^T \left(\frac{\partial h_{vapor}}{\partial T}\right)_P dT + \int_{P_0}^P \left(\frac{\partial h_{vapor}}{\partial P}\right)_T dP$$

$$h_{vapor} = h_o\ (0℃) + \int_0^T c_{vapor\ (P=const)} dT + \int_{P_0}^P \left(\frac{\partial h_{vapor}}{\partial P}\right)_T dP$$

- الحد الأول

هذا الحد هو حرارة تشكل بخار الماء عند $T = 0\ (℃)$ أو مايسمى مبدأ حساب إنتالبي الماء *Reference*. يمكن أن نعرفه أيضا بكمية الحرارة اللازمة لتشكيل البخار عند درجة حرارة $T = 0\ (℃)$ أي أن هذه القيمة هي قيمة الحرارة الكامنة للماء، $(h_o\ (0℃) = h_{fg})$ ، عند $T = 0\ (℃)$ وتساوي $2501\ (kJ/kg_v)$ أو $1075\ (Btu/lb)$.الحد الأول يعطى بالعلاقة

$$h_o\ (0℃) = 2501\ \ (kJ/kg_v) \qquad (16\text{-}7)$$

- الحد الثاني

هذا الحد هو تغير الإنتالبي مع تغيير درجة الحرارة إيزوبارياً عند ضغط (P).

$$\int_0^T \left(\frac{\partial h_{vapor}}{\partial T}\right)_P dT = \int_0^T c_{vapor\ (P=const)} dT$$

يمكن في مجال الضيق لدرجات الحرارة اعتبار السعة الحرارية لاعلاقة لها بالضغط وتساوي

$$c_{vapor\ (P=const)} = [1.84 + 2 * 10^{-5} * T\ ](kJ/kg_v\ ℃)$$

في كافة تطبيقات الهواء الرطب حيث أن درجة حرارة الهواء تكون صغيرة فيمكن إهمال الحد الثاني من علاقة الحرارة النوعية ويتحول إنتالبي بخار الماء إلى العلاقة

$$c_{vapor\ (P=const)} = 1.84\ (kJ/kg_v\ ℃)$$

وبالتالي فإن هذا الحد يمكن أن نكتبه بالعلاقة

$$\int_0^T c_{vapor\ (P=const)} dT = 18.4 * T \qquad (kJ/kg_v) \qquad (17\text{-}7)$$

- الحد الثالث

هذا الحد يعبر عن تغيير الإنتالبي مع تغير الضغط إيزوترمياً عند الحرارة T. يمكن أن نهمل الحد الأخير لاعتبارنا بأن البخار غاز مثالي. بتعويض الحدود الثلاثة في معادلة إنتالبي بخار الماء نجد أن

$$h_{vapor} = h_o\ (0℃) + c_{vapor(P)} * T \qquad \left({}^{kJ}/_{kg_{d.a.}}\right) \qquad (18\text{-}7)$$

بوضع قيمة انتالبي الهواء الجاف وانتالبي بخار الماء في علاقة انتالبي الهواء الرطب (7−15) نجد

$$h = c_{d.a.} * T + \omega * \{h_o\ (0℃) + c_{vapor(P_0)} * T\}$$

بتعويض القيم نجد

$$h = T + \omega * (2501 + 1.84 * T)\ \left({}^{kJ}/_{kg_{d.a.}}\right) \qquad (19\text{-}7)$$

هذه العلاقة صالحة عندما تكون درجات الحرارة بين $[T = 0 - 100℃]$ وعندما تكون الرطوبة المطلقة للهواء الرطب $[\omega = 0 - 180\ g_v/kg_{d.a.}]$.

المثال التطبيقي 7−4 – إنتالبي الهواء الرطب.

مواصفات الهواء الرطب هي $(T = 60℃, \varphi = 50\%, P = 1\ atm)$ أوجد الضغط الجزئي لبخار الماء وكثافته والرطوبة المطلقة و إنتالبي الهواء.

الفرضيات: الهواء غاز مثالي

التحليل: بما أن درجة حرارة الهواء الرطب $T = 60℃$ فإن البخار هو غير مشبع وبالتالي فإن

$$P_{v(sat)} = P_{sat(at\ 60℃)} = 19.94\ kPa = 148.6\ mmHg$$

$$P_v = \varphi * P_{v(sat)} = 74.3\ mmHg = 10\ kPa$$

$$\rho_{v(sat)} = \rho_{(x=1)at\ 60℃} = \frac{1}{v_g} = \frac{1}{7.671} = 0.1304\ kg/m^3$$

$$\varphi * \rho_{v(sat)} = \rho_v = 0.0652\ kg/m^3$$

كمية الماء في الهواء الرطب هي

$$\omega = 0.622\ \frac{P_v}{P - P_v}$$

$$\omega = 0.622\ \frac{74.3}{745 - 74.3}$$

$$\omega = 0.0689\ {}^{kg_v}/_{kg_{d.a.}}$$

أي يوجد 68.9 غرام من الماء في واحد كيلوغرام من الهواء الرطب. كمية الحرارة اللازمة لتبخر هذه الكمية (68.9 غرام) هي

$$h_{v1} = \omega * h_{fg} = 0.0689\ \left({}^{kg_v}/_{kg}\right) * 2501\ \ \left({}^{kJ}/_{kg_v}\right)$$

$$h_{v1} = 172.32\ \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

كمية الحرارة اللازمة لتسخين كمية الماء المبخر إلى درجة حرارة الهواء الرطب هي

$$h_{v2} = \omega * (1.84 * T)$$

$$h_{v2} = 0.0689\ {}^{kg_v}/_{kg} * \left\{1.84\ {}^{kJ}/_{kg_v℃} * 60\ (℃)\right\}$$

$$h_{v2} = 7.6065\ \ \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

كمية حرارة الهواء الجاف هي

$$h_{d.a.} = c_{d.a.,P} * T = 1 \left({}^{kJ}/_{kg℃}\right) * 60\ (℃) = 60 \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

المحتوى الحراري للهواء الرطب عند الشروط السابقة هي

$$h = h_{v1} + h_{v2} + h_{d.a.} = 239.92 \quad \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

نلاحظ أن الطاقة الكامنة هي أكبر الطاقات ثم يأتي طاقة الهواء الجاف ثم طاقة رفع درجة حرارة البخار.

<u>المثال التطبيقي 7–5 – بارامترات الهواء الرطب.</u>

درجة حرارة الهواء هي $T = 60℃$ ودرجة حرارة الهيغرومتر هي $T_{dew} = 45℃$، احسب بارامترات الهواء الرطب.

الفرضيات: الهواء غاز مثالي

التحليل: عند درجة الحرارة الندى تكون

$$T_{dew} = T_{sat\ (at\ P_v)}$$

$$P_v = P_{sat\ (at\ t_{dew})}$$

وبالتالي فإن

$$P_v = P_{sat\ (at\ 45)} = 0.09593\ bar$$

أما ضغط الإشباع للهواء هو عند درجة الحرارة الجافة ويساوي

$$P_{v(sat)} = 0.1994\ bar$$

أما الرطوبة النسبية فتحسب من العلاقة

$$\varphi = P_v / P_{v\ (sat)} = 48\%$$

الرطوبة المطلقة هي

$$\omega = 0.622\ \frac{P_v}{P - P_v}$$

$$\omega = 0.622 * \frac{0.09593}{1 - 0.09593}$$

$$\omega = 66\ \ g/kg_{d.a.}$$

الإنتالبي هو

$$h = \ T + \omega * (2501 + 1.84 * T)$$

$$h = 1\frac{kJ}{kg℃}\ 60(℃) + 0.066\ \frac{kg_v}{kg_{d.a.}} * \left(2501\frac{kJ}{kg} + 1.84\frac{kJ}{kg℃} * 60(℃)\right)$$

$$h = 232.35\ \ \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

أو يمكن حسابها بالطريقة السابقة الموجودة في المثال السابق.

7.2.7 درجة الحرارة الرطبة (T_{wet}) *Wet Bulb Temperature*.

يمكن أن نعطي معادلة التوازن الحراري للهواء الرطب الموجود فوق سطح مائي إذا أهملنا التغيير في درجة الحرارة الجافة للهواء الرطب بالشكل

$$\left[\text{قانون نيوتن في التبريد}\right] = \left[\text{الكتلة المبخرة}\right]$$

قانون نيوتن في التبريد		الكتلة المبخرة
كمية الحرارة الممتصة من الهواء الرطب بفعل الحمل *Convection*	=	كمية الماء المبخر *Mass Transfer* من سطح الماء الذي يوجود فوقه الهواء الرطب

وتعطى المعادلة

$$\alpha\, h_{fg}\left(P_{v(T_w)} - P_v\right) \;=\; h_c(T - T_{wet}) \qquad (20\text{-}7)$$

حيث أن

α معامل انتقال الكتلة $(kg/(m^2 s\, kPa))$

h_{fg} الحرارة الكامنة للماء (J/kg)

h_c معامل انتقال الحرارة بالحمل $(W/m^2\, K)$

T هي حرارة الهواء الرطب (K)

T_{wet} هي درجة حرارة الرطبة للهواء

P_v الضغط الجزئي لبخار الماء (kPa) في الهواء

$P_{v(T_w)}$ الضغط الجزئي لبخار الماء (kPa) عند الحرارة الرطبة

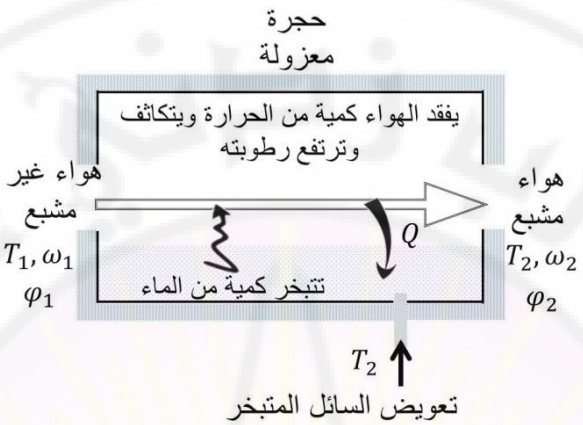
وبما أن الضغوط الجزئية للبخار أقل بكثير من ضغط الهواء الرطب (ضغط جوي نظامي) فإن المعادلة تتحول إلى

$$\left(\omega_{(sat)} - \omega\right) = \frac{h_c}{\alpha'\, h_{fg}}(T - T_w) \qquad \left({}^{kg_v}/_{kg_{d.a.}}\right) \qquad (21\text{-}7)$$

$$\alpha' = \frac{\mu_{d.a.}}{\mu_v} * \alpha = 1.6 * \alpha \qquad \left(\frac{kg}{m^2 * s}\right)$$

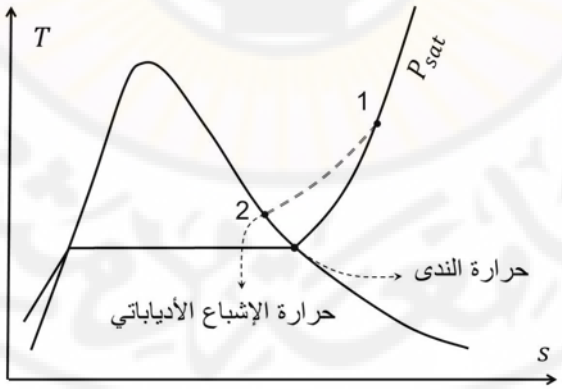
8.2.7 درجة الإشباع الأدياباتية *Adiabatic Saturation Temperature*.

تعطي درجة الإشباع الأدياباتية خطوط الإنتالبي *Constant Enthalpy Lines* على مخططات الهواء الرطب. عندما يمرر هواء بدرجة حرارة (T_1)على سطح مائي بدرجة حرارة (T_2) ضمن حجرة معزولة كما في الشكل (5−7) فإن درجة حرارته تنخفض وترتفع رطوبته النسبية نتيجة تبادل الطاقة بينهما ويصل الهواء إلى حالة الإشباع عند خروجه من الحجرة وبدرجة حرارة الماء (T_2). تسمى درجة حرارة الهواء المساوية إلى درجة حرارة الماء الملامس له بدرجة الحرارة الأدياباتية.



الشكل (5–7) غرفة الحصول على درجة الإشباع الأديباتية.

يبين الشكل (6–7) عملية الحصول على درجة الحرارة الأديباتية. يمكن فهم هذه الظاهرة إذا افترضنا بأن تياراً من الهواء برطوبة أقل من حد الإشباع يبرد وتستخدم كمية الحرارة التي تنتج من التبريد في تبخير كمية من الماء الذي يجري فوقه الهواء وهذا يؤدي إلى رفع الرطوبة إلى حد الإشباع.



الشكل (6–7) مخطط الحصول على درجة الإشباع الأديباتية على $(T - s)$.

تتحول المعادلة (7−22) إلى الشكل التالي

$$\left(\omega_{(sat)} - \omega\right) = \frac{c_s}{h_{fg}}(T - T_{sat}) \qquad (22\text{-}7)$$

حيث أن (c_s) الحرارة النوعية للهواء الرطب عند الإشباع وتساوي

$$c_s = c_a + c_v * \omega \quad (kJ/kg\ K) \qquad (23\text{-}7)$$

حيث

$$c_s = 1.005 + 1.82\omega$$

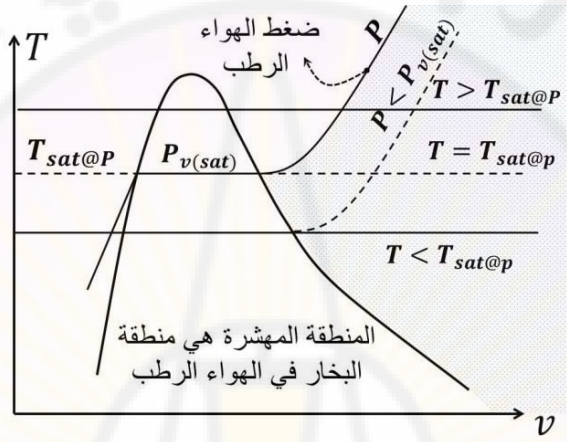
عندما تصبح النسبة $(h_c/\alpha' c_s)$ والتي تسمى نسبة البسايكومتر *Psychometric Ratio* مساوية إلى الواحد تصبح درجة الحرارة الرطبة مساوية لدرجة حرارة الإشباع الأدياباتية.

3.7 مخططات الهواء الرطب.

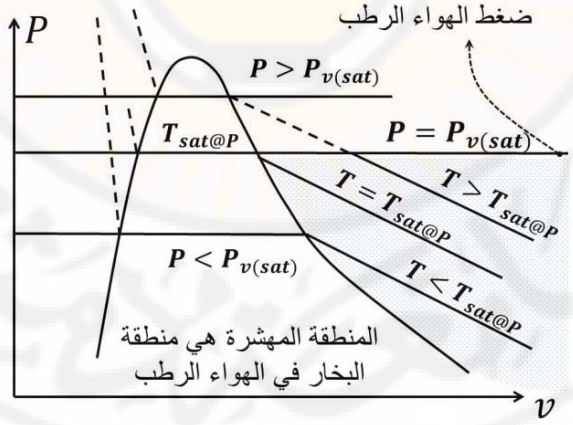
يبين الشكل (7−7) حالات بخار الماء ضمن الهواء الرطب على مخطط $(T - v)$ كما يبين الشكل (7−8) حالات بخار الماء ضمن الهواء الرطب على مخطط $(P - v)$. نلاحظ من كلا الشكلين أننا لايمكن أن نحصل على ضغط أعلى من ضغط الهواء الرطب. لتحديد بارامترات الهواء الرطب نتبع الخطوات التالية:

- نجد من جداول البخار في درجة حرارة الإشباع بدلالة ضغط الهواء فنجد $(T_{sat@P})$.
- $(T < T_{sat@P})$ فالهواء الرطب هو عبارة عن مزيج من *بخار ماء غير مشبع وهواء جاف*. نحدد القيم من جدول البخار المشبع $P_{v(sat)} = P_{sat}$ و الكثافة $= \rho_{v(sat)}$ $\cdot \rho_{(at\ x=1)}$
- $(T = T_{sat@P})$ فالهواء الرطب هو عبارة عن مزيج من *بخار مشبع وهواء جاف*. نحدد القيم من جداول البخار المشبع $P_{v(sat)} = P$ و الكثافة $= \rho_{v(sat)}$ $\cdot \rho_{(at\ x=1)}$

- $(T > T_{sat@P})$ فالهواء الرطب هو عبارة عن مزيج من *بخار محمص وهواء جاف*. ومنه نجد أن $(P_{v(sat)} = P)$ ونحدد القيم من جدول البخار المحمص وقيمة الحجم النوعي v تحسب من مقلوب الكثافة.



الشكل (7-7) منطقة بخار الماء ضمن الهواء الرطب على مخطط $(T - v)$.



الشكل (8-7) منطقة بخار الماء ضمن الهواء الرطب على مخطط $(P - v)$.

المثال التطبيقي 7–6 – حالة الهواء الرطب.

درجة حرارة الهواء الرطب عند الضغط الجوي النظامي ($745\ mmHg$) في الحالة الأولى هي (80℃) و الحالة الثانية هي (120℃). احسب الرطوبة النسبية (φ) إذا كان الضغط الجزئي لبخار الماء ($P_v = 120\ mmHg$).

الفرضيات: الهواء غاز مثالي.

التحليل: في الحالة الأولى عندما تكون درجة الحرارة (80℃). لنحسب درجة حرارة الإشباع عند الضغط النظامي للهواء الرطب (البخار)، نجد من جداول الإشباع أن

$$T_{sat} = 99.97℃$$

$$T_{sat} = 99.97℃ > T = 80℃$$

وبالتالي البخار غير مشبع والهواء غير مشبع

$$P_{v(sat)} = P_{sat(at\ 80℃)} = 0.4739\ bar = 353.25\ mmHg$$

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{v\ (sat)}} = \frac{120}{353.25}$$

$$\varphi = 34\%$$

في الحالة الثانية عندما تكون درجة الحرارة (120℃). لنحسب درجة حرارة الإشباع عند الضغط النظامي للهواء الرطب (البخار)، نجد من جداول الإشباع أن

$$T_{sat} = 99.97℃$$

$$T_{sat} = 99.97℃ < T = 120℃$$

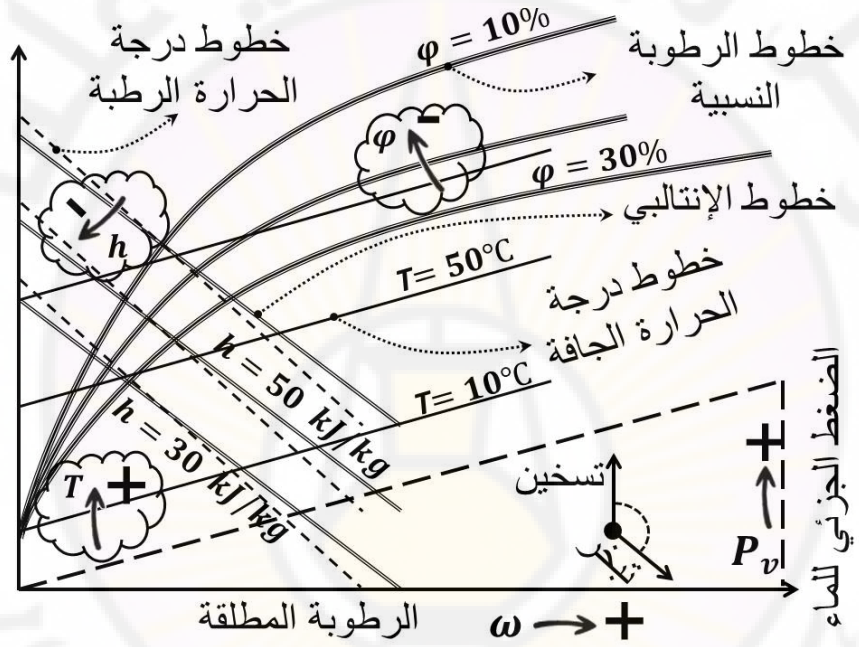
وبالتالي البخار محمص

$$P_{v(sat)} = P\ (humid\ air) = 745\ mmHg$$

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{v\ (sat)}} = \frac{120}{745}$$

$\varphi = 16\%$

الرطوبة النسبية هي 16 بالمئة.



الشكل (9–7) الخطوط الرئيسية لمخطط رامزين.

1.3.7 مخطط رامزين.

يمكن استخدام مخططات رامزين *Ramzin Chart* لتحديد بارامترات الهواء الرطب وبشكل كامل. يبين الشكل (9–7) الخطوط الرئيسية المؤلفة لمخطط رامزين. يعطي المحور الأفقي قيم الرطوبة المطلقة بواحدة غرام ماء إلى كيلوغرام هواء جاف ($g_v/kg_{d.a.}$) والتي تتزايد باتجاه اليمين ويعطي المحور الشاقولي الموجود على اليسار المخطط قيم الإنتالبي بالكيلوكالوري أو بالكيلوجول بحسب المخطط بالإضافة إلى قيم

درجة حرارة الهواء الجافة بالدرجة سيليزيوس. يعطي المحور الشاقولي اليميني الضغط الجزئي لبخار الماء الموجود في الهواء الرطب بواحدة الميليمتر الزئبق $(mmHg)$. السبب في اختيار هذه الوحدة هي لتكبير قيم الضغط الجزئي لبخار الماء الموجود في الهواء الرطب ورسمها على المخطط نفسه. تؤخذ على خط الرطوبة النسبية والمساوي إلى 100% قيم درجة الحرارة الرطبة بالدرجة سيليزيوس فقط وليس قيم درجة حرارة الندى. يعطى مخطط رامزين البارامترات عند الضغط الهواء النظامي فقط.

$$(1\ bar = 100\ kPa = 745 mmHg)$$

المثال التطبيقي 7-7 – حالة الهواء الرطب على مخطط رامزين.

معطيات ميزان البسايكومتر هي التالية $(T_{wet} = 37℃\ , T_{dry\ air} = 45℃)$ للهواء، أوجد نوعية الهواء وبارامتراته بالطريقة التحليلية وعبر المخططات عند الضغط الجوي النظامي $745mmHg$.

التحليل: نبدأ بالمخطط من تقاطع درجة الحرارة الجافة مع الرطوبة النسبية التي يعطيها جهاز البسايكومتري. نجد من جداول البسايكومتر الخاصة بالجهاز أن قيمة الرطوبة النسبية هي

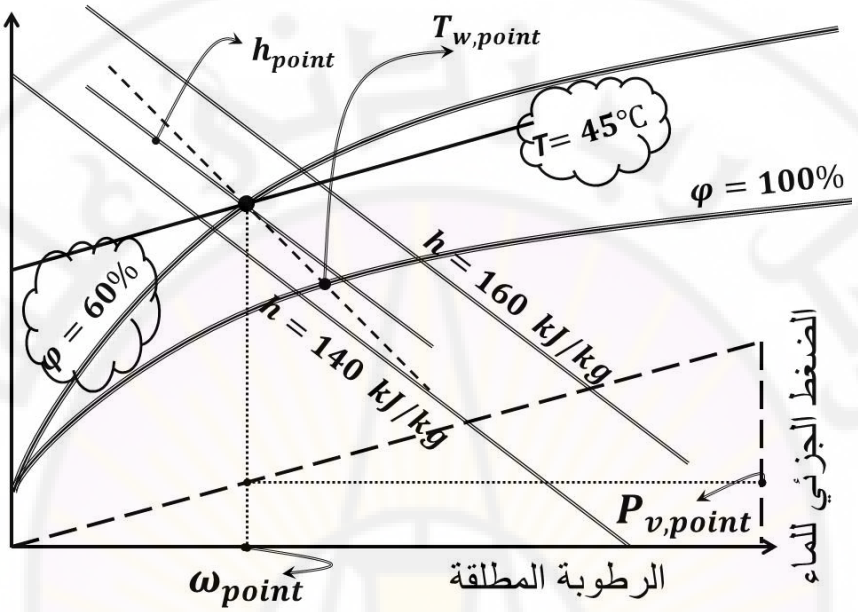
$$\varphi\ = 60\%$$

وبالتالي فالهواء غير مشبع. من جداول بخار الماء وبدلالة درجة حرارة الهواء $T_{dry} =$ 45℃ نجد

$$P_{sat\ (at\ 45)} = P_{v\ (sat)} = 0.09593\ bar = 71.5\ mmHg$$

وحسب علاقة الرطوبة النسبية نجد أن

$$P_v = \varphi\ P_{v\ (sat)} = 0.057558\ bar \cong 0.06\ bar = 44.7\ mmHg$$



من جداول البخار وحسب الضغط الجزئي P_v المحسوب سابق، نجد أن درجة حرارة الندى (حد الإشباع) $T_{dew} = 36.16℃ < T_{dr} = 45℃$

من علاقة الرطوبة المطلقة وباعتبار البخار غاز مثالي $P = 745\ mmHg$، نجد أن

$$\omega = 0.622 * \frac{0.06\ bar}{1\ bar - 0.06\ bar}$$

$$\omega = 39.7\ (g_v/kg_{d.a.})$$

ومن علاقة الإنتالبي نجد أن

$$h = T + \omega * (2501 + 1.84 * T)$$

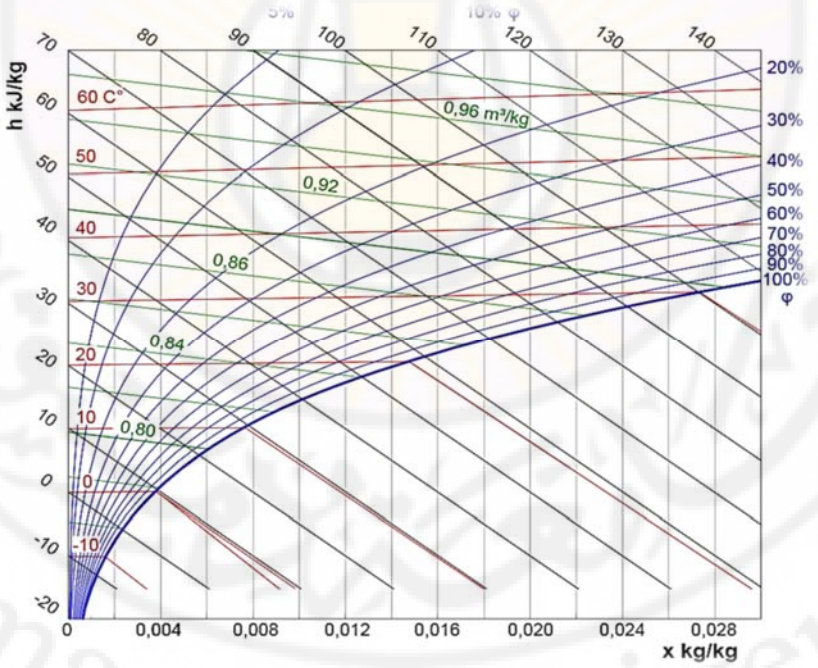
$$h = 45 + 0.0397 * (2501 + 1.84 * 45)$$

$$h = 147.57\ \left({}^{kJ}/_{kg}\right)$$

باستخدام بارامترات الهواء الرطب ونحددها على مخطط رامزين من تقاطع درجة الحرارة الجافة $T_{dry\ air} = 45℃$ ودرجة الحرارة الرطبة $T_{wet} = 37℃$ فنجد بالتقريب باقي بارمترات الهواء.

2.3.7 مخطط موليير (I-X Mollier).

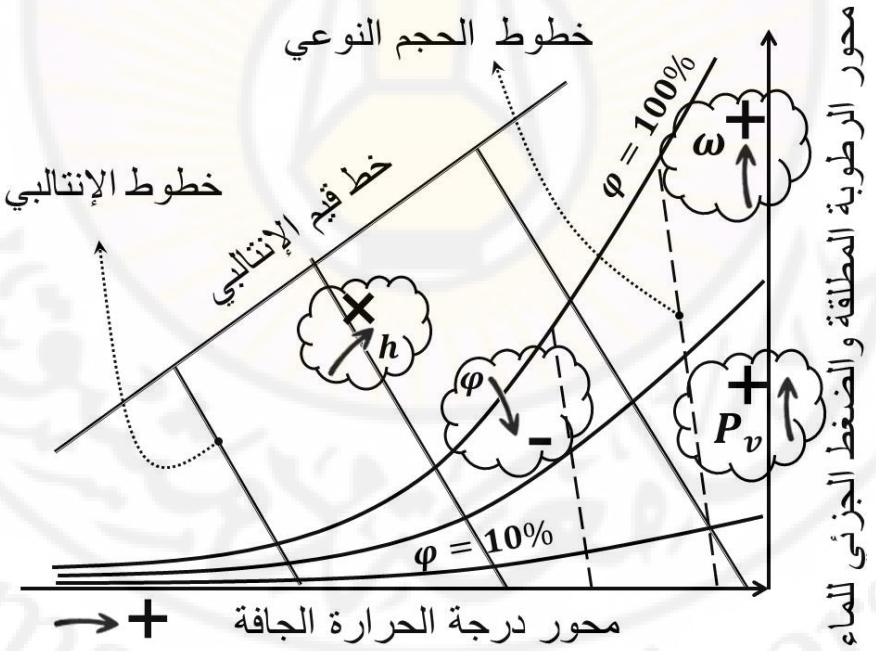
يبين الشكل (10−7) مخطط موليير *Mollier Chart* والذي يشبه إلى حد كبير مخطط رامزين من حيث التكوين. يرمز إلى الرطوبة المطلقة في مخطط موليير بـ $(x, kg_v/kg_{d.a.})$. نلاحظ أيضاً أن مخطط موليير يحتوي على قيم الحجم النوعي للهواء الرطب ولا توجد ضمنه قيم درجة الحرارة الرطبة.



الشكل (10−7) مخطط موليير (H-X Mollier).

3.3.7 مخطط البسايكومتريك.

يتم الحصول على مخطط البسايكرومتر *Pychrometric Chart* من مخطط موليير بقلب *Flip* مخطط موليير وتدويره 90 درجة مع عقارب الساعة. يبين الشكل (7–11) الخطوط الرئيسية في مخطط البسايكومتري. في هذا المخطط نجد أن المحور الأفقي يعطي قيم درجة الحرارة الجافة بالدرجة سيليزيوس والتي تتزايد باتجاه اليمين والمحور الشاقولي يعطي قيم الرطوبة المطلقة بالغرام ماء إلى كيلوغرام هواء جاف وقيم الضغط الجزئي للماء. نلاحظ أن مخطط البسايكومتري أيضا يعطي قيم الحجم النوعي كما في مخطط موليير. يعطى مخطط البسايكومتري البارامترات عند الضغط النظامي أيضاً. هناك مجموعة من المخططات البسايكومترية المطبوعة والتي يمكن استجرارها من الإنترنت ولكن يجب الانتباه لشروط ضغط الهواء الرطب المختار في المخطط.



الشكل (7–11) الخطوط الرئيسية لمخطط البسايكومتري.

4.7 تطبيقات الهواء الرطب.

هناك الكثير من التطبيقات للهواء الرطب وسوف نذكر أهمها

1.4.7 التأثير المشترك بين الهواء والماء في الطبقة الحدية.

- الحالة الأولى هي حالة تبخر الماء إلى الهواء.

إن شرط حدوث هذه العملية يكون عندما تكون الرطوبة المطلقة (ω) ودرجة حرارة نقطة الندى (T_{dew}) لبخار الماء داخل الهواء الرطب أقل من الرطوبة المطلقة ودرجة حرارة طبقة الهواء المشبع الملامسة لسطح الماء.

$$P_{v\,(surface)} > P_v$$

- الحالة الثانية هي حالة تكاثف بخار الماء الموجود في الهواء إلى سطح الماء.

إن شرط حدوث العملية عندما تكون الرطوبة (ω) المطلقة ودرجة حرارة نقطة الندى (T_{dew}) لبخار الماء داخل الهواء الرطب أكبر من الرطوبة المطلقة ودرجة حرارة طبقة الهواء المشبع الملامسة لسطح الماء.

$$P_{v\,(surface)} < P_v$$

- الحالة الثالثة هي حالة التوازن حيث لا تكاثف ولا تبخر.

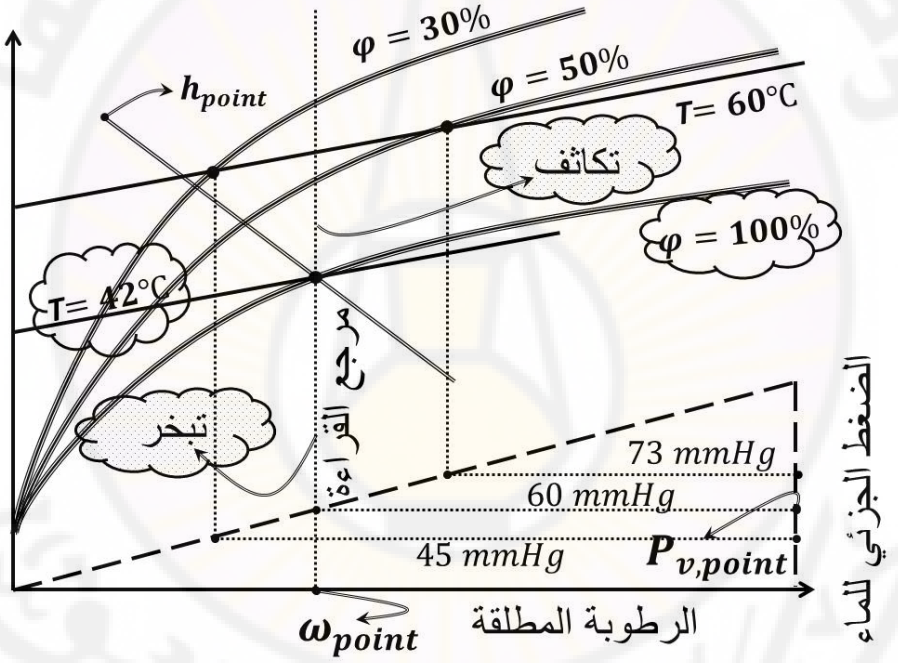
$$P_{v\,(surface)} = P_v$$

المثال التطبيقي 7–8 – التأثير المشترك.

ينساب الهواء على سطح مائي بدرجة حرارة وقدرها ($T = 42$°C). إذا فرضنا أن الهواء المنساب في الحالة الأولى ذو درجة حرارة ($T = 60$°C) ورطوبة نسبية ($\varphi = 50\%$) وفي الحالة الثانية ذو درجة حرارة ($T = 60$°C) ورطوبة نسبية ($\varphi = 30\%$). حدد فيما إذا كانت العملية عملية تبخر للماء من السطح المائي أو تكاثف لبخار الماء الموجود في الهواء في كلتا الحالتين.

الفرضيات: الهواء غاز مثالي.

التحليل: يحسب ضغط طبقة الهواء المشبع فوق سطح الماء بمد درجة حرارة الماء $(T = 42℃)$ على مخطط رامزين إلى أن تقاطع مع منحني $(\varphi = 100\%)$. نأخذ الشاقول لحاسب الضغط الجزئي فيكون ضغط البخار في الطبقة الحدية يساوي $(P_{v(surface)} = 60\ mmHg)$ كما هو واضح في الشكل المرفق على مخطط رامزين.



في الحالة الأولى ذات درجة الحرارة $(T = 60℃)$ والرطوبة النسبية $(\varphi = 50\%)$ وبتقاطع درجة الحرارة الجافة مع الرطوبة النسبية على مخطط رامزين نجد أن الضغط البخار الجزئي في الهواء المنساب هو $(P_v = 73\ mmHg)$ أي أن ضغط بخار الماء في الهواء المنساب **أعلى** من الطبقة الحدية الهواء على السطح المائي بالتالي تحدث عملية ***تكاثف*** للماء في الهواء الرطب.

في الحالة الثانية ذات درجة الحرارة $(T = 60℃)$ والرطوبة النسبية $(\varphi = 30\%)$ وبتقاطع درجة الحرارة الجافة مع الرطوبة النسبية على مخطط رامزين نجد أن الضغط البخار الجزئي في الهواء المنساب هو $(P_v = 45\ mmHg)$ أي أن ضغط بخار الماء في الهواء المنساب **أقل** من الطبقة الحدية الهواء على السطح المائي بالتالي تحدث عملية ***تبخر*** للماء من السحط المائي إلى الهواء المنساب.

خلاصة.

تصف النقاط التي تقع على ***يمين*** الشاقول، كما هو واضح في الشكل المرافق، حالات الهواء التي يحدث فيها تكاثف وهذا يؤدي إلى تبريد الهواء الرطب وتسخين طبقة الهواء المشبعة الملامسة للماء. النقاط التي تقع على ***اليسار*** تصف الحالات التي يحدث فيها تبخر وهذا يؤدي إلى تبرد طبقة الهواء المشبعة الملامسة للماء وتسخين الهواء الرطب.

2.4.7 العمليات في أجهزة التجفيف.

يتألف المجفف من قسمين الأول يسمى قسم التسخين والثاني يسمى قسم التجفيف. في المجففات النظرية تسحب المروحة الهواء الجوي وتضخه إلى المسخن والذي يسمى "كالوريفير" حيث يسخن دون زيادة مضمون رطوبته ثم يدخل إلى غرفة التجفيف حيث يتلامس مع المادة المراد تجفيفها ويبخر الماء المطلوب إزالته من المادة.

- قسم التسخين (كالوريفير)

تتم عميلة التسخين في قسم المسخن بثبات الرطوبة المطلقة $(\omega = const)$ كما هو واضح في مخطط رامزين وبتناقص الرطوبة النسبية (φ) وزيادة الإنتالبي (h). التسخين هنا هو تسخين محسوس لأن الرطوبة المطلقة ثابتة. بتطبيق قانون انحفاظ الطاقة على قسم التسخين نجد

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\left(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in}\right) + \sum_{in} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) = \left(\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out}\right) + \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \quad (kW)$$

بما أن عملية التسخين مستقرة وبإهمال الأعمال الأخرى والطاقة الكامنة والحركية والتدفق ثابت نجد

$$\left(+\dot{W}_{in}\right) + \sum_{in} \dot{m}\,(h) = \left(\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out}\right) + \sum_{out} \dot{m}\,(h) \quad (kW)$$

أي أن

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m} * (h_{exit} - h_{in}) \quad (kW) \qquad (25\text{-}7)$$

أو يمكن كتابتها بالشكل

$$Q_{in} = (h_{exit} - h_{in}) \quad (kJ/kg_{d.a.})$$

- <u>قسم التجفيف</u>

تتم عملية التجفيف بثبات الإنتالبي $(h = const)$ وبتناقص حرارة الهواء وزيادة الرطوبة المطلقة ω. يمكن حساب معدل كمية الماء المتبخر من المادة من معادلة انحفاظ الكتلة

$$\dot{m}_{a,in} * \omega_{in} + \dot{m}_w = \dot{m}_{a,exit} * \omega_{exit}$$

وبما أن هناك مدخلاً واحداً ومخرجاً واحداً أي

$$\dot{m}_{a,in} = \dot{m}_{a,exit} = \dot{m}_a$$

بالتعويض نجد

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a * (\omega_{exit} - \omega_{in}) \quad (kg_v/s) \qquad (26\text{-}7)$$

أو يمكن كتابتها بالشكل

$$m_w = (\omega_{exit} - \omega_{in}) \quad (kg_v/kg_{d.a.})$$

المثال التطبيقي 7-9 – العمليات في المجفف.

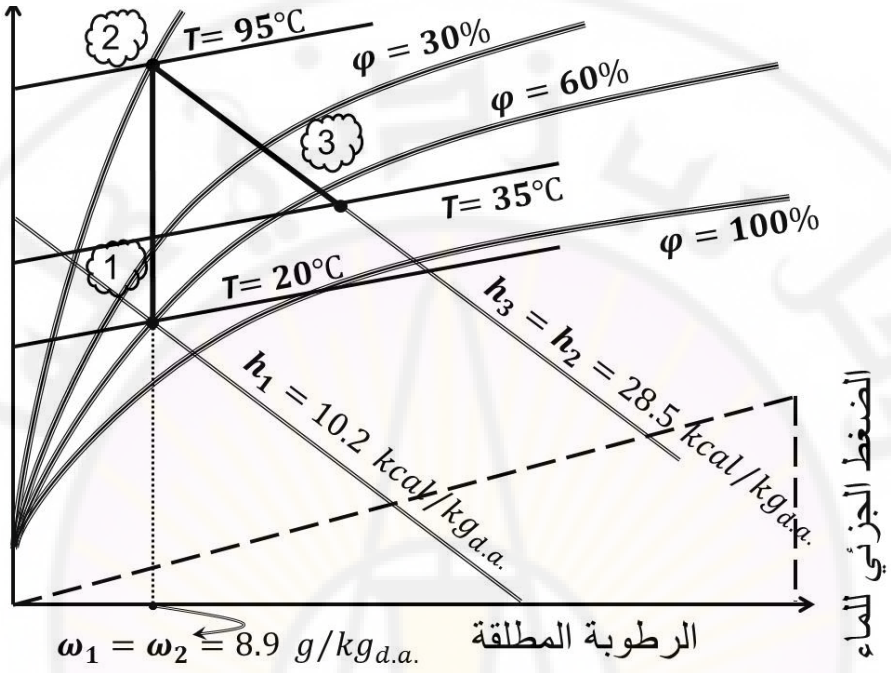
يدخل الهواء الجوي إلى مجفف بالشروط التالية ($\varphi = 60\%, T = 20℃$) ويسخن في الكالوريفير حتى ($T = 95℃$) ويوجه إلى المجفف حيث يخرج منه ($T = 35℃$). أوجد الرطوبة النهائية للهواء ثم مصروف الهواء لإزالة ($1\ kg$) من الرطوبة من المادة المجففة ومصروف الحرارة في الكالوريفير لكل ($1\ kg$) من الرطوبة.

التحليل: يبين الشكل المرفق نقاط الهواء في الأقسام المختلفة في المجفف. نقاطع بارامترات الهواء عند ($\varphi_1 = 60\%,\ T_1 = 20℃$) ونجد أن باقي قيم نقطة التقاطع من المخطط وتكون ($h_1 = 10.2\ kcal/kg_{d.a.}, \omega_1 = 8.9\ g_v/kg_{d.a.}$). في المسخن (الكالوريفير) نقوم بتثبيت الرطوبة المطلقة (ω) إلى أن تتقاطع مع ($T_2 = 95℃$) ونجد أن بارامترات حالة التقاطع هي ($h_2 = 28.5\ kcal/kg_{d.a.}, \omega_2 = 8.9\ g_v/kg_{d.a.}$). في المجفف نقوم بتثبيت الإنتالبي (h) حتى تتقاطع ($T_3 = 35℃$) فتكون بارامترات الهواء بعد الخروج من المجفف هي $h_3 = 10.2\ kcal/kg, \omega_3 = 32.8\ g_v/kg_{d.a.}$. الرطوبة النهائية هي $\varphi_3 = 90\%$ أما الرطوبة المطلقة فهي

$$\omega_3 = 32.8\ g_v/kg_{d.a.}$$

كمية الماء المزالة من المادة المجففة يساوي التغيير في الرطوبة المطلقة في المجفف والتي تساوي

$$\Delta\omega = \omega_{after} - \omega_{before} = 32.8 - 8.9 = 23.9\ g_v/kg_{d.a.}$$



وبالتالي مصروف الهواء لكل $(1\ kg)$ من الرطوبة هو

كل 23.9 غرام ماء يزال من المجفف نحتاج إلى 1 كيلوغرام هواء رطب

إذا أردنا أن نزيل 1000 غرام من الماء نحتاج إلى (x)هواء رطب

$$x = \frac{1000 g_v * 1\ kg_{d.a.}}{23.9\ g_v} = 4.18\ kg_{d.a.}$$

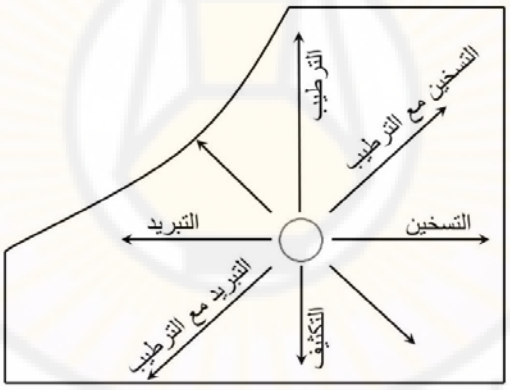
كمية الحرارة المطلوبة في الكالوريفير من الهواء الرطب لإزالة هذه الكمية من الماء هي

$$Q = m_{air} * (h_{after} - h_{before})$$

$$Q = 4.18\ kg_{d.a.} * (28.5 - 10.2)\ kcal/kg_{d.a.} = 76.5\ kcal$$

3.4.7 العمليات في أجهزة التكييف *Air Conditioning Processes*.

لإبقاء درجة حرارة مكان ما (غرفة نوم أو مكان عمل) عند درجة حرارة معينة ورطوبة نسبية مناسبة وضمن حدود منطقة الراحة *Comfort Zone* فإننا نقوم بمعالجة الهواء بمجموعة من العمليات وضمن أجهزة معينة تسمى أجهزة التكييف *Air Conditioning Devices* قبل دخوله إلى المكان المطلوب. تقسم هذه العمليات إلى عمليات تبريد وتسخين عمليات تسخين مع ترطيب عمليات تبريد مع إزالة الرطوبة المطلقة وعمليات التبريد التبخيري *Evaporative Cooling* وعمليات الخلط الأدياباتية *Adiabatic Mixing* وعمليات التبريد في أبراج المائية*Wet Cooling Towers*. يبين الشكل (7-12) كافة العمليات السابقة على المخطط البسايكومتري. يمكن تمثيل نفس العمليات على مخطط رامزين ومولييه.



الشكل (7-12) العمليات في أجهزة التكييف على مخطط البسايكومتري.

1.3.4.7 عمليات التبريد أو التسخين المحسوس.

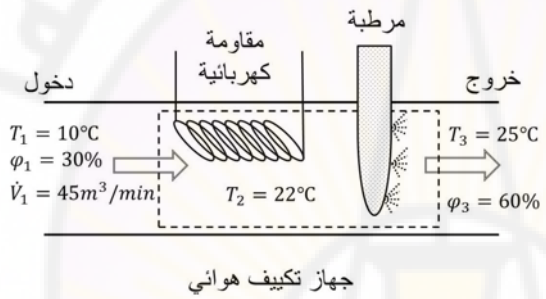
تتم عمليات التبريد أو التسخين بثبات الرطوبة المطلقة وهذا ماشاهدناه في مخطط رامزين.

2.3.4.7 عمليات التسخين مع الترطيب.

تقوم عملية التسخين بتخفيض الرطوبة المطلقة ضمن الهواء الرطب ولرفع هذه القيمة نعمل على ضخ الماء ضمن الهواء من أجل رفع قيمة الرطوبة المطلقة.

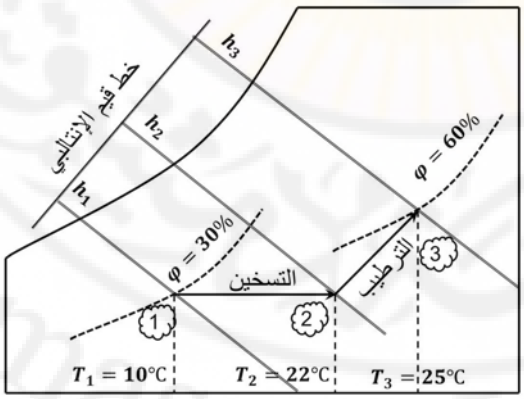
المثال التطبيقي 7–10 – عملية التسخين والترطيب للهواء الرطب.

تقوم أجهزة التكييف بمعالجة هواء خارجي ذي الشروط $(10°C, 30\%)$ وبشكل مستقر وبتدفق قدره $(45m^3/min)$ إلى الشروط $(25°C, 60\%)$. نقوم أولاً بتسخين الهواء إلى $(22°C)$ في قسم التسخين ومن ثم نضخ البخار الساخن على شكل رذاذ ضمن مجرى الهواء في قسم الترطيب. بفرض أن العمليات تتم بضغط جوي نظامي حدد 1) كمية الحرارة المضافة في قسم التسخين و2) تدفق البخار الساخن المطلوب في قسم الترطيب.



جهاز تكييف هوائي

الفرضيات: 1) العمليات ضمن جهاز التكييف مستقرة 2) الهواء الجاف وبخار الماء غازات مثالية و3) الطاقة الجركية والكامنة مهملة.



التحليل: يبين الشكل المرفق العمليات في جهاز التكييف.

تعطى كمية الحرارة في قسم التسخين بالعلاقة

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_a * (h_2 - h_1)$$

يعطى الإنتالبي من العلاقة

$$h = T + \omega(2501 + 1.84 * T)$$

من الحالة الأولى الشروط هي $(10℃, 30\%)$ من الرطوبة النسبية نحسب الضغط الجزئي للبخار ومنه الرطوبة المطلقة. عند درجة الحرارة في النقطة الأولى نجد ضغط الإشباع

$$P_{v1(sat)@10℃} = 1.2281\ kPa$$

$$P_{v1} = \varphi * P_{v1(sat)@10℃}$$

$$P_{v1} = 0.3 * 1.2281\ kPa$$

$$P_{v1} = 0.368\ kPa$$

الرطوبة المطلقة

$$\omega_1 = 0.622 * \frac{P_{v1}}{P - P_{v1}}$$

$$\omega_1 = 0.622 * \frac{0.3684\ kPa}{100\ kPa - 0.368\ kPa}$$

$$\omega_1 = 0.0023\ \left(\frac{kg_v}{kg_{d.a.}}\right) = 2.3\ \left(\frac{g_v}{kg_{d.a.}}\right)$$

بالتعويض في علاقة الإنتالبي نجد أن

$$h_1 = T + \omega_1(2501 + 1.84 * T_1)$$

$$h_1 = 1\frac{kJ}{kg_{d.a.}℃} * 10℃ + 0.0023\ \left(\frac{kg_v}{kg_{d.a.}}\right)\left[2501\frac{kJ}{kg_{d.a.}} + 1.84\frac{kJ}{kg_{d.a.}℃} * 10℃\right]$$

$$h_1 = 15.8\ \frac{kJ}{kg_{d.a.}}$$

الرطوبة المطلقة في عملية التسخين هي ثابتة فنجد إنتالبي النقطة (2) بالشكل

$$h_2 = T + \omega_2(2501 + 1.84 * T_2)$$

$$h_2 = 1\frac{kJ}{kg_{d.a.}℃} * 22℃ + 0.0023\ \left(\frac{kg_v}{kg_{d.a.}}\right)\left[2501\frac{kJ}{kg_{d.a.}} + 1.84\frac{kJ}{kg_{d.a.}℃} * 22℃\right]$$

$$h_2 = 28\ \frac{kJ}{kg_{d.a.}}$$

تحسب كمية الهواء الرطب من علاقة التدفق

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_1}{v_1}$$

يحسب الحجم النوعي من معادلة الغاز المثالي

$$v_1 = \frac{R_a * T_1}{P_a}$$

$$v_1 = \frac{0.287\frac{kJ}{kgK} * (10 + 273)K}{100\ kPa - 0.368\ kPa}$$

$$v_1 = 0.815\ \left(\frac{m^3}{kg_{d.a.}}\right)$$

بالتعويض في علاقة تدفق الهواء الرطب نجد أن

$$\dot{m}_a = \frac{45\frac{m^3}{60s}}{0.815\frac{m^3}{kg_{d.a.}}} = 0.92\left(\frac{kg_{d.a.}}{s}\right)$$

بالتعويض في علاقة كمية الحرارة نجد أن

$$\dot{Q}_{in} = 0.92 \frac{kg_{d.a.}}{s} * (28 - 15.8) \frac{kJ}{kg_{d.a.}}$$

$$\dot{Q}_{in} = 11.23 \ kW$$

لحساب تدفق الماء في قسم الترطيب يجب أن نحسب كمية الماء اللازمة لرفع درجة الحرارة إلى (25℃). من معادلة انحفاظ الكتلة نجد أن

$$\dot{m}_{a2} * \omega_2 + \dot{m}_w = \dot{m}_{a3} * \omega_3$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a * (\omega_3 - \omega_2)$$

تحسب الرطوبة المطلقة عند النقكة (3) من عملية الترطيب. يجب الانتباه هنا إلى أن الإنتالبي غير ثابت في عملية الترطيب هذه كما هو واضح من الشكل المرفق. من الحالة الثالثة الشروط هي (25℃, 60%) من الرطوبة النسبية نحسب الضغط الجزئي للبخار عند النقطة (3). عند درجة الحرارة في النقطة (3) نجد ضغط الإشباع

$$P_{v3(sat)@25℃} = 3.1698 \ kPa$$

$$P_{v3} = \varphi * P_{v3(sat)@25℃}$$

$$P_{v3} = 0.6 * 3.1698 \ kPa$$

$$P_{v3} = 1.90 \ kPa$$

الرطوبة المطلقة

$$\omega_3 = 0.622 * \frac{P_{v3}}{P - P_{v3}}$$

$$\omega_3 = 0.622 * \frac{1.90 \ kPa}{100 \ kPa - 1.90 \ kPa}$$

$$\omega_3 = 0.01204 \left(\frac{kg_v}{kg_{d.a.}}\right) = 12 .04 \left(\frac{g_v}{kg_{d.a.}}\right)$$

أو يمكن حسابها من العلاقة

$$\omega_3 = \frac{0.622 * \varphi_3 * P_{v3}}{P - \varphi_2 * P_{v3}}$$

بالتعويض

$$\dot{m}_w = 0.92 \frac{kg_{d.a.}}{s} * (0.01204 - 0.0023) \frac{kg_v}{kg_{d.a.}}$$

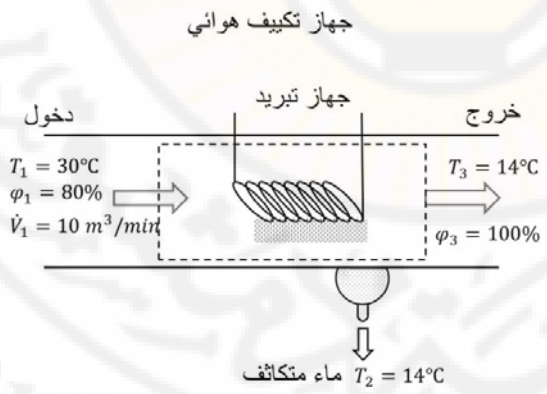
$$\dot{m}_w = 0.0089 \frac{kg_v}{s} = 0.532 \frac{kg_v}{min}$$

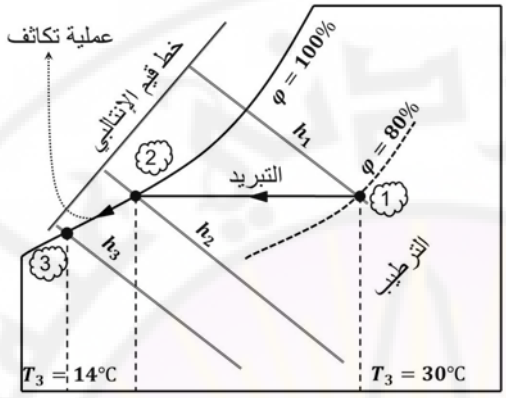
3.3.4.7 عمليات التبريد مع التكثيف.

عمليات التبريد هي عمليات طرح حرارة محسوسة كما شاهدنا سابقاً ولكن عندما تنخفض درجة حرارة الهواء الرطب إلى مادون درجة حرارة الإشباع لبخار الماء الموجود في الهواء الرطب تبدأ عملية تكاثف البخار.

المثال التطبيقي 7−11 – عملية التسخين والترطيب للهواء الرطب.

تقوم أجهزة التكييف على معالجة هواء خارجي ذي الشروط $(30℃, 80\%)$ وبشكل مستقر وبتدفق قدره $(10\ m^3/min)$ ويخرج على شكل هواء مشبع وبدرجة حرارة $(14℃)$. الماء المتكاثف خلال هذه العملية يخرج من الجهاز بدرجة حرارة قدرها $(14℃)$. بفرض أن العمليات تتم بضغط جوي نظامي حدد 1) كمية الحرارة المزالة في قسم التبريد و2) معدل التكاثف في عملية التكثيف.





الفرضيات: 1) العمليات ضمن جهاز التكييف مستقرة 2) الهواء الجاف وبخار الماء غازات مثالية و3) الطاقة الجركية والكامنة مهملة.

التحليل: يبين الشكل المرفق العمليات في جهاز التكييف. بتطبيق القانون الأول في الترموديناميك على الجهاز نجد أن

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\left(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in}\right) + \sum_{in} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) = \left(\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out}\right) + \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \quad (kW)$$

$$(0 + 0) + \sum_{in} \dot{m}\,(h) = \left(\dot{Q}_{out} + 0\right) + \sum_{out} \dot{m}\,(h)$$

الطاقة الخارجة من سطح التحكم مؤلفة من قسمين القسم الأول هو خروج الهواء من الجهاز والثاني هو خروج الماء من الجهاز أي

$$\dot{m}_{a1} * h_1 = \dot{Q}_{out} + (\dot{m}_{w2} h_2 + \dot{m}_{a3} h_3)$$

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{a1} * (h_1 - h_3) - \dot{m}_{w2} h_w$$

من قانون انحفاظ الكتلة نجد أن

$$\dot{m}_{a2} * \omega_2 + \dot{m}_w = \dot{m}_{a1} * \omega_1$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a * (\omega_1 - \omega_2)$$

بارامترات النقطة (1) تحسب من الشروط المعطاة في المسألة (30℃, 80%) وبحسب المعادلات المعروفة للهواء الرطب نجد أن

$$h_1 = 85.4\ kJ/kg_{d.a.}$$

$$\omega_1 = 0.0216\ kg_v/kg_{d.a.}$$

$$v_1 = 0.889 \frac{m^3}{kg_{d.a.}}$$

بارامترات النقطة (3) تحسب من الشروط المعطاة في المسألة على أساس أن الهواء مشبع وبدرجة حرارة (14℃) وبحسب المعادلات المعروفة للهواء الرطب نجد أن

$$h_3 = 39.3\ kJ/kg_{d.a.}$$

$$\omega_3 = 0.0100\ kg_v/kg_{d.a.}$$

كتلة الهواء تحسب من كمية التدفق الحجمي في المسالة

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_1}{v_1}$$

$$\dot{m}_a = \frac{10\ m^3/min}{0.889 \frac{m^3}{kg_{d.a.}}} = 11.25 \frac{kg_{d.a.}}{min}$$

بالتعويض في معادلة الكتلة نجد أن

$$\dot{m}_w = 11.25 \frac{kg_{d.a.}}{min} * (0.0216 - 0.0100)\ kg_v/kg_{d.a.}$$

$$\dot{m}_w = 0.131\ kg_v/min$$

بالتعويض في معادلة الطاقة نجد

$$\dot{Q}_{out} = 11.25\frac{kg_{d.a.}}{min} * (85.4 - 39.3)\frac{kJ}{kg_{d.a.}} - 0.131\frac{kg_v}{min} * 58.8\frac{kJ}{kg_v}$$

$$\dot{Q}_{out} = 511\ kJ/min$$

4.3.4.7 عمليات التبريد التبخيرية *Evaporative Cooling*.

تعتمد عملية التبريد بالتبخير على تبخر كمية معينة من الماء واستخدام الحرارة الكامنة الناتجة عن هذا التبخر في عملية التبريد. مثال عن التبريد بالتبخير هي جرة "الخابية" التي تستعمل في تبريد مياه الشرب. مبدأ العمل في الخابية يعتمد على تسريب كمية معينة من الماء إلى خارج الخابية عبر مساماتها بواسطة القوى السطحية للماء ويؤدي تبخر الماء إلى تبريد كمية الماء الموجودة داخل الخابية. تتبع عملية التبريد التبخيري خطوط درجة الحرارة الرطبة على مخطط البسايكومتري كما هي على مخطط رامزين.

$$T_{wet} \cong constant$$

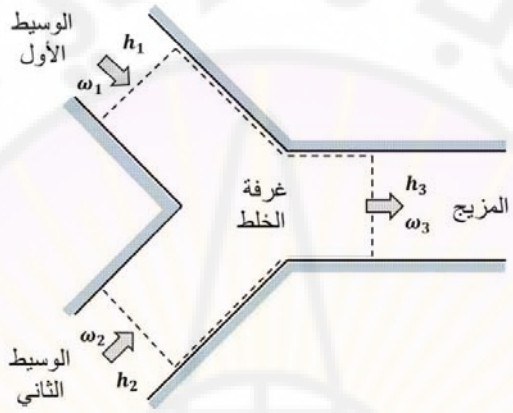
وبما أن خطوط درجة الحرارة الرطبة تتطابق مع خطوط الإنتالبي كما سبق وشرحنا في فقرة درجة حرارة الإشباع الأدياباتية

$$h \cong constant$$

5.3.4.7 عمليات الخلط الأدياباتي *Adiabatic Mixing*.

في أجهزة التكييف يتم خلط مزيجين من الهواء (هواء خارجي وهواء راجع) بنسب مختلفة ودرجات احرارة مختلفة وذلك من أجل رفع درجة حرارة الهواء الخارجي في

الشتاء أو تخفيض درجة حرارة الهواء الخارجي في الصيف كما هو واضح في الشكل (13-7).



الشكل (13-7) عملية الخلط الأدياباتية مع سطح التحكم.

بما أن كمية الحرارة المتبادلة بين المزيج والوسط الخارجي صغيرة جداً فيمكن أن نعد عملية الخلط عملية أدياباتية. من معادلة انحفاظ الكتلة للهواء الجاف نجد

$$\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3} \qquad (27\text{-}7)$$

أما معادلة انحفاظ الكتلة لبخار الماء

$$\omega_1 * \dot{m}_{a1} + \omega_2 * \dot{m}_{a2} = \omega_3 * \dot{m}_{a3} \qquad (28\text{-}7)$$

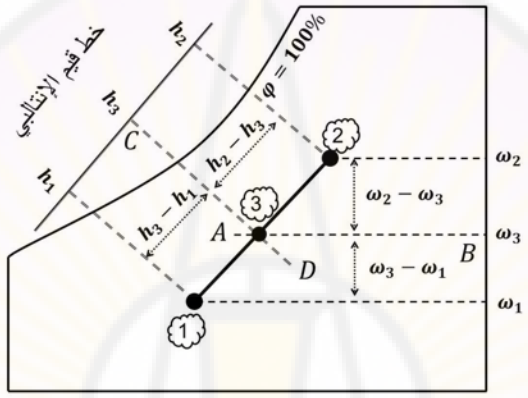
معادلة انحفاظ الطاقة للخلط

$$\dot{m}_{a1} * h_1 + \dot{m}_{a2} * h_2 = \dot{m}_{a3} * h_3 \qquad (29\text{-}7)$$

بالإستغناء عن كتلة هواء المزيج ($\dot{m}_{a3}$) من المعادلتين السابقتين نجد أ،

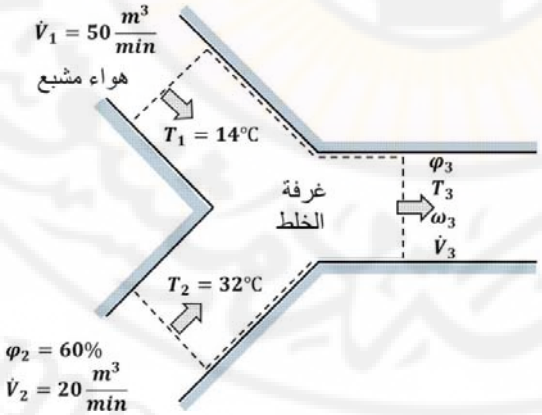
$$\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} \qquad (30\text{-}7)$$

التمثيل الهندسي لهذه النسبة موضح من الشكل (14−7). تبين المعادلة السابقة أن نسبة الرطوبة المطلقة تساوي نسبة الهواء الجاف بين الوسيطين وهذا يتوافق مع الخط (AB). نسبة الإنتالبي أيضاً تساوي نسبة الهواء الجاف بين الوسيطين وهذا يتوافق مع الخط (CD). تقاطع الخطين السابقين يعطي حالة المزج (3).

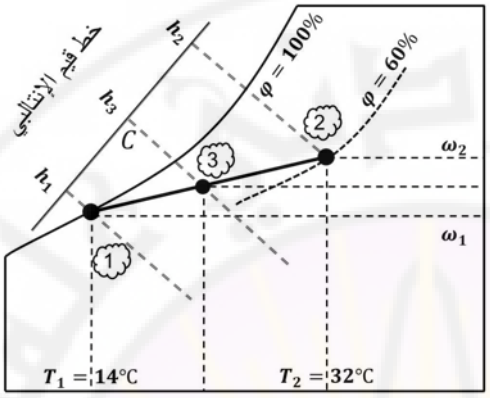


الشكل (14−7) عملية الخلط على مخطط البسايكومتري.

<u>المثال التطبيقي 7−12 – عملية الخلط بين الهواء الخارجي وهواء الغرفة الرجع.</u>



نقوم بمزج هواء مشبع مبرد بدرجة حرارة (14℃) وبتدفق $(50\ m^3/min)$ وبشكل أدياباتي مع هواء خارجي ذي الشروط (32℃, 60%) وتدفق $(20\ m^3/min)$. بفرض أن عملية الخلط تتم بضغط جوي نظامي حدد 1) الرطوبة المطلقة 2) الرطوبة النسبية 3) درجة الحرارة الجافة و3) التدفق الحجمي للمزيج.



الفرضيات: 1) العمليات ضمن جهاز التكييف مستقرة 2) الهواء الجاف وبخار الماء غازات مثالية 3) عملية الخلط أدياباتية و4) الطاقة الحركية والطاقة الكامنة مهملة.

التحليل: يبين الشكل المرفق العمليات في جهاز التكييف ذي الخلط الأدياباتي. الهواء العائد هو هواء مشبع أي أن الرطوبة النسبية هي 100% وباقي البارامترات هي

$$h_1 = 39.4\ kJ/kg_{d.a.}$$

$$\omega_1 = 0.01\ kg_v/kg_{d.a.}$$

$$v_1 = 0.826 \frac{m^3}{kg_{d.a.}}$$

بارامترات الهواء الخارجي

$$h_2 = 79\ kJ/kg_{d.a.}$$

$$\omega_2 = 0.0182\ kg_v/kg_{d.a.}$$

$$v_2 = 0.889 \frac{m^3}{kg_{d.a.}}$$

من عملية الخلط نجد أن كتلة الهواء الخارجي والعائد هي

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}}{v}$$

$$\dot{m}_{a1} = \frac{50\ m^3/min}{0.826 \frac{m^3}{kg_{d.a.}}} = 60.5 \frac{kg_{d.a.}}{min}$$

$$\dot{m}_{a2} = \frac{20\ m^3/min}{0.889\ \frac{m^3}{kg_{d.a.}}} = 22.5\ \frac{kg_{d.a.}}{min}$$

كتلة الخليط بحسب قانون انحفاظ الكتلة هي

$$\dot{m}_{a3} = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}$$

$$\dot{m}_{a3} = 60.5 + 22.5 = 83\ \frac{kg_{d.a.}}{min}$$

من النسبة

$$\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1}$$

نجد أن

$$h_3 = 50.1\ kJ/kg_{d.a.}$$

$$\omega_3 = 0.0122\ kg_v/kg_{d.a.}$$

يمكن من خلال المخططات أو من المعاجلات التحليلية إيجاد

$$T_3 = 19℃$$

$$\varphi_3 = 89\%$$

$$v_3 = 0.844\ \frac{m^3}{kg_{d.a.}}$$

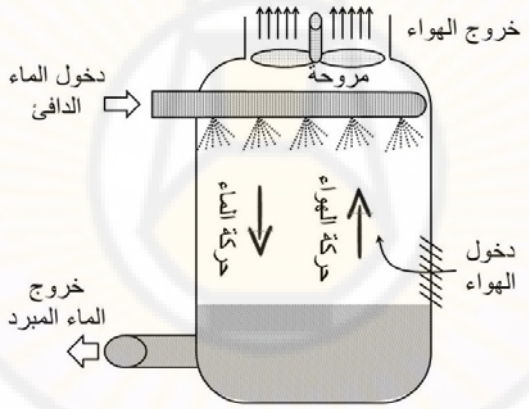
التدفق الحجمي للخليط

$$\dot{V}_3 = 83\ \frac{kg_{d.a.}}{min} * 0.844\ \frac{m^3}{kg_{d.a.}}$$

$$\dot{V}_3 = 70.1\ \frac{m^3}{min}$$

6.3.4.7 عمليات التبريد في الأبراج المائية *Wet Cooling Towers*.

تعد العمليات التبريدية في الأبراج المائية عمليات تبريد تبخيرية. يبين هو واضح في الشكل (15–7) حركة الماء والهواء ضمن البرج المائي. يدخل الماء الدافئ من الأعلى عبر مجمع ويرذذ إلى الأسفل بواسطة بخاخات. يدخل الهواء من جوانب البرج ويتحرك باتجاه الأعلى بفعل التحميل القسري الناتج عن المروحة. يتم التبادل الحراري نتيجة تلامس الهواء والماء بعملية تبخيرية وتنخفض درجة حرارة الماء وترتفع حرارة الهواء. يجمع الماء البارد في الأسفل ويعاد ضخه إلى دارة التبريد. يمكن تمثيل البرج التبريدي على أن المكثف في دورة التوليد البخارية أو المصرف الحراري في محرك حراري بحسب القانون الثاني في الترموديناميك.

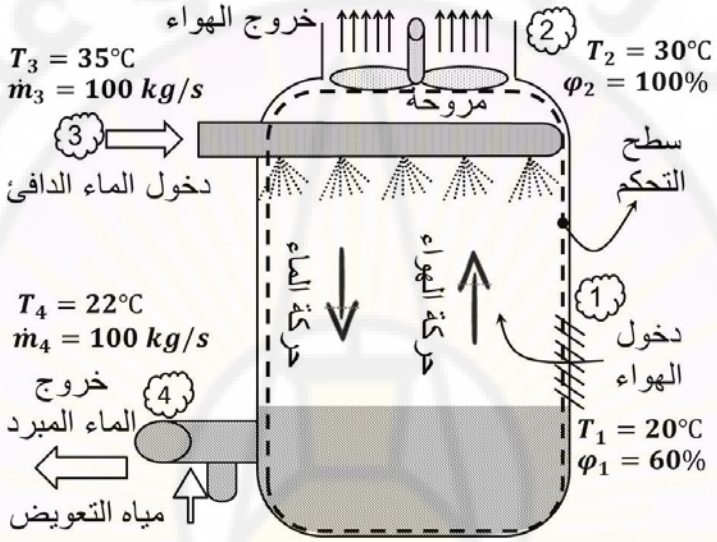


الشكل (15–7) حركة الهواء والماء ضمن برج مائي تبريدي.

المثال التطبيقي 7–13 – تبريد البخار الخارج من العنفة البخارية بواسطة الأبراج المائية.

يخرج ماء التبريد الموجود في المبادل الحراري في مكثف دارة توليد بخارية ويضخ إلى أبراج مائية لطرح الحرارة وتبريديه يدخل الماء الدافئ بدرجة حرارة (35°C) وتدفق ($100\ kg/s$) ويبرد إلى درجة حرارة (22°C). يدخل الهواء إلى البرج بدرجة حرارة

(20°C) ورطوبة نسبية 60% ويخرج بدرجة حرارة (30°C). بفرض أن حرارة المروحة مهملة والعمليات تتم تحت ضغط جوي نظامي حدد 1) التدفق الحجمي للهواء و2) تدفق مياة التعويض إلى البرج.



الفرضيات: 1) العمليات ضمن البرج المائي مستقرة 2) الهواء الجاف وبخار الماء غازات مثالية 3) عملية الخلط في البرج أدياباتية و4) الطاقة الجركية والكامنة مهملة.

التحليل: يبين الشكل المرفق البرج المائي. يجب تحديد بارامترات النقاط الأربع من خلال المخطط. النقطة (1) دخول الهواء

$$h_1 = 42.2\ kJ/kg_{d.a.}$$

$$\omega_1 = 0.0087\ kg_v/kg_{d.a.}$$

$$v_1 = 0.842\ \frac{m^3}{kg_{d.a.}}$$

النقطة (2) خروج الهواء

$$h_2 = 100\ kJ/kg_{d.a.}$$

$$\omega_2 = 0.0273\ kg_v/kg_{d.a.}$$

من معادلة انحفاظ الكتلة للهواء نجد أن

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2}$$

من معادلة انحفاظ الكتلة للماء نجد أن

$$(\dot{m}_3 + \dot{m}_{a1} * \omega_1)_{in} = (\dot{m}_4 + \dot{m}_{a2} * \omega_2)_{out}$$

$$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = \dot{m}_a * (\omega_2 - \omega_1) = \dot{m}_{makeup}$$

من معادلة انحفاظ الطاقة على سطح التحكم لنظام مفتوح

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\left(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in}\right) + \sum_{in} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) = \left(\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out}\right) + \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \quad (kW)$$

$$(0 + 0) + \sum_{in} \dot{m}\,(h) = (0 + 0) + \sum_{out} \dot{m}\,(h)$$

$$\sum_{in} \dot{m}\,(h) = \sum_{out} \dot{m}\,(h)$$

$$\dot{m}_3 * h_3 + \dot{m}_{a1} * h_1 = \dot{m}_4 * h_4 + \dot{m}_{a2} * h_2$$

$$\dot{m}_3 * h_3 = \dot{m}_a * (h_2 - h_1) + \left(\dot{m}_3 - \dot{m}_{makeup}\right)h_4$$

بالحل نجد أن

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_3 * (h_3 - h_4)}{(h_2 - h_1) - (\omega_2 - \omega_1) * h_4}$$

إنتالبي الماء في الحالة (3) و(4) تعطى من جداول الماء والبخار

$$\dot{m}_a = \frac{100\frac{kg}{s} * (146.64 - 92.28) kJ/kg}{\left[(100 - 42.2)\frac{kJ}{kg_{d.a.}}\right] - \left[(0.0273 - 0.0087)\ \frac{kg_v}{kg_{d.a.}} * 92.28\frac{kJ}{kg_v}\right]}$$

$$\dot{m}_a = 96.9\ \frac{kg_{d.a.}}{s}$$

التدفق الحجمي للهواء هو

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_a * v_1$$

$$\dot{V}_1 = 96.9\ \frac{kg_{d.a.}}{s} * 0.842\frac{m^3}{kg_{d.a.}} = 81.6\ \frac{m^3}{s}$$

تدفق مياه التعويض هي

$$\dot{m}_{makeup} = \dot{m}_a * (\omega_2 - \omega_1)$$

$$\dot{m}_{makeup} = 96.9\ \frac{kg_{d.a.}}{s} * (0.0273 - 0.0087)\frac{kg_v}{kg_{d.a.}} = 1.8\ \frac{kg_v}{s}$$

ملخص الفصل خليط غاز وبخار (هواء رطب).

- ضغط الهواء الرطب

$$P = P_{d.a.} + P_v \qquad (kPa)$$

- كثافة الهواء الرطب

$$\rho = \rho_v + \rho_{d.a.} \quad (kg/m^3)$$

- درجة حرارة الندى

$$T_{dew} = T_{sat\ (at\ P_v)}$$

$$P_v = P_{sat\ (at\ T_{dew})}$$

- الرطوبة النسبية

$$\varphi = \frac{m_v}{m_{v(sat)}} = \frac{\rho_v}{\rho_{v(sat)}} \cong \frac{P_v}{P_{v(sat)}}$$

$$\varphi = \frac{\omega * P}{(0.622 + \omega) * P_v}$$

- الرطوبة المطلقة

$$\omega = \frac{m_v}{m_{d.a.}} = \frac{\rho_v}{\rho_{d.a.}} \qquad \left(\frac{kg_v}{kg_{(d.a.)}}\right)$$

$$\omega = 0.622\ \frac{P_v}{P - P_v}$$

$$\omega = \frac{0.622 * \varphi * P_v}{P - \varphi * P_v}$$

- إنتالبي الهواء الرطب

$$h = h_{d.a.} + \omega * h_v$$

$$h_{d.a.} = c_{P_{d.a.}} * T \quad \left({}^{kJ}/_{kg_{d.a.}}\right)$$

$$h_v = h_o\ (0°\text{C}) + c_{v(P_0)} * T \qquad \left({}^{kJ}/_{kg_{d.a.}}\right)$$

$$h = T + \omega * (2501 + 1.84 * T) \quad \left({}^{kJ}/_{kg_{d.a.}}\right)$$

- المجففات.

في قسم التسخين

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m} * (h_{exit} - h_{in}) \quad (kW)$$

في قسم التجفيف

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{d.a.} * (\omega_{exit} - \omega_{in}) \quad (kg_v/s)$$

مسائل غير محلولة لفصل
خليط غاز وبخار (هواء رطب).

1. يحتوي خزان بحجم $(8m^3)$ على هواء مشبع بالشروط التالية $(30°C, 105\ kPa)$. حدد 1) كتلة الهواء الجاف 2) الرطوبة المطلقة و3) إنتالبي الهواء النوعية وتأكد من النتائج باستخدام كافة المخططات المتاحة لك.

2. يحتوي خزان على $(21\ kg)$ من الهواء الجاف $(0.3\ kg)$ من بخار ماء بالشروط التالية $(30°C, 100\ kPa)$. حدد 1) الرطوبة المطلقة 2) الرطوبة النسبية و3) حجم الخزان وتأكد من النتائج باستخدام كافة المخططات المتاحة لك.

3. تحتوي غرفة على هواء بالشروط $(70°F, 14.6\ psia)$ وبرطوبة نسبية 85%. حدد الضغط الجزئي للهواء الجاف 2) الرطوبة المطلقة و3) إنتالبي الهواء النوعية وتأكد من النتائج باستخدام كافة المخططات المتاحة لك.

4. يدخل هواء إلى قسم تسخين بالشروط التالية $(12°C, 95\ kPa, 30\%)$ وبتدفق $(6\ m^3/min)$ ويخرج بدرجة حرارة $(25°C)$. حدد 1) كمية الحرارة المضافة إلى الهواء و2) الرطوبة النسبية عند المخرج ومثل العملية على المخططات.

5. يسخن هواء بالشروط التالية $(15°C, 100\ kPa, 60\%)$ إلى درجة حرارة $(20°C)$ في قسم التسخين ثم يرطب بواسطة بخار ساخن. يخرج الهواء من قسم الترطيب بالشروط $(25°C, 65\%)$. حدد 1) كمية البخار المضاف إلى الهواء 2) كمية الحرارة المضافة في قسم التسخين ومثل العملية على المخططات.

6. يُسخن هواء مشبع رطب ذو الضغط النظامي $(1\ bar = 745\ mmHg)$ ودرجة الحرارة $[T = 30°C]$ إلى درجة حرارة $[T = 60°C]$ (المرحلة الأولى) ثم يُمرر الهواء على سطح مائي (المرحلة الثانية) فيتبخر جزء من الماء إلى الهواء وتصبح الرطوبة المطلقة للهواء $[\omega = 36\ (g_v/kg_{d.a})]$. ارسم جدولاً وإملأ فيه البارامترات التالية درجة الحرارة (°C)، الرطوبة النسبية (%)، ضغط بخار الماء (kPa)، الرطوبة المطلقة

($g_v/kg_{d.a.}$)، الإنتالبي ($kJ/kg_{d.a.}$) لكل مراحل الهواء. احسب كمية الحرارة النوعية في المرحلة الأولى. حدد ضغط ودرجة حرارة الإشباع لبخار الماء بعد عملية التبخر باستخدام المخطط فقط.

7. يتدفق ($4\ kg$) من الهواء الرطب ذي الضغط ($1\ bar = 745\ mmHg$) ودرجة الحرارة [$T = 45℃$] والرطوبة النسبية (50%) ضمن جهاز تكييف هواء على ثلاث مراحل. يمر الهواء في المرحلة الأولى على وشيعة تبريد فتنخفض درجة حرارة الهواء إلى [$T = 20℃$] ورطوبته المطلقة إلى [$\omega = 12\ (g_v/kg_{d.a})$] ثم يجفف في المرحلة الثانية إلى أن تصل رطوبته المطلقة إلى [$\omega = 4.1\ (g_v/kg_{d.a})$] ثم يبرد في المرحلة الثالثة إلى أن تصل درجة حرارته إلى [$T = 15℃$] ليضخ مباشرة إلى الغرف. احسب كمية الحرارة المزالة من الهواء (تساوي استطاعة وشيعة التبريد) في المرحلة الأولى بالكيلوجول وكمية الماء المتكاثف بالكيلوغرام خلال هذه العملية. الرطوبة النسبية بعد التجفيف في المرحلة الثانية. حدد بارامترات الخروج للمرحلة الثالثة من رطوبة مطلقة ونسبية وإنتالبي وضغط جزئي للبخار. ارسم المراحل الثلاث على مخطط رامزين محدداً نقاط دخول كل مرحلة وخروجها.

8. يدخل ($1\ kg$) من الهواء الرطب ذي الضغط ($1\ bar = 745\ mmHg$) ودرجة الحرارة [$T = 25℃$] والرطوبة النسبية (50%) ضمن جهاز تجفيف فواكه يتألف من مرحلتين. في المرحلة الأولى يسخن الهواء بعملية محسوسة إلى أن تصبح رطوبته (5%) ثم يمرر على الفاكهة لتجفيفها فتنخفض كمية الماء في الفواكه بمقدار 10 غرامات. حدد كمية الحرارة المقدمة في المرحلة الأولى وبارامترات خروج الهواء من الجهاز ومثل العملية على مخطط الهواء الرطب.

الفصل الثامن

Chapter Eight

ترموديناميك الاحتراق

Combustion Thermodynamics

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
$\bar{g}^o$	تابع جبس بالنسبة للشروط النظامية	$kJ/kmol$
$\bar{g}_f^o$	تابع جبس للتشكل القياسي بالنسبة للشروط النظامية	$kJ/kmol$
$\bar{g}_{f,r}^o$	تابع جبس للتشكل القياسي بالنسبة للشروط النظامية للنواتج	$kJ/kmol$
$\bar{g}_{f,P}^o$	تابع جبس للتشكل القياسي بالنسبة للشروط النظامية للمواد المتفاعلة	$kJ/kmol$
$\bar{g}_{out}$	تابع جبس بالنسبة للشروط الخارجية	$kJ/kmol$
$\bar{g}_{out,r}$	تابع جبس بالنسبة للشروط الخارجية للنواتج	$kJ/kmol$
$\bar{g}_{out,P}$	تابع جبس بالنسبة للشروط الخارجية للمواد المتفاعلة	$kJ/kmol$
$\bar{g}_{T_{out}}$	تابع جبس بالنسبة لدرجة حرارة الوسط الخارجي	$kJ/kmol$
$\bar{H}_{prod}$	إنتالبي النواتج بالنسبة إلى واحدة المولات	$kJ/kmol$
$\bar{H}_{react}$	إنتالبي المواد المتفاعلة بالنسبة إلى واحدة المولات	$kJ/kmol$
$\bar{h}$	إنتالبي بالنسبة إلى واحدة المولات	$kJ/kmol$
$\bar{h}_f^o$	إنتالبي التشكل القياسي	$kJ/kmol$
$\bar{h}^o$	إنتالبي بلنسبة إلى الشروط النظامية	$kJ/kmol$
h_i	إنتالبي العنصر	kJ/kg
$\bar{h}_i$	إنتالبي العنصر بالنسبة إلى واحدة المولات	$kJ/kmol$
$\bar{h}_c$	إنتالبي الاحتراق	$kJ/kmol$
$\bar{h}_r$	إنتالبي التفاعل	$kJ/kmol$

$\bar{h}_{prod}, \bar{h}_P$	إنتالبي النواتج	$kJ/kmol$
$\bar{h}_{react}, \bar{h}_r$	إنتالبي المواد المتفاعلة	$kJ/kmol$
Δh_f^o	التغيير في إنتالبي التشكل القياسي بالنسبة إلى الشروط النظامية	$kJ/kmol$
$\Delta h_{s,i}$	التغيير في الإنتالبي المحسوس	$kJ/kmol$
m_{air}	كتلة الهواء	kg
m_{fuel}	كتلة الوقود	kg
N_{air}	عدد مولات الهواء	$kmol$
N_{fuel}	عدد مولات الوقود	$kmol$
N_r	عدد مولات النواتج	$kmol$
N_P	عدد مولات المواد المتفاعلة	$kmol$
$\dot{n}_r$	تدفق مولي للمواد المتفاعلة	$kmol/s$
$\dot{n}_P$	تجفق مولي للنواتج	$kmol/s$
P	الضغط	kPa أو bar
P_m	ضغط الخليط	bar أو kPa
P_i	ضغط العنصر ضمن الخليط	bar أو kPa
$\bar{\dot{Q}}_{in}$	معدل تدفق دخول كمية الحرارة لواحدة المول	$kW/kmol$
$\bar{\dot{Q}}_{out}$	معدل تدفق خروج كمية الحرارة لواحدة المول	$kW/kmol$
$\bar{Q}_{in}$	كمية الحرارة المقدمة بالنسبة إلى واحدة المولات	$kJ/kmol$
$\bar{Q}_{out}$	كمية الحرارة المزالة بالنسبة إلى واحدة المولات	$kJ/kmol$
R_u	ثابت الغازات العام	$J/kg\ K$
$\bar{R}_u$	ثابت الغازات العام	$J/kmol\ K$
S_m	إنتروبي الخليط	J/K
s	الإنتروبي النوعية	$J/kg\ K$

s_i	إنتروبي العنصر النوعية	$J/kg\ K$
$\bar{s}_i$	إنتروبي العنصر بالنسبة إلى واحدة المولات	$J/kmol\ K$
$\bar{s}_i^o$	إنتروبي العنصر بالشروط النظامية	$J/kmol\ K$
s_{gen}	إنتروبي التوليد	$J/kg\ K$
S_{prod}	إنتروبي النواتج	$J/kg\ K$
S_{react}	إنتروبي المواد المتفاعلة	$J/kg\ K$
T	درجة الحرارة	K أو ℃
T_{out}	درجة الوسط الخارجي	K أو ℃
$\overline{U}_{prod}$	الطاقة الداخلية للنواتج	$J/kmol$
$\overline{U}_{react}$	الطاقة الداخلية للمواد المتفاعلة	$J/kmol$
v	الحجم النوعي	m^3/kg
y_i	الكسر المولي	لا بعدي
μ_{air}	الكتلة المولية للهواء	$kg/kmol$
μ_{fuel}	الكتلة المولية للوقود	$kg/kmol$

مقدمة الفصل.

تعرفنا في الفصول الماضية على العمليات التي تحدث على الأنظمة غير المتفاعلة بحيث يبقى فيها التركيب الكيميائي ثابتاً من دون أي تغيير حتى عمليات الخلط أو المزج التي درست سابقاً كانت تحتوي على وسائط متجانسة مثل الماء وبخار الماء ولايحدث فيها أي تفاعل كيميائي عند حدوث عملية الخلط. في هذا الفصل سوف نتعرف على الأنظمة التي يتغير فيها التركيب الكيميائي للمادة خلال عملية معينة.

في الأنظمة غير المتفاعلة نهتم بالطاقة الداخلية المحسوسة *Sensible Internal Energy* والتي تتغير مع تغيير درجة الحرارة والضغط أما عندما نتعامل مع الأنظمة المتفاعلة فإننا نقوم بالاهتمام بالطاقة الداخلية الكامنة *Latent Internal Energy* والتي تتغير مع تغير الأطوار. وسنهتم أيضاً بالطاقة الداخلية الكيميائية *Chemical Internal Energy* والتي تتولد نتيجة تفكك أو ارتباط الجزئيات بعضها مع بعض. كما سندرس بالتفصيل عملية الاحتراق *Combustion* والعلاقات الترموديناميكية المرافق لهذه العملية. وكذلك أنواع الاحتراق والوقود ونطبق قانون انحفاظ الكتلة والطاقة على الأنظمة المتفاعلة ودرجة حرارة موجة اللهب الأدياباتية *Adiabatic Flame Temperature* والتي تعرف إلى أنها أكبر درجة حرارة يمكن أن يصل إليها خليط متفاعل. سندرس أخيراً القانون الثاني في الترموديناميك للأنظمة المتفاعلة.

<u>الفوائد العلمية من الفصل</u>

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ التعرف على أنواع الوقود وأشكال الاحتراق.
- ✓ تطبيق قانون انحفاظ الكتلة على الأنظمة المتفاعلة لتحديد التوازن في هذه الأنظمة.
- ✓ تحديد بارامترات عمليات الاحتراق مثل نسبة الهواء إلى الوقود و النسبة النظرية ودرجة حرارة الندى.

- ✓ تطبيق القانون الأول في الترموديناميك على الأنظمة المتفاعلة.
- ✓ إيجاد إنتالبي التفاعل وإنتالبي الاحتراق والقيمة الحرارية للوقود.
- ✓ تحديد أكبر درجة حرارة لموجة اللهب.
- ✓ تقييم الإنتروبي في الأنظمة المتفاعلة.
- ✓ تحليل القانون الثاني في الترموديناميك على هذه الأنظمة.

محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.8	تعريف الاحتراق.	558
2.8	أشكال الاحتراق وأنواع اللهب.	558
3.8	عمليات الاحتراق النظرية والحقيقية.	563
4.8	إنتالبي التشكل القياسي لمزيج.	579
5.8	إنتالبي الاحتراق.	583
6.8	القانون الأول في الترموديناميك في الأنظمة المتفاعلة.	585
1.6.8	القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة.	586
2.6.8	القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المغلقة.	587
7.8	درجة حرارة الاحتراق الأدياباتية.	593
8.8	التغيير في إنتروبي الأنظمة المتفاعلة.	597
9.8	تحليل القانون الثاني والإكسرجي للأنظمة المتفاعلة.	598
	ملخص الفصل.	605
	مسائل غير محلولة.	608
	نهاية الفصل.	608

1.8 تعريف الاحتراق.

يعرف الاحتراق إلى أنه



عمليات الأكسدة هي تفاعلات كيميائية بين مجموعة من الوسائط. تحدث عمليات الأكسدة وبشكل أساسي بوجود عنصر الأوكسجين في المواد المتفاعلة. تؤدي التفاعلات الكيميائية إلى تفكيك الروابط الكيميائية لعناصر خليط الاحتراق وتحويل هذه الطاقة إلى طاقة حرارية مفيدة.

2.8 أشكال الاحتراق وأنواع اللهب.

المادة التي يمكن أن تحترق وتعطي كمية من الطاقة الحرارية تسمى بالوقود *Fuel*. تحتوي أغلب أنواع الوقود على عنصر الهيدروجين وعنصر الكربون ويسمى هذا النوع من الوقود بالوقود الهيدروكربوني *Hydrocarbon Fuels*. الصيغة الكيميائية للوقود الهيدروكربوني هي (C_nH_m). يوجد الوقود الهيدروكربوني بعدة أطوار الصلبة مثل الفحم الحجري *Coal* والسائلة مثل غازولين (البنزين) *Gasoline* والغازية مثل الغاز الطبيعي *Natural Gas*. يتكون الوقود بأشكاله من مجموعة من المركبات الهيدروكربونية المختلفة ولكننا نعد هذا الوقود مؤلفاً من مركب واحد فقط للسهولة أو عندما يكون ذاك المركب يؤلف نسبة كتلية كبيرة من هذا الوقود فمثلاً يمكن اعتبار الغاز الطبيعي على أنه مركب واحد يسمى الميتان *Methane* وصيغته (CH_4) لأن الميتان يشكل 95% من كتلة الغاز الطبيعي ويمكن اعتبار الكحول الميتيلي *Methyl Alcohol*، الوقود الأكثر شهرة، بأنه مركب واحد يسمى الميتانول *Methanol* وصيغته (CH_3OH) ويمكن اعتبار الديزل بأنه مركب واحد يسمى الدوديكان *Dodecane* وصيغته $(C_{12}H_{26})$ ويمكن اعتبار البنزين بأنه

مركب واحده يسمى الأوكتان *Octane* وصيغته (C_8H_{18}). كي تحدث عملية الاحتراق يجب أن ترتفع درجة حرارة الوقود إلى درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الاشتعال *Ignition Temperature* فمثلاً درجة حرارة اشتعال البنزين في ظروف طبيعية هي (260°C) ودرجة حررة اشتعال الكربون هي (400°C) ودرجة حرارة اشتعال الهيدوجين هي (580°C) ودرجة حرارة اشتعال أول أوكسيد الكربون هي (610°C) ودرجة حرارة اشتعال الميتان هي (630°C). لتتم عملية الاحتراق *Combustion* يجب أن تكون نسبة المواد المؤكسدة (الأوكسجين أو الهواء مثلاً) إلى الوقود المستخدم مناسبة وصحيحة فمثلاً لايمكن أن يحترق الغاز الطبيعي (وقود) في الهواء بنسبة **أقل** من 5% و**أكثر** من 15%.

يستعمل الهواء في أغلب الأحيان كمادة مؤكسدة *Oxidizer*. يتألف الهواء نظرياً من 21 بالمئة من الأوكسجين و79 بالمئة من النتروجين أي يترافق مع كل مول واحد من الأوكسجين يدخل إلى غرفة الاحتراق 3.76 مول من النتروجين ($0.79/0.21 = 3.76$). تعطى الكتلة المولية للهواء المستخدم في عمليات الاحتراق بالعلاقة

$$1\ kmol\ O_2 + 3.76\ kmol\ N_2 = 4.76\ kmol\ air \qquad (1\text{-}8)$$

من أجل معرفة كمية الهواء اللازمة لإتمام عملية الاحتراق نستخدم نسبة معينة وتسمى نسبة الهواء إلى الوقود *Air –Fuel Ratio* وتعطى بالعلاقة

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \qquad (2\text{-}8)$$

المثال التطبيقي 8-1 – توازن معادلة الاحتراق.

يحترق واحد مول من الأوكتان (C_8H_{18}) مع هواء مؤلف من ($20\ kmol$) من الأوكسجين وينتج غاز ثاني أوكسيد الكربون والماء والأوكسجين والنتروجين بحسب العلاقة

$$C_8H_{18} + 20(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + yH_2O + zO_2 + w\,N_2$$

حدد عدد مولات كل عنصر ونسبة الهواء إلى الوقود في عملية الاحتراق.

الفرضيات: نواتج الاحتراق معطاة.

التحليل: معادلة الاحتراق

$$C_8H_{18} + 20(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + yH_2O + zO_2 + w\,N_2$$

لإيجاد ثوابت توازن المعادلة نقوم على موازنة المعادلة بإيجاد عدد الذرات كل عنصر

عدد ذرات الكربون هي

$$x = 8$$

عدد ذرات الهيدروجين

$$18 = 2y \rightarrow y = 9$$

عدد ذرات الأوكسجين

$$2 * 20 = 2x + y + 2z$$

$$z = 7.5$$

عدد ذرات النتروجين

$$3.76 * 20 = w$$

$$w = 75.2$$

وبالتالي تتحول المعادلة إلى الشكل

$$C_8H_{18} + 20(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O + 7.5O_2 + 75.2\,N_2$$

ملاحظة العدد 20 هو عدد ذرات الأوكسجين وليس عدد ذرات الهواء. تحسب عدد ذرات الهواء (الكتلة المولية للهواء) من العلاقة

$$1\ kmol\ O_2 + 3.76\ kmol\ N_2 = 4.76\ kmol\ air$$

$$20 * 1\ kmol\ O_2 + 20 * 3.76\ kmol\ N_2 = 95.2\ kmol\ air$$

نسبة الهواء إلى الوقود هي

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{(N * \mu)_{air}}{(N * \mu)_c + (N * \mu)_{H_2}}$$

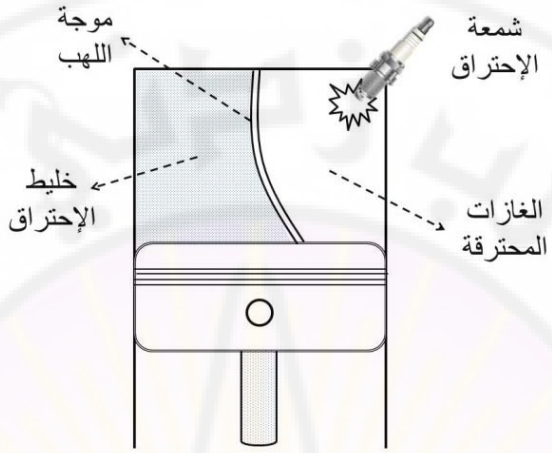
$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{\left(95.2\ kmol * 29\frac{kg}{kmol}\right)_{air}}{\left(8kmol * 12\frac{kg}{kmol}\right)_c + \left(9\ kmol * 2\frac{kg}{kmol}\right)_{H_2}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = 24.2\frac{kg_{air}}{kg_{fuel}}$$

مناقشة:

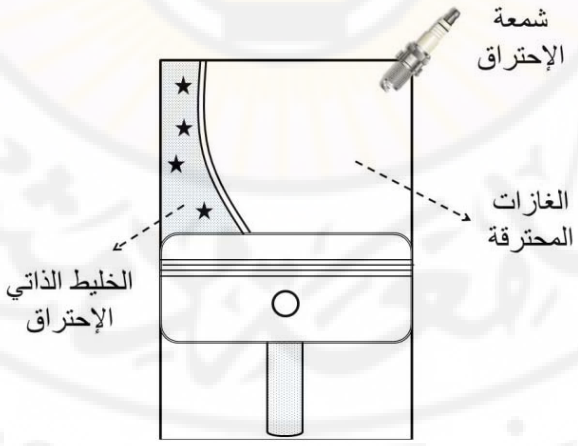
لكي تتم عملية الاحتراق السابقة نحتاج إلى 24.2 كيلوغرام من الهواء الخارجي لإحراق واحد كيلوغرام الوقود بحسب نسبة الهواء إلى الوقود.

يظهر الاحتراق في غرفة الاحتراق إما بلهب *Flame* كما في الشكل (1−8) أو من دون لهب *Nonflame* كما في الشكل (2−8). نشاهد في الشكل (1−8) وجود منطقة صغيرة جداً يبدأ فيها احتراق المزيج وتتحرك هذه المنطقة عبر خليط الاحتراق بسرعة معينة حيث تكون فيها التفاعلات الكيميائية عنيفة جداً. تسمى هذه المنطقة المنتشرة بموجة الاحتراق *Flame Wave*.



الشكل (1-8) عملية الاحتراق مع وجود موجة لهب.

ينتج عن حركة هذه الموجة عبر خليط الاحتراق مزيج من المواد المحترقة ذات درجة حرارة عالية وضغط مرتفع تسمى خليط الغازات المحترقة. عندما تتم عملية الأكسدة (الاحتراق) في مواقع كثيرة من خليط الاحتراق كما هو ظاهر في الشكل (2-8) فيسمى الاحتراق بالاحتراق الذاتي *Autoignition*.



الشكل (2-8) عملية الاحتراق الذاتي من دون موجة لهب.

في بعض الأحيان يؤدي الاحتراق الذاتي إلى ظاهرة الطرق *Knocking* وهي عبارة عن سماع صوت طرق ضمن غرفة الاحتراق. هذه الظاهرة غير مرغوب فيها في محركات الاشتعال بالشمعة *Spark-Ignition Engines* أو محركات الاحتراق الداخلي لأنها تعمل على تخفيض مردود المحرك لذلك يعمل المصممون على التخفيف من هذه الظاهرة في محركات الاحتراق الداخلي بإضافة مواد تمنع حدوث هذه الظاهرة. تستعمل ظاهرة الاشتعال الذاتي في محركات الديزل أو مايسمى محركات الاشتعال بالضغط *Compression-Ignition Engines*.

تنقسم موجات اللهب إلى موجة لهب ذات الخلط المبكر *Premixed Flames* وموجة اللهب غير المخلوطة *Nonpremixed Flame* والتي تسمى أيضاً موجة الإنتشار *Diffusion Flame*. في موجة الخلط المبكر يتم مزج الوقود والمأكسد على المستوى الجزئي قبل حدوث عملية الاحتراق كما في محركات الاشتعال بالشمعة بينما في موجة اللهب غير المخلوطة يتم خلط الوقود في لحظة الاحتراق فقط كما في عملية احتراق الشمعة *Candle* المنزلية.

3.8 عمليات الاحتراق النظرية والحقيقية.

من أجل دراسة عملية الاحتراق يجب أن نعد أن عملية الاحتراق كاملة *Complete*. تكون عملية الاحتراق كاملة عندما تتحول كل ذرات الكربون الموجودة في الوقود إلى غاز ثاني أوكسيد الكربون وكل ذرات الأوكسجين إلى ماء وذرات الكبريت إن وجدت إلى ثاني أوكسيد الكبريت. تتحقق عملية الاحتراق الكامل بالتحكم بثلاثة عناصر مهمة

1. درجة حرارة مناسبة لاشتعال الخليط
2. خلط لحظي وإعصاري للوقود والأكسجين (المادة المأكسدة).
3. زمن كاف لإتمام عملية الاحتراق.

تسمى أقل كمية ممكنة من الهواء (المواد المؤكسدة) تستخدم لإتمام عملية احتراق الوقود بالستوكيومتري *Stoichiometric* أو الهواء النظري *Theoretical Air*. لا يمكن أن يوجد الأوكسجين في النواتج (غازات الاحتراق) عندما يحترق الوقود وبشكل كامل مع **الهواء النظري**. تعطى معادلة الاحتراق الكامل بالشكل

$$Reactants \rightarrow Products$$

$$fuel + Air \rightarrow Burned\ Gases$$

أي أن

$$C_nH_m + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow nCO_2 + \left(\frac{m}{2}\right)H_2O + 3.76a\ N_2 \qquad (3\text{-}8)$$

حيث أن قيمة الثابت (a) بدلالة عدد ذرات الهيدروجين والكربون من العلاقة

$$a = n + \frac{m}{4}$$

حيث أن (n) عدد ذرات الركبون و(m) عدد ذرات الهيدروجين. إذا تم استخدام كمية من الهواء **أكبر** من كمية الهوء النظري فيسمى الوقود بالوقود النظيف *Fuel Lean* أو اختصاراً *Lean* وعندما يتم استخدام كمية من الهواء **أقل** من كمية الهواء النظري فيسمى الوقود بالوقود الغني *Fuel Rich* أو اختصاراً *Rich*. يمكن تحديد ستوكيومتريك نسبة الهواء النظري إلى الوقود *Stoichiometric Air-Fuel Ratio* بالمعادلة

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}}\right)_{stoic}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = \frac{N_{air} * \mu_{air}}{N_{fuel} * \mu_{fuel}}$$

عدد مولات الهواء النظري هي

$$N_{air} = N_{O_2} + 3.76N_{N_2}$$

$$N_{air} = a(1 + 3.76) = 4.76\ a$$

$$N_{fuel} = 1$$

بالتعويض نجد

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}}\right)_{stoic} = 4.76\ a * \frac{\mu_{air}}{\mu_{fuel}} \qquad (4\text{-}8)$$

حيث (μ_{air}, μ_{fuel}) الوزن الذري (الكتلة المولية) لكل من الهواء والوقود بالكيلوغرام لكل كيلومول وقود. النسبة التي تحدد إذا كان الخليط نظيفاً أو غنياً أو ستوكيومتريكياً تسمى بالنسبة المكافئة *Equivalence Ratio* وتعطى بالمعادلة

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic}}{\left(\frac{A}{F}\right)} \qquad (5\text{-}8)$$

عندما تكون $(\Phi > 1)$ يكون الخليط غنياً وإذا كانت $(\Phi < 1)$ كان الخليط نظيفاً وإذا كانت $(\Phi = 1)$ يكون ستوكيومتريكياً. يمكن تحديد نسبة الهواء الزائدة *Percent Excess Air* بالعلاقة

$$\%\ excess\ air = \frac{1 - \Phi}{\Phi} * 100\% \qquad (6\text{-}8)$$

المثال التطبيقي 8-2 – النسبة الستوكيومترية.

محرك عنفي غازي صغير يعمل بحمل كامل مقداره $(3950\ kW)$ وبنسبة مكافئة قدرها 0.286 وتدفق $(15.9\ kg/s)$ من الهواء. الوقود المستخدم في هذا المحرك العنفي الغازي هو غاز طبيعي ذو الشكل $(C_{1.16}H_{4.32})$. حدد كمية الوقود المستخدم مع الهواء والنسبة الستوكيومترية.

الفرضيات: هواء نظري.

التحليل: نجد من النسبة المكافئة المعطاة في المسألة أن الخليط المستخدم هو خليط نظيف لأن ($\Phi = 0.286 < 1$). تحسب النسبة الستوكيومترية من العلاقة

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}}\right)_{stoic} = 4.76\ a * \frac{\mu_{air}}{\mu_{fuel}}$$

الوزن الذري لكل من الهواء والوقود هو

$$\mu_{air} = 28.85\ \frac{kg_{air}}{kmol}$$

$$\mu_{fuel} = \mu_{(C_nH_m)} = \mu_{(C_{1.16}H_{4.32})}$$

$$\mu_{fuel} = 1.16 * 12.01\frac{kg_{fuel}}{kmol} + 4.32 * 1.008\frac{kg_{fuel}}{kmol}$$

$$\mu_{fuel} = 18.286\ \frac{kg_{fuel}}{kmol}$$

$$a = n + \frac{m}{4}$$

$$a = 1.16 + \left(\frac{4.32}{4}\right) = 2.24$$

بالتعويض في النسبة الستوكيومترية نجد أن

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = (4.76 * 2.24) * \left(\frac{28.85\ \frac{kg_{air}}{kmol}}{18.286\ \frac{kg_{fuel}}{kmol}}\right)$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = 16.82\ \frac{kg_{air}}{kg_{fuel}}$$

النسبة الستوكيومترية تقول أننا بحاجة إلى 16.82 كيلوغرام من الهواء إلى واحد كيلوغرام من الوقود $(C_{1.16}H_{4.32})$ لإتمام عملية الاحتراق. من علاقة النسبة المكافئة نجد نسبة الهواء إلى الوقود الحقيقية

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic}}{\left(\frac{A}{F}\right)}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic}}{\Phi}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{16.82}{0.286} = 58.8$$

أي أننا نستهلك في عملية الاحتراق الفعلية 58.8 كيلوغرام من الهواء إلى واحد كيلوغرام من الوقود $(C_{1.16}H_{4.32})$ بدلالة من 16.8 كيلوغرام من الهواء أي أن الوقود نظيف كما سبق وشاهدنا. يمكن التعبير أيضاً عن نسبة الهواء إلى الوقود بالشكل

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}}$$

$$\dot{m}_{fuel} = 58.8 * 15.9\ kg/s$$

$$\dot{m}_{fuel} = 0.270\ kg/s$$

مناقشة: نلاحظ أن كمية الهواء المستهلكة في المحرك كبيرة ويمكن إيجادها من علاقة الهواء الزائد

$$\%\ excess\ air = \frac{1-\Phi}{\Phi} * 100\%$$

$$\%\ excess\ air = \frac{1-0.286}{0.286} * 100\%$$

$$\%\ excess\ air = 249.65\ \%$$

المثال التطبيقي 8-3 – احتراق في مرجل صناعي.

غاز طبيعي يحترق في مرجل صناعي. عند تحليل نواتج الاحتراق نلاحظ وجود كمية من الأوكسجين في غازات الاحتراق وبنسبة تركيز 3% مول للأوكسجين. حدد النسبة الستوكيومترية والنسبة المكافئة بفرض أن الغاز هو ميتان.

التحليل: الوقود ذو الصيغة $(C_nH_m = CH_4)$ أي أن $(n = 1, m = 4)$ ومعادلة احتراق الميتان هي

$$CH_4 + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 3.76a\ N_2 + bO_2$$

ظهور الأوكسجين في غازات الاحتراق هو من معطيات المسألة، ومن توازن الأوكسجين (O_2) نجد أن

$$a = 1 + 1 + b \rightarrow a = 2 + b$$

$$b = a - 2$$

ولكن الكسر المولي للأوكسجين هو

$$y_{O_2} = \frac{N_{O_2}}{N_{mix}}$$

$$y_{O_2} = \frac{b}{1 + (a + 3.76a)}$$

$$y_{O_2} = \frac{a - 2}{1 + 4.76a}$$

بالتعويض نجد أن الثابت (a) في الاحتراق الحقيقي هي

$$0.03 = \frac{a - 2}{1 + 4.76a}$$

$$a = 2.368$$

النسبة الستوكيومترية هي عندما يكون لاوجود للأوكسجين في غازات الاحتراق أي $a = 2$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}}\right)_{stoic} = 4.76\ a * \frac{\mu_{air}}{\mu_{fuel}}$$

$$\mu_{fuel} = \mu_{(C_nH_m)} = \mu_{(CH_4)}$$

$$\mu_{fuel} = 1 * 12.01 \frac{kg_{fuel}}{kmol} + 4 * 1.008 \frac{kg_{fuel}}{kmol}$$

$$\mu_{fuel} = 16.04 \frac{kg_{fuel}}{kmol}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = (4.76 * 2) * \left(\frac{28.85\ \frac{kg_{air}}{kmol}}{16.04\ \frac{kg_{fuel}}{kmol}}\right)$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = 17.1 \frac{kg_{air}}{kg_{fuel}}$$

النسبة الستوكيومترية تقول أننا بحاجة إلى 17.1 كيلوغرام من الهواء إلى واحد كيلوغرام من الوقود (CH_4) لإتمام عملية الاحتراق. أما النسبة المكافئة هي

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic}}{\left(\frac{A}{F}\right)}$$

النسبة الحقيقية بين الوقود والهواء هي

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{N_{air}}{N_{fuel}} * \frac{\mu_{air}}{\mu_{fuel}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = 4.76\ a * \frac{\mu_{air}}{\mu_{fuel}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = 4.76 * 2.368 * \left(\frac{28.85\ \frac{kg_{air}}{kmol}}{16.04\ \frac{kg_{fuel}}{kmol}}\right)$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = 20.3 \frac{kg_{air}}{kg_{fuel}}$$

بالتعويض في علاقة النسبة المكافئة نجد أن

$$\Phi = 0.84$$

أي أن الخليط نظيف بحسب تعريف النسبة المكافئة.

المثال التطبيقي 8-4 – احتراق في مرجل صناعي.

يفحص فحم حجري كتلياً بواسط جهاز فنجد أن الوقود الحجري يتألف من 84.36% كربون و1.89% هيدروجين و4.4% أوكسجين و0.63% نتروجين و0.89% كبريت و7.83% رماد غير قابل للاحتراق. بفرض أننا أحرقنا هذا الفحم الحجري بكمية نظرية من الهواء حدد الكسر المولي للنواتج والتي هي غاز ثاني أوكسيد الكربون والماء وثاني أوكسيد الكبريت والنتروجين والكتلة المولية للنواتج ونسبة الهواء إلى الوقود (النسبة الستوكيومترية).

الفرضيات: الاحتراق ستوكيومتري أي كامل و نواتج الاحتراق غازات مثالية.

التحليل: لأن صيغة الوقود غير موجودة والاحتراق كامل فنكتب معادلة الاحتراق بالشكل التالي

$$(N_c)C + (N_{H_2})H_2 + (N_{O_2})O_2 + (N_{N_2})N_2 + (N_S)S + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + yH_2O + zSO_2 + wN_2$$

نلاحظ من نص المسألة أن الكتلة المولية للوقود هي

$$\mu_{fuel} = (84.36 + 1.89 + 4.4 + 0.63 + 0.89 + 7.83)\ kg$$

$$\mu_{fuel} = 100\ kg$$

عدد مولات مكونات الوقود الفحم الحجري هي

$$N_c = \frac{m_c}{\mu_c} = \frac{84.36\ kg}{12\ kg/kmol} = 7.030\ kmol$$

$$N_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{\mu_{H_2}} = \frac{1.89\ kg}{2\ kg/kmol} = 0.945\ kmol$$

$$N_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}} = \frac{4.4\ kg}{32\ kg/kmol} = 0.1375\ kmol$$

$$N_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{\mu_{N_2}} = \frac{0.63\ kg}{28\ kg/kmol} = 0.0225\ kmol$$

$$N_S = \frac{m_S}{\mu_S} = \frac{0.89\ kg}{32\ kg/kmol} = 0.0278\ kmol$$

كتلة الرماد تبقى كما هي وتخرج بنفس الكتلة. بالتعويض في معادلة الاحتراق نجد أن

$$7.03C + 0.945H_2 + 0.1375O_2 + 0.0225N_2 + 0.0278S + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + yH_2O + zSO_2 + wN_2$$

بإجراء التوازن على معادلة الاحتراق نجد أن

عدد ذرات الكربون	$x = 7.03$
عدد ذرات الهيدروجين	$y = 0.945$
عدد ذرات الكبريت	$z = 0.0278$
عدد ذرات الأوكسجين	$0.1375 + a = x + 0.5y + z \rightarrow a = 7.393$
عدد ذرات النتروجين	$w = 0.0225 + 3.76a = 27.82$

وتصبح المعادلة كالتالي

$$7.03C + 0.945H_2 + 0.1375O_2 + 0.0225N_2 + 0.0278S + 7.393(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 7.030CO_2 + 0.945H_2O + 0.0278SO_2 + 27.82N_2$$

عدد مولات النواتج هي

$$N_{prod} = 7.03 + 0.945 + 0.0278 + 27.82 = 35.82\ kmol$$

الكسر المولي لكل عنصر من عناصر النواتج هي

$$y_{co_2} = \frac{N_{CO_2}}{N_{prod}} = \frac{7.03}{35.82} = 0.1963$$

$$y_{H_2O} = \frac{N_{H_2O}}{N_{prod}} = \frac{0.945}{35.82} = 0.02638$$

$$y_{SO_2} = \frac{N_{SO_2}}{N_{prod}} = \frac{0.0278}{35.82} = 0.000776$$

$$y_{N_2} = \frac{N_{N_2}}{N_{prod}} = \frac{27.82}{35.82} = 0.7767$$

الكتلة المولية للنواتج هي

$$\mu_{Prod} = \frac{m_{prod}}{N_{prod}}$$

$$\mu_{Prod} = \frac{(7.03 * 44 + 0.945 * 18 + 0.0278 * 64 + 27.82 * 28)kg}{35.82\ kmol}$$

$$\mu_{Prod} = 30.9\ kg/kmol$$

نسبة الهواء إلى الوقود هي

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}}\right)_{stoic} = 4.76\ a * \frac{\mu_{air}}{\mu_{fuel}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = 4.76 * 7.393 * \frac{29\ kg_{air}/kmol}{100\ kg_{fuel}/kmol}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = 10.2\,\frac{kg_{air}}{kg_{fuel}}$$

المثال التطبيقي 8–4 – احتراق غاز طبيعي مع هواء رطب.

ينتج عن فحص غاز طبيعي أنه يتألف من 72% من غاز الميتان و9% من غاز الهيدروجين و2% من غتز الأوكسجين و14% من غاز النتروجين و0.89% من غاز الكبريت و3% من غاز ثاني أوكسيد الكربون. بفرض أننا أحرقنا هذا الغاز بشكل ستوكيومتريك (احتراق كامل) مع الهواء ذي الضغط النظامي ودرجة حرارة الهواء (20°C) ونسبة الرطوبة فيه 80%. حدد درجة حرارة الندى في النواتج.

الفرضيات: الاحتراق ستوكيومتري أي كامل و نواتج الاحتراق غازات مثالية.

التحليل: بما أن الرطوبة لاتتفاعل مع أي عنصر من العناصر المتفاعلة أو النواتج فإنها تضاف إلى كمية المياه الخارجة مع النواتج. سنتعامل مع الهواء على أنه جاف ثم نقوم بإضافة الرطوبة لاحقاً. صيغة الاحتراق هي

$$(N_{CH_4})CH_4 + (N_{H_2})H_2 + (N_{O_2})O_2 + (N_{N_2})N_2 + (N_{CO_2})CO_2 + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + yH_2O + wN_2$$

من أجل واحد مول من الوقود نأخذ عدد المولات من نتائج القياس فنجد أن

$$0.72CH_4 + 0.09H_2 + 0.02O_2 + 0.14N_2 + 0.03CO_2 + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + yH_2O + wN_2$$

نجد ثوابت المعادلة من توازن عدد الذرات فنجد أن

عدد ذرات الكربون	$x = 0.03 + 0.72 = 0.75$
عدد ذرات الهيدروجين	$2y = 0.72 * 4 + 0.09 * 2 \rightarrow y = 1.53$
عدد ذرات الأوكسجين	$0.02 + 0.03 + a = x + 0.5y \rightarrow a = 1.465$
عدد ذرات النتروجين	$w = 0.14 + 3.76a \rightarrow w = 5.648$

عدد المولات الهواء الجاف في الهواء هي

$$N_{air} = 4.76 * a$$

$$N_{air} = 4.76 * 1.465\ kmol_{d.a.}$$

$$N_{air} = 6.97\ kmol_{d.a.}$$

الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء يحسب من العلاقة

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{v,sat}}$$

من مواصفات الهواء الرطب نجد أن ضغط الإشباع لبخار الماء عند درجة حرارة الهواء (20°C) من جداول الإشباع بدلالة درجة الحرارة هو

$$P_{vsat@20°C} = 2.3392\ kPa$$

بالتعويض نجد أن

$$P_v = 0.8 * 2.3392\ kPa = 1.871\ kPa$$

بفرض أن الهواء غاز مثالي فيمكن إيجاد عدد المولات في الماء في نسبة الرطوبة من معادلة الغاز المثالي كما يلي

$$Pv = NR_uT$$

$$\frac{P_v}{P_{Total}} = \frac{N_{v,air}}{N_{Total}}$$

$$N_{v,air} = \frac{P_v}{P_{Total}} * N_{Total}$$

$$N_{v,air} = \frac{1.871\ kPa}{101.325\ kPa} * (6.97 + N_{v,air})$$

$$N_{v,air} = 0.131\ kmol$$

نضيف الماء الآن على طرفي المعادلة فتتحول المعادلة إلى

$$0.72CH_4 + 0.09H_2 + 0.02O_2 + 0.14N_2 + 0.03CO_2 + 1.465(O_2 + 3.76N_2) + [0.131H_2O] \rightarrow 0.75CO_2 + (1.53 + 0.131)H_2O + 5.648N_2$$

أي

$$0.72CH_4 + 0.09H_2 + 0.02O_2 + 0.14N_2 + 0.03CO_2 + 1.465(O_2 + 3.76N_2) + 0.131H_2O \rightarrow 0.75CO_2 + 1.661H_2O + 5.648N_2$$

درجة حرارة الندى هي الدرجة التي من أجلها يبدأ بخار الماء الموجود في النواتج بالتكاثف عند تبريده. بفرض أن النواتج هي مثالية نجد أن

$$P_{v,prod} = \frac{N_{v,prod}}{N_{prod}} * P_{prod}$$

$$P_{v,prod} = \frac{1.661}{0.75 + 1.661 + 5.648} * 101.325\ kPa$$

$$P_{v,prod} = \frac{1.661}{8.059} * 101.325\ kPa$$

$$P_{v,prod} = 20.88\ kPa$$

ومن جداول الهواء الرطب نجد أن

$$T_{dp} = T_{sat@20.88\ kPa} = 60.9\ ℃$$

<u>المثال التطبيقي 8-5 – تحليل النواتج.</u>

يحترق أوكتان (C_8H_{18}) مع هواء جاف ويعطي تحليل النواتج أنها تتألف من 5.62% أوكسجين و83.48% نتروجين و0.88% أول أوكسيد الكربون و10.02% غاز ثاني أوكسيد الكربون. احسب 1) نسبة الهواء إلى الوقود 2) نسبة الهواء النظري لاحتراق كامل و3) كمية الماء المتكاثف عندما تبرد النواتج إلى $[25℃, 100\ kPa]$.

الفرضيات: الاحتراق ستوكيومتري أي كامل و نواتج الاحتراق غازات مثالية.

التحليل: معادلة الاحتراق هي

$$xC_8H_{18} + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 5.62O_2 + 83.48N_2 + 10.02CO_2 + 0.88CO + bH_2O$$

نجد ثوابت المعادلة من توازن عدد الذرات فنجد أن

عدد ذرات الكربون $8x = 10.02 + 0.88 \rightarrow x = 1.36$

عدد ذرات الهيدروجين $18x = 2b \rightarrow b = 12.24$

عدد ذرات الأوكسجين $a = 10.02 + 0.44 + 5.62 + 0.5b \rightarrow a = 22.2$

عدد ذرات النتروجين $3.76a = 83.48 \rightarrow 22.2 = 22.2$

بالتعويض نجد أن

$$1.36C_8H_{18} + 22.2(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 10.02CO_2 + 0.88CO + 5.62H_2O + 83.48N_2 + 5.62O_2$$

بالتقسيم على 1.36

$$C_8H_{18} + 16.32(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 7.37CO_2 + 0.65CO + 9H_2O + 61.38N_2 + 4.13O_2$$

1- نسبة الهواء إلى الوقود هي

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{N_{air}}{N_{fuel}} * \frac{\mu_{air}}{\mu_{fuel}} = 4.76\ a * \frac{\mu_{air}}{\mu_{fuel}}$$

$$\mu_{fuel} = \mu_{(C_8H_{18})} = 8 * 12\frac{kg_{fuel}}{kmol} + 9 * 2\frac{kg_{fuel}}{kmol}$$

$$\mu_{fuel} = \mu_{(C_8H_{18})} = 114\ \frac{kg_{fuel}}{kmol}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = 4.76 * 16.32 * \frac{29\ \frac{kg_{air}}{kmol}}{114\ \frac{kg_{fuel}}{kmol}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = 19.76\ \frac{kg_{air}}{kg_{fuel}}$$

2- لتحديد كمية الهواء النظري يجب أن يكون الاحتراق كاملاً أي

$$C_8H_{18} + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O + 3.76aN_2$$

بموازنة الأوكسجين نجد

$$a = 12.5$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}}\right)_{stoic} = 4.76\ a * \frac{\mu_{air}}{\mu_{fuel}}$$

$$\mu_{fuel} = \mu_{(C_8H_{18})} = 8 * 12\frac{kg_{fuel}}{kmol} + 9 * 2\frac{kg_{fuel}}{kmol}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = 4.76 * 12.5\ \frac{29\ \frac{kg_{air}}{kmol}}{114\ \frac{kg_{fuel}}{kmol}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = 15.136\frac{kg_{air}}{kg_{fuel}}$$

الهواء الزائد هو نحسب النسبة المكافئة

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic}}{\left(\frac{A}{F}\right)}$$

$$\Phi = \frac{15.136}{19.76} = 0.766$$

$$\%\ excess\ air = \frac{1-\Phi}{\Phi} * 100\%$$

$$\%\ excess\ air = \frac{1-0.766}{0.766} * 100\%$$

$$\%\ excess\ air = 30.5\%$$

أو يمكن حسابها من العلاقة التالية

$$\%\ excess\ air = \frac{m_{air,act}}{m_{air,th}} = \frac{N_{air,act}}{N_{air,th}}$$

$$\%\ excess\ air = \frac{16.32\ kmol * 4.76}{12.5\ kmol * 4.76}$$

$$\%\ excess\ air = 131\%$$

أي هناك زيادة بمقدار 31% في الهواء.

3- لكل واحد كيلومول من الوقود يوجد نواتج بمقدار

$$7.37 + 0.65 + 4.13 + 61.38 + 9 = 82.53\ kmol\ products$$

نتيجة التبريد سوف تتكاثف كمية معينة من الماء بفرض أن كمية الماء المتكاثف هي (N_w) فإن $(9 - N_w)$ يبقى ماء في النواتج وعدد مولات النواتج الغازية سوف يقل إلى $(82.53 - N_w)$ بالنتيجة. بمعاملة النواتج على أساس غاز مثالي

$$\frac{N_v}{N_{prod,gas}} = \frac{P_v}{P_{prod}}$$

$$P_{v@25℃} = 3.1698\ kPa$$

$$\frac{9 - N_w}{82.53 - N_w} = \frac{3.1698\ kPa}{100\ kPa}$$

$$N_w = 6.59\ kmol$$

أي أن حوالي 73% من الماء الموجود في النواتج يتكاثف عند تبريد النواتج إلى 25 درجة مئوية.

4.8 إنتالبي التشكل القياسي *Standard Enthalpy of Formation* لمزيج.

عندما يتم التفاعل الكيميائي بين مجموعة من الوسائط فإن بعض الروابط الكيميائية *Chemical Bonds* تتفكك وبعضها يتكون نتيجة هذا التفاعل. ينتج عن تفكك أو تكون هذه الروابط طاقة تسمى بطاقة التشكل *Energy of Formation*. من أجل قياس كمية هذه الطاقة يجب اعتماد مرجعية معينة تكون الأساس في قياس تلك الطاقة. هذه المرجعية هي الإنتالبي. ولكن قياس إنتالبي عنصر ما هو صعب جداً لأن مرجعية القياس قد تختلف. من أجل التخلص من هذه المرجعية تم اعتماد إنتالبي التشكل القياسي *Standard Enthalpy of Formation* والذي يسمى في بعض الأحيان بحرارة التشكل *Standard Heat of Formation*. يعطى إنتالبي التشكل القياسي الرمز $(\Delta\bar{h}_f^o)$. يعرف إنتالبي التشكل القياسي لأي عنصر بأنه الطاقة الناتجة أو اللازمة لتشكل واحد مول من العنصر من مركباته الرئيسية في حالتها النظامية *Standard States*. الحالة النظامية لعنصر هي عند درجة حرارة (25℃) وضغط جوي نظامي $(1\ atm)$ ويرمز لها بالرمز العلوي (o). إنتالبي التشكل القياسي لعنصر **حر** *Free Element* في حالته النظامية يساوي الصفر فمثلاً إنتالبي التشكل القياسي للأوكسجين (O_2) عند حالته النظامية هي صفر. إنتالبي التشكل القياسي للماء بحالة غازية $(H_2O)_g$ مثلاً تساوي $(\Delta\bar{h}_f^o = -241.8\ kJ/mol)$ أما إنتالبي التشكل القياسي للماء بحالة سائلة $(H_2O)_l$ تساوي $(\Delta\bar{h}_f^o = -285.8\ kJ/mol)$. توخذ قيم انتالبي التشكل القياسي من الجداول الترموديناميكية.

نعرف إنتالبي التشكل القياسي عندما تكون الحالة غير نظامية إلى أنه مجموع إنتالبي التشكيل عند الحالة النظامية $[h_f^o(T_{ref})]$ والتي تعبر عن قوى الترابط في مكونات العنصر والتغيير في الإنتالبي المحسوس (Δh_s) والذي يعبر عن التغيير في إنتالبي العنصر نتيجة تغيير درجة حرارته.

تعطى العلاقة إنتالبي التشكل القياسي عندما تكون الحالة غير نظامية بالشكل

$$\bar{h}_i(T) = \bar{h}_{f,i}^o(T_{ref}) + \Delta\bar{h}_{s,i} \qquad (7\text{-}8)$$

حيث

$$\Delta\bar{h}_{s,i} = \left(\bar{h}(T) - \bar{h}^{o}\right)$$

حيث $\bar{h}(T)$ الإنتالبي عند شروط معينة و$(\bar{h}^{o})$ الإنتالبي المحسوس عند الحالة النظامية.

يبين الجدول (1−8) إنتالبي التشكل القياسي لبعض العناصر عند الحالة النظامية.

الجدول (1−8) إنتالبي التشكل القياسي لبعض العناصر.

اسم المركب	الصيغة الكيميائية	$\Delta\bar{h}_{f}^{o}, kJ/mol$
أوكسيد الألمينوم	$Al_2O_3(s)$	-1675.7
الميتان	$CH_4(g)$	-74.8
أول أوكسيد الكربون	$CO(g)$	-110.5
ثاني أوكسيد الكربون	$CO_2(g)$	-393.5
بروإلى أن	C_3H_8	-103.8
كبريتات الحديد	$FeSO_4(s)$	-929
غاز النشادر	$NH_3(g)$	-46.1
غاز ثاني أوكسيد الكبريت	$SO_2(g)$	-296.1
بخار الماء	$H_2O(g)$	-241.8
الماء	$H_2O(\ell)$	-285.8
إيتانول	$C_2H_5OH(\ell)$	-277.7
غاز ثاني أوكسيد النتروجين	NO_2	33.2

المثال التطبيقي 8−6 تحديد إنتالبي التشكل القياسي عند الشروط غير النظامية.

يتحرك مزيج غازي بضغط $(1\,atm)$ ضمن قناة معزولة وبدرجة حرارة $(1200\,K)$. المزيج يتألف من أول أوكسيد الكربون وثاني أوكسيد الكربون والنتروجين. الكسر المولي

لأول أوكسيد الكربون هو (0.1) والكسر المولي لثاني أوكسيد الكربون هو (0.2). حدد إنتالبي التشكل القياسي للمزيج.

التحليل: لتحديد إنتالبي التشكل القياسي للمزيج نستخدم المعادلة التالية

$$\bar{h}_{mix} = \sum y_i * \bar{h}_i$$

$$\bar{h}_i(T) = \bar{h}^o_{f,i}(T_{ref}) + \Delta\bar{h}_{s,i}$$

التغيير في الإنتالبي المحسوس لكل عنصر بحسب الجداول هو

$$\Delta\bar{h}_{s,co} = \left(\bar{h}(T)_{@1200} - \bar{h}^o_{298}\right)_{co} = 28440\ kJ/kmol$$

$$\Delta\bar{h}_{s,co_2} = \left(\bar{h}(T)_{@1200} - \bar{h}^o_{298}\right)_{co_2} = 44488\ kJ/kmol$$

$$\Delta\bar{h}_{s,N_2} = \left(\bar{h}(T)_{@1200} - \bar{h}^o_{298}\right)_{N_2} = 28118\ kJ/kmol$$

إنتالبي التشكل القياسي عند الشروط النظامية وبحسب الجداول هو

$$\bar{h}^o_{f,co}(T_{ref=298}) = -110541\ kJ/kmol$$

$$\bar{h}^o_{f,co_2}(T_{ref=298}) = -393546\ kJ/kmol$$

$$\bar{h}^o_{f,N_2}(T_{ref=298}) = 0\ kJ/kmol$$

إنتالبي التشكيل للنتروجين صفر لأن العنصر مستقر وغير مركب. أما الكسر المولي للنتروجين فهو

$$\sum y_i = 1$$

$$y_{N_2} = 1 - y_{co_2} - y_{co}$$

$$y_{N_2} = 1 - (0.1 + 0.2) = 0.7$$

بالتعويض في علاقة الإنتالبي نجد

$$\bar{h}_{mix} = y_{co}\left[\bar{h}^{o}_{f,co} + \left(\bar{h}(T)_{@1200} - \bar{h}^{o}_{298}\right)_{co}\right] + y_{co_2}\left[\bar{h}^{o}_{f,co_2} + \left(\bar{h}(T)_{@1200} - \bar{h}^{o}_{298}\right)_{co_2}\right] + y_{N_2}\left[\bar{h}^{o}_{f,N_2} + \left(\bar{h}(T)_{@1200} - \bar{h}^{o}_{298}\right)_{N_2}\right]$$

$$\bar{h}_{mix} = 0.2 * [-110541 + 28440]\frac{kJ}{kmol} + 0.1 * [-393546 + 44488]\frac{kJ}{kmol} + 0.7 * [0 + 28118]\frac{kJ}{kmol}$$

بالتعويض نجد أن إنتالبي التشكل القياسي هو

$$\bar{h}_{mix} = -58339.1\ \frac{kJ}{kmol}$$

الوزن الذري للخليط هو

$$\mu_{mix} = \sum y_i * \mu_i$$

$$\mu_{mix} = y_{co}\mu_{co} + y_{co_2}\mu_{co_2} + y_{N_2}\mu_{N_2}$$

$$\mu_{mix} = 0.1 * 28.01\ \frac{kg}{kmol} + 0.2 * 44.01\frac{kg}{kmol} + 0.7 * 28.013\frac{kg}{kmol}$$

$$\mu_{mix} = 31.212\frac{kg}{kmol}$$

وبالتالي إنتالبي المزيج النوعية

$$h_{mix} = \frac{\bar{h}_{mix}}{\mu_{mix}}$$

$$h_{mix} = \left(\frac{-58339.1\ kJ/kmol}{31.212\ kg/kmol}\right)$$

$$h_{mix} = -1869.12\ \frac{kJ}{kg}$$

5.8 إنتالبي الاحتراق *Enthalpy of Combustion*.

يعرف إنتالبي الاحتراق$(\bar{h}_c)$ إلى أنه كمية الطاقة المحرره عندما يحترق واحد مول من الوقود بشكل كامل عند درجة حرارة وضغط معينين وتساوي إنتالبي التفاعل $(\bar{h}_R)$,*Enthalpy of Reaction*.

$$\bar{h}_c = \bar{h}_R = \bar{h}_{prod} - \bar{h}_{react} \quad (kJ/kmol) \qquad (8\text{-}8)$$

تعرف أيضاً قيمة إنتالبي الاحتراق إلى أنها قيمة الحرارة *Heating Value* وتعطى بالعلاقة

$$heating\ value = |\bar{h}_c| \quad kJ/kg_{fuel} \qquad (9\text{-}8)$$

قيمة الحرارة تعتمد على نوع الماء الموجود في نواتج التفاعل الكيميائي فتسمى بالقيمة الحرارية العليا *Higher Heating Value* (*HHV*) عندما يكون الماء على شكل سائل وتسمى بالقيمة الحرارية الصغرى *Lower Heating Value* (*LHV*) عندما يكون الماء على شكل بخار. يمكن ربط القيمتين السابقتين بالعلاقة

$$HHV = LHV + \left(m_w * h_{fg}\right)_{H_2O} \quad kJ/kg_{fuel} \qquad (10\text{-}8)$$

حيث $(m_w, kg/kg_{fuel})$ كمية الماء في النواتج بالنسبة إلى كتلة الوقود.

المثال التطبيقي 8-7 تقييم إنتالبي الاحتراق.

حدد إنتالبي الاحتراق لسائل أوكتان (C_8H_{18}) عند درجة حرارة (25℃) وضغط $(1\ atm)$ باستخدام إنتالبي التشكيل الموجود في الجداول وبافتراض أن الماء في النواتج يخرج على شكل سائل.

التحليل: معادلة احتراق الأوكتان الكامل أو المعادلة الستوكيومترية لهذا التفاعل هي

$$C_8H_{18} + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O(l) + 3.76aN_2$$

إنتالبي الاحتراق يعطى بالعلاقة

$$\bar{h}_c = \bar{h}_R = \bar{h}_{prod} - \bar{h}_{react} \quad (kJ/kmol)$$

$$\bar{h}_c = \sum N_P \bar{h}^o_{f,p} - \sum N_r \bar{h}^o_{f,r}$$

$$\bar{h}_c = \left[\left(N * \bar{h}^o_f\right)_{CO_2} + \left(N * \bar{h}^o_f\right)_{H_2O} + \left(N * \bar{h}^o_f\right)_{N_2}\right] - \left[\left(N * \bar{h}^o_f\right)_{C_8H_{18}} + \left(N * \bar{h}^o_f\right)_{O_2} + \left(N * \bar{h}^o_f\right)_{N_2}\right]$$

إنتالبي التشكيل القياسي لكل من النتروجين والأوكسجين هي صفر لأن كلا منهما عنصر مستقر. إنتالبي التشكلي لباقي العناصر تؤخذ من الجداول عند الشروط النظامية والتي هي درجة حرارة (25°C) وضغط ($1\ atm$)

$$\bar{h}^o_{f,CO_2} = -393520\ kJ/kmol$$

$$\bar{h}^o_{f,H_2O} = -285830\ kJ/kmol$$

$$\bar{h}^o_{f,C_8H_{18}} = -249950\ kJ/kmol$$

من المعادلة نجد عدد المولات

$$N_{CO_2} = 8\ kmol$$

$$N_{H_2O} = 9\ kmol$$

$$N_{C_8H_{18}} = 1\ kmol$$

بالتعويض نجد

$$\bar{h}_c = \left\{\left(8\ kmol * -393520\ \frac{kJ}{kmol}\right)_{CO_2} + \left(9\ kmol * -285830\ \frac{kJ}{kmol}\right)_{H_2O} + 0\right\} - \left\{\left(1\ kmol * -249950\ \frac{kJ}{kmol}\right)_{C_8H_{18}} + 0 + 0\right\}$$

$$\bar{h}_c = -5471000 \frac{kJ}{kmol} = -5471\ \frac{MJ}{kmol}$$

الكتلة المولية للوقود هي

$$\mu_{C_8H_{18}} = 8 * 12.011 \frac{kg_{fuel}}{kmol} + 18 * 1.008 \frac{kg_{fuel}}{kmol}$$

$$\mu_{C_8H_{18}} = 114.232\ \frac{kg_{fuel}}{kmol}$$

$$h_c = \frac{-5471\ \frac{MJ}{kmol}}{114.232\ \frac{kg_{fuel}}{kmol}}$$

$$h_c = 47.8937\ \frac{MJ}{kg_{fuel}}$$

هذه القيمة موافقة للقيمة الموجودة في الجداول عن الأوكتان والتي هي $47.890 \frac{MJ}{kg}$

6.8 القانون الأول في الترموديناميك في الأنظمة المتفاعلة.

القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المتفاعلة لا يختلف كثيراً عن الأنظمة المدروسة سابقاً ولكن يجب على التغيير في الطاقة (ΔE_{sys}) في القانون الأول أن يأخذ بعين الاعتبار الطاقة الكيميائية الناتجة عن التفاعلات الكيميائية في تلك الأنظمة أي

$$\Delta E_{sys} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE + \Delta E_{chemical}$$

1.6.8 القانون الأول في الترموديناميك في الأنظمة المفتوحة.

في الجريانات المستقرة يمكن كتابة معادلة القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة بالشكل

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{n}_r \bar{h}_r = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum \dot{n}_P \bar{h}_P \quad \left(kW/kmol_{fuel}\right) \tag{11-8}$$

حيث إنتالبي المواد المتفاعلة والمواد الناتجة هو إنتالبي التشكل القياسي المعطى في العلاقة (7−8) و$(\dot{n})$ هو المعدل التدفق المولي لكل من المواد الناتجة والمواد المتفاعلة.
في حال قسمنا المعادلة السابقة على معدل تدفق واحد مول من الوقود نجد أن

$$\bar{Q}_{in} + \bar{W}_{in} + \sum N_r \bar{h}_r = \bar{Q}_{out} + \bar{W}_{out} + \sum N_P \bar{h}_P \quad \left(kJ/kmol_{fuel}\right) \tag{12-8}$$

بأخذ عرف الاتجاهات تصبح المعادلة السابقة بالشكل

$$\bar{Q} - \bar{W} = \sum N_P \bar{h}_P - \sum N_r \bar{h}_r \quad \left(kJ/kmol_{fuel}\right) \tag{13-8}$$

أو يمكن اختصارها إلى

$$\bar{Q} - \bar{W} = \bar{H}_{Prod} - \bar{H}_{react} \quad \left(kJ/kmol_{fuel}\right) \tag{14-8}$$

حيث

$$H_{Prod} = \sum N_P \bar{h}_P = \sum N_P \left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_P$$

$$H_{react} = \sum N_r \bar{h}_r = \sum N_r \left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_r$$

إذا تم إعطاء قيمة إنتالبي الاحتراق في هذه الحالة تتحول المعادلة إلى

$$\bar{Q} - \bar{W} = \bar{h}_c^o + \sum N_P\left(\bar{h} - \bar{h}^o\right)_P - \sum N_r\left(\bar{h} - \bar{h}^o\right)_r \qquad kJ/kmol_{fuel} \tag{15-8}$$

وبما أن كافة عمليات الاحتراق لاتشمل أي عمل متبادل وفي أغلب الأحيان كمية الحرارة تكون خارجة من النظام وليست داخلة، تتحول المعادلة إلى

$$\bar{Q}_{out} = \bar{H}_{react} - \bar{H}_{prod} \qquad kJ/kmol_{fuel} \tag{16-8}$$

$$\bar{Q}_{out} = \sum N_r\left(\bar{h}_f^o + \left[\bar{h} - \bar{h}^o\right]\right)_r - \sum_{/kmol_{fuel}} N_P\left(\bar{h}_f^o + \left[\bar{h} - \bar{h}^o\right]\right)_P \qquad kJ \tag{17-8}$$

2.6.8 القانون الأول في الترديناميك في الأنظمة المغلقة.

يمكن التعبير عن القانون الأول في الأنظمة المغلقة بالشكل التالي

$$(\bar{Q}_{in} + \bar{W}_{in}) - (\bar{Q}_{out} + \bar{W}_{out}) = \bar{U}_{prod} - \bar{U}_{react} \qquad kJ/kmol_{fuel} \tag{18-8}$$

يمكن التعبير عن الطاقة الداخلية بواسطة الإنتالبي من علاقة موليير أي أن

$$U = H - PV$$

مع الأخذ بعين الاعتبار عرف الاتجاهات تصبح المعادلة بالشكل

$$\bar{Q} - \bar{W} = \sum N_P\left(\bar{h}_f^o + \left[\bar{h} - \bar{h}^o\right] - P\bar{v}\right)_P - \sum_{/kmol_{fuel}} N_r\left(\bar{h}_f^o + \left[\bar{h} - \bar{h}^o\right] - P\bar{v}\right)_r \quad kJ \tag{19-8}$$

المثال التطبيقي 8-8 تحليل القانون الأول في الترموديناميك في عملية احتراق مستقرة.

يدخل سائل البروإلى أن (C_3H_8) إلى غرفة الاحتراق عند درجة حرارة (25°C) وبتدفق ($0.05\ kg/s$) حيث يمزج ويحرق مع 50% نسبة زائدة من الهواء درجة حرارته (7°C). تحليل غازات الاحتراق يدل على أن كل ذرات الهدروجين تحولت إلى ماء و90% من الكربون وبقي 10% من أول أوكسيد الكربون. فإذا كانت درجة حرارة الغازات ($1500\ K$) حدد 1) تدفق الهواء و2) كمية الحرارة الخارجة من غرفة الاحتراق.

الفرضيات: 1) العملية مستقرة 2) الغازات مثالية 3) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: معادلة الاحتراق الكامل للبروإلى أن أو المعادلة الستوكيومترية لهذا التفاعل هي

$$C_3H_8(l) + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O(l) + 3.76aN_2$$

من توازن الأوكسجين نجد أن

$$a = 5$$

50% هواء زائد تكون قيمة

$$a = 5 + 0.5 * 5 = 7.5$$

معادلة الاحتراق مع 50% هواء زائد هي

$$C_3H_8(l) + 7.5(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 2.7CO_2 + 0.3CO + 4H_2O + 2.65O_2 + 28.2N_2$$

1. نسبة الهواء إلى الوقود في عملية الاحتراق الحقيقي هي

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{N_{air}}{N_{fuel}} * \frac{\mu_{air}}{\mu_{fuel}} = 4.76\ a * \frac{\mu_{air}}{\mu_{fuel}}$$

$$\mu_{fuel} = \mu_{(C_3H_8)} = 3 * 12\frac{kg_{fuel}}{kmol} + 4 * 2\frac{kg_{fuel}}{kmol}$$

$$\mu_{fuel} = \mu_{(C_3H_8)} = 44\ \frac{kg_{fuel}}{kmol}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = 4.76 * 7.5 * \frac{29\ 44\ \frac{kg_{air}}{kmol}}{44\ \frac{kg_{fuel}}{kmol}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = 25.53\ kg_{air}/kg_{fuel}$$

ولكن يمكن التعبير عن النسبة بالشكل

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}}$$

$$\dot{m}_{air} = \left(\frac{A}{F}\right) * \dot{m}_{fuel}$$

$$\dot{m}_{air} = 25.53\ kg_{air}/kg_{fuel} * 0.05\ kg_{fuel}/min$$

$$\dot{m}_{air} = 1.18\, kg_{air}/min$$

2. من أجل حساب كمية الحرارة الخارجة نطبق القانون الأول في الترموديناميك في الأنظمة المفتوحة بالشكل

$$\bar{Q}_{out} = \sum N_r\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_r - \sum N_P\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_P \quad kJ/kmol_{fuel}$$

من الجداول نجد كافة القيم

$h_{1500\,k}$	$h_{298\,k=25℃}$	$h_{280\,k=7℃}$	إنتالبي التشكيل	المادة
------	----	-----	-118910	$C_3H_8(l)$
49292	8682	8150	0	O_2
47073	8669	8141	0	N_2
57999	9904	-----	-241820	H_2O
71078	9364	-----	-393520	CO_2
47517	8669	-----	-110530	CO

$$reactants = \sum N_r\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_r$$
$$= N_{C_3H_8}\left(\bar{h}_{f,298}^o + \bar{h}_{298} - \bar{h}_{298}\right)_{C_3H_8}$$
$$+ N_{O_2}\left(\bar{h}_{f,298}^o + \bar{h}_{280} - \bar{h}_{298}\right)_{O_2}$$
$$+ N_{N_2}\left(\bar{h}_{f,298}^o + \bar{h}_{280} - \bar{h}_{298}\right)_{N_2}$$

بالتعويض نجد أن إنتالبي المواد المتفاعلة

$$reactants == \left\{\left[1\ kmol * (-118910)_{C_3H_8}\ \frac{kJ}{kmol}\right] + 7.5\ kmol\right.$$
$$* (0 + 8150 - 8682)_{O_2}\frac{kJ}{kmol} + 28.2\ kmol$$
$$\left. * (0 + 8141 - 8669)_{N_2}\frac{kJ}{kmol}\right\}$$

$$Products = \sum N_P\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_P$$
$$= N_{CO_2}\left(\bar{h}_{f,298}^o + \bar{h}_{1500} - \bar{h}_{298}\right)_{CO_2}$$
$$+ N_{CO}\left(\bar{h}_{f,298}^o + \bar{h}_{1500} - \bar{h}_{298}\right)_{CO}$$
$$+ N_{H_2O}\left(\bar{h}_{f,298}^o + \bar{h}_{1500} - \bar{h}_{298}\right)_{H_2O}$$
$$+ N_{O_2}\left(\bar{h}_{f,298}^o + \bar{h}_{1500} - \bar{h}_{298}\right)_{O_2}$$
$$+ N_{N_2}\left(\bar{h}_{f,298}^o + \bar{h}_{1500} - \bar{h}_{298}\right)_{N_2}$$

بالتعويض نجد أن إنتالبي المواد الناتجة

$$Products = \left\{2.7\ kmol\ CO_2 * (-393520 + 71078 - 9364)\frac{kJ}{kmol_{CO_2}}\right.$$
$$+ 0.3\ kmol\ CO * (-110530 + 47517 - 8669)\frac{kJ}{kmol_{CO}}$$
$$+ 4\ kmol\ H_2O * (-241820 + 57999 - 9904)\frac{kJ}{kmol_{H_2O}}$$
$$+ 2.65\ kmol\ O_2 * (0 + 49292 - 8682)\frac{kJ}{kmol_{O_2}}$$
$$\left. + 28.2\ kmol\ N_2 * (0 + 47073 - 8669)\frac{kJ}{kmol_{N_2}}\right\}$$

بالتعويض نجد كمية الحرارة

$$\bar{Q}_{out} = 363.88\ MJ/kmol_{\ C_3H_8}$$

$$\mu_{fuel} = \mu_{\ C_3H_8} = 44\ \frac{kg_{fuel}}{kmol}$$

$$Q_{out} = \frac{\bar{Q}_{out}}{\mu_{fuel}}$$

$$Q_{out} = \frac{363.88\ MJ/kmol}{44\ kg_{\ C_3H_8}/kmol}$$

$$= 8.270\ MJ/kg_{\ C_3H_8}$$

تغيير كمية الحرارة هو

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m} * Q_{out}$$

$$\dot{Q}_{out} = 0.05\frac{kg_{\ C_3H_8}}{s} * 8.270\ \frac{MJ}{kg_{\ C_3H_8}}$$

$$\dot{Q}_{out} = 6.89\ kW$$

المثال التطبيقي 8-9 تحليل القانون الأول في الترموديناميك في غرفة.

يوجد في خزان مغلق على (1 $lbmol$) من الميتان (CH_4) على شكل غاز و (3 $lbmol$) من الأوكسجين بدرجة حرارة (77°F) وضغط جوي نظامي. نقوم بإشعال محتوى الخزان ويحترق الميتان بشكل كامل، إذا كانت درجة حرارة النواتج هي ($1800\ R$) حدد 1) الضغط النهائي في الخزان و2) الحرارة الناتجة عن هذا الاحتراق.

الفرضيات: 1) الاحتراق كامل 2) الوقود والهواء غازات مثالية 3) الطاقة الحركية والكامنة مهملة 4) لايوجد تبادل في العمل.

التحليل: معادلة الاحتراق الكامل للميتان هي

$$CH_4(g) + 3O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O(l) + O_2$$

عند درجة الحرارة النهائية التي توافق $(1800\ R)$ يكون الماء على شكل بخار وبأخذ معادلة الغاز المثالي لكل من المواد المتفاعلة والنواتج نجد أن الضغط النهائي هو

$$P_{prod} = P_{react} * \left(\frac{N_{prod}}{N_{react}}\right) * \left(\frac{T_{prod}}{T_{react}}\right)$$

$$P_{prod} = 1\ atm * \left(\frac{4\ lbmol}{4\ lbmol}\right) * \left(\frac{1800\ R}{537\ R}\right)$$

$$P_{prod} = 3.35\ atm$$

كمية الحرارة هي

$$\bar{Q}_{out} = \sum N_r\left(\bar{h}_f^o - \bar{R}_u T\right)_r - \sum N_P\left(\bar{h}_f^o + \bar{h}_{1800\,R} - \bar{h}_{537R}^o - \bar{R}_u T\right)_P$$

من الجداول نحسب كافة القيم

المادة	إنتالبي التشكيل	$h_{537\,R}$	$h_{1800\,R}$
$CH_4(g)$	-32210	-----	----
O_2	0	3725.1	13485.8
CO_2	-169300	4027.5	18391.5
$H_2O\ (g)$	-104040	4258	15433

بالتعويض نجد أن

$$\begin{aligned} Products = \sum N_P\left(\bar{h}_f^o + \bar{h}_{1800\,R} - \bar{h}_{537R}^o - \bar{R}_u T\right)_P \\ = \Big\{ & 1\ lbmol\ CO_2 \\ & * (-169300 + 18391.5 - 4027.5 - 1.986 * 1800)\frac{Btu}{lbmol} \\ & + 2\ lbmol\ H_2O \\ & * (-104 + 1533 - 4258 - 1.986 * 1800)\frac{Btu}{lbmol} \\ & + 1\ lbmol\ O_2 \\ & * (0 + 13485.8 - 3725.1 - 1.986 * 1800)\frac{Btu}{lbmol} \Big\} \end{aligned}$$

$$reactants = \sum N_r\left(\bar{h}_f^o - \bar{R}_u T\right)_r$$
$$= \left\{1\ lbmol\ CH_4 * (-32210 - 1.986 * 537)\frac{Btu}{lbmol}\right.$$
$$\left. + 3\ lbmol\ O_2 * (0 - 1.986 * 537)\frac{Btu}{lbmol}\right\}$$

بالتعويض نجد كمية الحرارة

$$\bar{Q}_{out} = 308730\ \frac{Btu}{lbmol_{CH_4}}$$

7.8 درجة حرارة الاحتراق الأدياباتية.

بما أن الطاقة الحركية والطاقة الكامنة والعمل المتبادل بين النظام والمحيط الخارجي هي قيم معدومة في عمليات الاحتراق فإن كمية الحرارة الناتجة عن التفاعل الكيميائي في خليط الاحتراق قد تطرح إلى الوسط الخارجي أو تستخدم داخلياً لرفع درجة حرارة نواتج الاحتراق. تصل درجة حرارة نواتج الاحتراق إلى أكبر قيمة عند عزل النظام عن المحيط. في هذه الحالة تكون درجة حرارة نواتج الاحتراق أكبر درجة وتسمى درجة حرارة اللهب الأدياباتية *Adiabatic Flame Temperature* أو درجة حرارة الاحتراق الأدياباتية *Adiabatic Combustion Temperature*. تحسب درجة حرارة الاحتراق الأدياباتية من القانون الأول في الترموديناميك كما يلي

$$\bar{H}_{react} = \bar{H}_{prod} \qquad kJ/kmol_{fuel} \tag{20-8}$$

$$\sum N_r\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_r = \sum_{/kmol_{fuel}} N_P\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_P \qquad (kJ) \tag{21-8}$$

بما أن درجة حرارة النواتج غير معروفة لذلك نختار قيماً لا على التعيين لدرجة حرارة النواتج ونقوم بتطبيق المساواة السابقة لقيم إنتالبي النواتج والمواد المتفاعلة وعندما يتحقق التساوي في المعادلة تكون درجة الحرارة المختارة هي درجة حرارة الاحتراق الأدياباتية.

المثال التطبيقي 8-10 تحليل القانون الأول في الترموديناميك في عملية احتراق مستقرة.

يدخل سائل البروإلى أن (C_8H_{18}) إلى غرفة الاحتراق في عنفة غازية عند درجة حرارة (25°C) ويحرق بكمية من الهواء وبنفس درجة الحرارة. حدد درجة حرارة اللهب الأدياباتية 1) من أجل احتراق كامل لأجل 100% هواء نظري 2) من أجل احتراق كامل لأجل 400% هواء نظري و3) من أجل احتراق غير كامل لأجل 90% هواء نظري.

الفرضيات: 1) العملية مستقرة 2) غرفة الاحتراق معزولة 3) الغازات مثالية 4) الطاقة الحركية والكامنة مهملة 5) لايوجد تبادل في العمل.

التحليل: معادلة الاحتراق الكامل للبروإلى أن أي 100% هواء نظري أو المعادلة الستوكيومترية لهذا التفاعل هي

$$C_8H_{18}(l) + 12.5(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O(g) + 47N_2$$

تحسب درجة حرارة اللهب الأدياباتية عن طريق التقريب من المعادلة

$$\sum N_r\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_r = \sum N_P\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_P \qquad kJ/kmol_{fuel}$$

المواد المتفاعلة لها درجة الحرارة نفسها وبالتالي تغيير الإنتالبي المحسوس يساوي الصفر أي

$$[\bar{h} - \bar{h}^o]_r = 0$$

$$\sum N_r \bar{h}_{f,C_8H_{18}}^o = \sum N_P\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_P \qquad kJ/kmol_{fuel}$$

من الجداول نحسب كافة القيم الإنتالبي

$h_{298\ k=25℃}$	إنتالبي التشكيل	المادة
----	-249950	$C_8H_{18}(l)$
8682	0	O_2
8669	0	N_2
9904	-241820	$(H_2O)_g$
9364	-393520	CO_2

بالتعويض نجد أن إنتالبي النواتج

$$Products = \sum N_P\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_P$$
$$= N_{CO_2}\left(\bar{h}_{f,298}^o + \bar{h}_T - \bar{h}_{298}\right)_{CO_2}$$
$$+ N_{H_2O}\left(\bar{h}_{f,298}^o + \bar{h}_T - \bar{h}_{298}\right)_{H_2O} + N_{N_2}\left(\bar{h}_{f,298}^o + \bar{h}_T - \bar{h}_{298}\right)_{N_2}$$

بالتعويض نجد أن إنتالبي المواد الناتجة

$$Products = \Big\{8\ kmol\ CO_2 * \left(-393520 + \bar{h}_{T,CO_2} - 9364\right)\frac{kJ}{kmol_{CO_2}}$$
$$+ 9\ kmol\ H_2O * \left(-241820 + \bar{h}_{T,H_2O} - 9904\right)\frac{kJ}{kmol_{H_2O}}$$
$$+ 47\ kmol\ N_2 * \left(0 + \bar{h}_{T,N_2} - 8669\right)\frac{kJ}{kmol_{N_2}}\Big\}$$

بالتعويض

$$-249950 = \Big\{8\ kmol\ CO_2 * \left(-393520 + \bar{h}_{T,CO_2} - 9364\right)\frac{kJ}{kmol_{CO_2}}$$
$$+ 9\ kmol\ H_2O * \left(-241820 + \bar{h}_{T,H_2O} - 9904\right)\frac{kJ}{kmol_{H_2O}}$$
$$+ 47\ kmol\ N_2 * \left(0 + \bar{h}_{T,N_2} - 8669\right)\frac{kJ}{kmol_{N_2}}\Big\}$$

$$8\bar{h}_{T,CO_2} + 9\bar{h}_{T,H_2O} + 47\bar{h}_{T,N_2} = 5646081$$

بالتعويض نجد أن إنتالبي المواد المتفاعلة

$$reactants = \sum N_r \bar{h}^o_{f,C_8H_{18}} = 1kmol * -249950 \frac{kJ}{kmol} = -249950\ kJ$$

نلاحظ من المعادلة السابقة أنه يوجد ثلاثة مجاهيل ولكن هي بالحقيقة مجهول واحد وهو درجة حرارة النواتج. من أجل معرفة درجة حرارة النواتج نستخدم الحاسب وبطريقة التجربة والخطأ *Trial and Error* نقوم بحساب درجة الحرارة والتي هي درجة حرارة اللهب الأدياباتية. الخيار الأول لدرجة الحرارة هي جمع عدد مولات النواتج وتقسيم الطرف الأيمن من المعادلة عليه

$$\frac{5646081}{8+9+47} = 88220$$

قيمة هذا الإنتالبي تتناسب ودرجة الحرارة 2650 للنتروجين و2100 للماء و1800 لغاز ثاني أوكسيد الكربون. بما أن أكبر قيمة للنواتج هي من غاز النتروجين لذلك نختار درجة الحرارة 2400 كالفن. عند هذه الدرجة يكون

$$8\bar{h}_{T,CO_2} + 9\bar{h}_{T,H_2O} + 47\bar{h}_{T,N_2}$$

$$8(125152) + 9(103508) + 47(79320) = 5660828 > 5646081$$

القيمة المحسوبة هي أعلى من قيمة التوازن أي يجب أن نقوم باختيار قيمة أقل لدرجة الحرارة ولنأخذ 2350

$$8\bar{h}_{T,CO_2} + 9\bar{h}_{T,H_2O} + 47\bar{h}_{T,N_2}$$

$$8(122091) + 9(100846) + 47(77496) = 5526654 < 5646081$$

لذلك فإن درجة الحرارة بين 2400 و2350. بعد التقريب الداخلي *Interpolation* نجد أن درجة الحرارة التي تحقق التوازن هي

$$T_{prod} = 2395\ K$$

معادلة الاحتراق الكامل من أجل 400% هواء نظري هي

$$C_8H_{18}(l) + 50(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O(g) + 37.5O_2 + 188N_2$$

باتباع الطريقة نفسها في البند الأول نجد أن

$$T_{prod} = 962\ K$$

نلاحظ أن درجة حرارة النواتج تقل وبشكل ملحوظ عندما يكون الخليط نظيفاً. معادل الاحتراق غير الكامل من أجل 90% هواء نظري هي

$$C_8H_{18}(l) + 11.25(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 5.5CO_2 + 9H_2O(g) + 2.5CO + 42.3N_2$$

باتباع الطريقة نفسها في البند الأول نجد أن

$$T_{prod} = 2236\ K$$

مناقشة.

نلاحظ أن درجة حرارة اللهب الأدياباتية تنخفض عندما يكون الإحتراق غير كامل أو الخليط نظيفاً.

8.8 التغيير في إنتروبي الأنظمة المتفاعلة.

سبق وشاهدنا أن معادلة توازن الإنتروبي للأنظمة المتفاعلة وغير المتفاعلة ولأي نظام يمكن أن يعبر عنها بالشكل

$$(S_{in} - S_{out}) - S_{gen} = \Delta S_{sys}$$

بأخذ الكميات بالنسبة لواحدة المولات وباعتبار أن كمية الحرارة التي تدخل النظام هي موجبة فيمكن أن نعبر عن التغيير في الإنتروبي في الأنظمة المتفاعلة المستقرة والمغلقة بالشكل

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + S_{gen} = S_{prod} - S_{react} \qquad kJ/K \qquad (22\text{-}8)$$

من أجل نظام أدياباتي تتحول المعادلة إلى

$$S_{gen,adia} = S_{prod} - S_{react} \geq 0 \qquad kJ/K \qquad (23\text{-}8)$$

يحسب إنتروبي العنصر من العلاقة

$$S_i = N_i \bar{s}_i(T, P_i) = N_i[\bar{s}_i^o(T, P_o) - \bar{R}_u ln(y_i * P_m)]$$

9.8 تحليل القانون الثاني والإكسرجي للأنظمة المتفاعلة.

يعطى العمل الأعظمي (عمل عكوس) الذي يمكن أن تنتجه الأنظمة المتفاعلة المستقرة مع إهمال الطاقة الحركية والكامنة بالشكل

$$W_{rev} = \sum N_r\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o] - T_{out} * \bar{s}\right)_r - \sum N_P\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o] - T_{out} * \bar{s}\right)_P \qquad (24\text{-}8)$$

عندما تكون المواد المفاعلة والنواتج بدرجة حرارة الوسط الخارجي (T_{out}) فإننا نسمي التابع

$$\left(\bar{h} - T_{out} * \bar{s}\right)_{T_{out}} = \bar{g}_{out}$$

بتابع جبس *Gibbs Function* بالنسبة لواحد مول لعنصر عند درجة حرارة (T_{out}) وبالتالي تتحول المعادلة إلى

$$W_{rev} = \sum N_r \bar{g}_{out,r} - \sum N_P \bar{g}_{out,P} \qquad (25\text{-}8)$$

أو يمكن كتابتها بالشكل

$$W_{rev} = \sum N_r\left(\bar{g}_f^o + [\bar{g}_{T_{out}} - \bar{g}^o]\right)_r - \sum N_P\left(\bar{g}_f^o + [\bar{g}_{T_{out}} - \bar{g}^o]\right)_P \qquad (26\text{-}8)$$

يكون

$\bar{g}_f^o$ تابع جبس للتشكل القياسي ويساوي صفر للعناصر الحر عند الشروط النظامية

$\bar{g}_{T_{out}} - \bar{g}^o$ التغيير في تابع جبس المحسوس عند درجة حرارة T_{out} بالنسبة إلى الحالة النظامية

في الحال التي تكون في المواد المتفاعلة والنواتج بدرجة حرارة المحيط فيكون

$$\bar{g}_{T_{out}} = \bar{g}^o$$

وتتحول المعادلة إلى

$$W_{rev} = \sum N_r \bar{g}_{f,r}^o - \sum N_P \bar{g}_{f,P}^o \quad (kJ) \qquad (27\text{-}8)$$

نستنتج من المعادلة (27−8) أن قيمة تابع جبس بالقيمة $(-\bar{g}_f^o)$ تدل على عمل عكوس مترافق مع تشكل العنصر من حالته الحرة بدرجة حرارة (25°C) وضغط نظامي وبوسط محيط له الشروط نفسها. تعطى قيم $(\bar{g}_f^o)$ ضمن جداول ترموديناميكية خاصة.

المثال التطبيقي 8−11 العمل العكوس المترافق مع عملية احتراق

يحرق واحد مول من الكربون بدرجة حرارة (77°F) وبضغط نظامي وبشكل مستقر مع واحد مول من الأوكسجين. يتشكل غاز ثاني أوكسيد الربون ويبرد إلى درجة حرارة المحيط التي تتساوى مع درجة حرارة الكربون الأولية. بفرض أن الاحتراق كامل حدد العمل العكوس خلال تلط العملية.

الفرضيات: 1) الاحتراق كامل 2) العملية مستقرة 3) الغازات مثالية 4) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: معادلة الاحتراق الكامل للكربون هي

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

كون درجة حرارة النواتج والمواد المتفاعلة والمحيط بنفس الشروط فإن العمل العكوس يحسب من العلاقة

$$W_{rev} = \sum N_r \bar{g}^o_{f,r} - \sum N_P \bar{g}^o_{f,P} \quad (kJ)$$

توجد قيم تابع جبس من الجداول كما يلي

العنصر	تابع جبس للتشكل القياسي
O_2	0
C	0
CO_2	-169680

بالتعويض نجد أن

$$W_{rev} = 0 - N_{CO_2} \bar{g}^o_{f,CO_2}$$

$$W_{rev} = -(1\ lbmol * -169680\ Btu/lbmol)$$

$$W_{rev} = 169680\ Btu$$

مناقشة. يمكن باستخدام معادلة إنتالبي التشكل القياسي معرفة العمل العكوس

$$W_{rev} = \sum N_r \left(\bar{h}^o_f + [\bar{h} - \bar{h}^o] - T_{out} * \bar{s}\right)_r - \sum N_P \left(\bar{h}^o_f + [\bar{h} - \bar{h}^o] - T_{out} * \bar{s}\right)_P$$

حيث

$$\bar{h} = \bar{h}^o$$

$$W_{rev} = \sum N_r \left(\bar{h}^o_f - T_{out} * \bar{s}\right)_r - \sum N_P \left(\bar{h}^o_f - T_{out} * \bar{s}\right)_P$$

تأخذ قيم إنتالبي التشكل من الجداول

العنصر	إنتالبي التشكل القياسي	إنتروبي العنصر
O_2	0	49
C	0	1.36
CO_2	-169300	51.07

بالتعويض من المعادلة

$$W_{rev} = \{1lbmol\ (0 - 537R * 1.36\ btu/lbmolR)\} + \{1\ lbmol\ (0 - 537R * 49\ btu/lbmolR)\} - \left\{1\ lbmol\left(-169300\frac{btu}{lbmol} - 537R * 51.07\ btu/lbmolR\right)\right\}$$

$$W_{rev} = 1696800\ Btu$$

المثال التطبيقي 8-12 تحليل القانون الثاني لاحتراق أدياباتي.

يحرق غاز الميتان (CH_4) بشكل أدياباتي مستقر عند درجة حرارة (25℃) وبضغط نظامي مع 50% مع هواء إضافي بدرجات الحرارة نفسها. بفرض أن الاحتراق كامل ودرجة حرارة المحيط هي (25℃) والنواتج تخرج من غرفة الاحتراق بضغط جوي نظامي حدد 1) درجة حرارة النواتج 2) توليد الإنتروبي 3) العمل العكوس والإكسرجي المدمر.

الفرضيات: 1) الاحتراق كامل 2) العملية مستقرة 3) الغازات مثالية 4) الطاقة الحركية والكامنة مهملة 5) الغرفة معزولة.

التحليل:

1) درجة حرارة النواتج. معادلة الاحتراق الكامل للميتان هي

$$CH_4(g) + 3(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O(g) + O_2 + 11.28N_2$$

بما أن الغرفة معزولة فإن درجة حرارة اللهب الأدياباتية تعطى من العلاقة

$$\sum N_r(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o])_r = \sum N_P(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o])_P$$

ولكن

$$[\bar{h} - \bar{h}^o]_r = 0$$

$$\sum N_r \bar{h}_{f,r}^o = \sum N_P(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o])_P$$

من جداول الترموديناميك قيم إنتالبي التشكل القياسية وعند (25℃) للمواد المتفاعلة والنواتج هي

العنصر	إنتالبي التشكل القياسي	إنتالبي عند (25°C)
CH_4	-74850	----
O_2	0	8682
N_2	0	8669
$H_2O(g)$	-2241820	9904
CO_2	393520	9364

$$reactants = \sum N_r \bar{h}^o_{f,r} = N_{CH_4}\left(\bar{h}^o_f\right)_{CH_4} = -74850\ kJ/kmol$$

$$\begin{aligned} Products = \sum N_P\left(\bar{h}^o_f + [\bar{h} - \bar{h}^o]\right)_P \\ = N_{CO_2}\left(\bar{h}^o_{f,298} + \bar{h}_T - \bar{h}_{298}\right)_{CO_2} \\ + N_{H_2O}\left(\bar{h}^o_{f,298} + \bar{h}_T - \bar{h}_{298}\right)_{H_2O} + N_{N_2}\left(\bar{h}^o_{f,298} + \bar{h}_T - \bar{h}_{298}\right)_{N_2} \\ + N_{O_2}\left(\bar{h}^o_{f,298} + \bar{h}_T - \bar{h}_{298}\right)_{O_2} \end{aligned}$$

بالتعويض بالقيم نجد

$$\begin{aligned} Products = 1kmol\left(-393520 + \bar{h}_{CO_2} - 9364\right)_{CO_2} \\ + 2kmol\left(-241820 + \bar{h}_{H_2O} - 9904\right)_{H_2O} \\ + 11.28kmol\left(0 + \bar{h}_{N_2} - 8669\right)_{N_2} \\ + 1kmol\left(0 + \bar{h}_{O_2} - 8682\right)_{O_2} \end{aligned}$$

بالتعويض في علاقة التساوي نجد

$$\bar{h}_{CO_2} + 2\bar{h}_{H_2O} + 11.28\bar{h}_{N_2} + \bar{h}_{O_2} = 937950\ kJ$$

باستخدام طريقة التجربة والخطأ نجد أن

$$T_{prod} = 1789\ K$$

2) توليد الإنتروبي. بما أن الغرفة معزولة فتوليد الإنتروبي يحسب من العلاقة

$$S_{gen} = S_{prod} - S_{react} = \sum N_P \bar{s}_P - \sum N_r \bar{s}_r$$

يحسب الإنتروبي للعنصر من العلاق

$$S_i = N_i \bar{s}_i(T, P_i) = N_i[\bar{s}_i^o(T, P_o) - \bar{R}_u ln(y_i * P_m)]$$

الجول التالي يعطى قيمم معادلة الإنتروبي للعنصر

$N_i\bar{s}_i$	$-\bar{R}_u ln(y_i * P_m)$	$\bar{s}_i^o$	y_i	N_i	العنصر
186.16	-----	186.16	1	1	CH_4
654.06	12.98	205.04	0.21	3	O_2
2183.47	1.96	191.61	0.79	11.28	N_2

$S_{react} = 3023.69$

$N_i\bar{s}_i$	$-\bar{R}_u ln(y_i * P_m)$	$\bar{s}_i^o$	y_i	N_i	العنصر
325.19	22.674	302.517	0.0654	1	CH_4
551.72	16.905	258.957	0.1309	2	H_2O
287.15	22.674	264.471	0.0654	1	O_2
2825.65	2.524	247.977	0.7382	11.28	N_2

$S_{prod} = 3989.71$

بالتعويض نجد

$$S_{gen} = 3989.71 - 3023.69$$

$$S_{gen} = 966.0 \frac{kJ}{kmol\ K}$$

3) الإكسرجي المدمر

$$X_{des} = T_{out} * S_{gen}$$

$$X_{des} = 298K * 966 \frac{kJ}{kmol\ K} = 288\ \frac{MJ}{kmol}$$

كمية العمل الضائع خلال تلك العملية ويبين المثال أنه مع احتراق كامل تكون العملية غير العكوسة كبيرة جداً.

ملخص فصل ترموديناميك الإحتراق.

- يتألف الهواء نظرياً

$$1\ kmol\ O_2 + 3.76\ kmol\ N_2 = 4.76\ kmol\ air$$

- نسبة الهواء إلى الوقود *Air –Fuel Ratio*

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$$

- معادلة الاحتراق الكامل

$$C_nH_m + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow nCO_2 + \left(\frac{m}{2}\right)H_2O + 3.76a\ N_2$$

$$a = n + \frac{m}{4}$$

- نسبة الهواء النظري إلى الوقود *Stoichiometric Air-Fuel Ratio* أو النسبة الستويكومترية

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}}\right)_{stoic}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = \frac{N_{air} * \mu_{air}}{N_{fuel} * \mu_{fuel}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}}\right)_{stoic} = 4.76\ a * \frac{\mu_{air}}{\mu_{fuel}}$$

- النسبة المكافئة

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic}}{\left(\frac{A}{F}\right)}$$

- الهواء الزائد

$$\%\ excess\ air = \frac{1-\Phi}{\Phi} * 100\%$$

- إنتالبي التشكل القياسي لمزيج عند شروط غير مثالية

$$\bar{h}_i(T) = \bar{h}^o_{f,i}(T_{ref}) + \Delta\bar{h}_{s,i}$$

$$\Delta\bar{h}_{s,i} = \left(\bar{h}(T) - \bar{h}^o\right)$$

- إنتالبي الاحتراق

$$\bar{h}_c = \bar{h}_R = \bar{h}_{prod} - \bar{h}_{react} \quad (kJ/kmol)$$

- القانون الأول في الترموديناميك في الأنظمة المفتوحة

$$\bar{Q} - \bar{W} = \bar{H}_{Prod} - \bar{H}_{react} \qquad \left(kJ/kmol_{fuel}\right)$$

$$H_{Prod} = \sum N_P \bar{h}_P = \sum N_P\left(\bar{h}^o_f + \left[\bar{h} - \bar{h}^o\right]\right)_P$$

$$H_{react} = \sum N_r \bar{h}_r = \sum N_r\left(\bar{h}^o_f + \left[\bar{h} - \bar{h}^o\right]\right)_r$$

عندما يكون هناك فقط كمية حرارة خارجة

$$\bar{Q}_{out} = \sum N_r\left(\bar{h}^o_f + \left[\bar{h} - \bar{h}^o\right]\right)_r - \sum N_P\left(\bar{h}^o_f + \left[\bar{h} - \bar{h}^o\right]\right)_P \qquad kJ/kmol_{fuel}$$

- القانون الأول في الترموديناميك في الأنظمة المغلقة

$$\bar{Q} - \bar{W} = \sum N_P\left(\bar{h}^o_f + \left[\bar{h} - \bar{h}^o\right] - P\bar{v}\right)_P - \sum N_r\left(\bar{h}^o_f + \left[\bar{h} - \bar{h}^o\right] - P\bar{v}\right)_r \quad kJ/kmol_{fuel}$$

- درجة حرارة الاحتراق الأدياباتي أو درجة حرارة اللهب الأدياباتي

$$\sum N_r\left(\bar{h}^o_f + \left[\bar{h} - \bar{h}^o\right]\right)_r = \sum N_P\left(\bar{h}^o_f + \left[\bar{h} - \bar{h}^o\right]\right)_P \qquad kJ/kmol_{fuel}$$

- التغيير في الإنتروبي في عملية الاحتراق

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + S_{gen} = S_{prod} - S_{react} \qquad kJ/K$$

غرفة الاحتراق معزولة

$$S_{gen} = S_{prod} - S_{react} \geq 0$$

إنتروبي العنصر

$$S_i = N_i \bar{s}_i(T, P_i) = N_i[\bar{s}_i^o(T, P_o) - \bar{R}_u ln(y_i * P_m)]$$

- تحليل القانون الثاني في الترموديناميك للأنظمة المتفاعلة

$$W_{rev} = \sum N_r\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o] - T_{out} * \bar{s}\right)_r - \sum N_P\left(\bar{h}_f^o + [\bar{h} - \bar{h}^o] - T_{out} * \bar{s}\right)_P$$

$$W_{rev} = \sum N_r\left(\bar{g}_f^o + [\bar{g}_{T_{out}} - \bar{g}^o]\right)_r - \sum N_P\left(\bar{g}_f^o + [\bar{g}_{T_{out}} - \bar{g}^o]\right)_P$$

مسائل غير محلولة لفصل
ترموديناميك الإحتراق.

1. يتم حرق الميتان (CH_4) مع 75% هواء زائد ضمن غرفة احتراق. بفرض أن الاحتراق كامل حدد نسبة الهواء إلى الوقود.
2. يتم حرق إسيتلين (C_2H_2) ستوكيومتريكلي ضمن غرفة احتراق. بفرض أن الاحتراق كامل حدد نسبة الهواء إلى الوقود بالنسبة إلى واحد الكتلة وواحدة المول.
3. يحترق واحد مول من الإيتان (C_2H_6) مع كمية غير معروفة من الهواء خلال عملية الاحتراق. بين تحليل النواتج أن الاحتراق كان كاملاً بالإضافة إلى 3 كيلومول من الأوكسجين. حدد 1) نسبة الهواء إلى الوقود 2) كمية الهواء النظرية التي استخدمت في هذه العملية.
4. يتم حرق الميتان (CH_4) مع 200% هواء نظري ضمن غرفة احتراق. بفرض أن الاحتراق كامل والضغط الكلي هو $(14.5\ psia)$حدد 1) نسبة الهواء إلى الوقود 2) درجة حرارة الندى للنواتج.
5. يُحرق وقود غازي ذو التحليل الحجمي التالي 60% (CH_4) و30% (H_2) و10% (N_2) احتراقاً كاملاً مع 130 بالمئة هواء نظري. حدد 1)نسبة الهواء إلى الوقود 2) كمية الماء المتكائف من البخار الموجود في النواتج إذا تم تبريدها إلى $(20°C, 1atm)$.
6. تدخل المواد المتفاعلة إلى غرفة احتراق بدرجة حرارة $(20°C, 1atm)$ وتحترق كلياً وبشكل كامل وتخرد بدرجة حرارة باعتبار أن الاحتراق كامل خلال (700°C). الاحتراق تم مع 1) 100 % هواء نظري 2) 200 % هواء نظري 3) كمية اللازمة من الأوكسجين حدد أياً من العمليات السابقة تعطي كمية حرارة أقل.

الفصل التاسع

Chapter Nine

ترموديناميك الغازات عند الحركة

Thermodynamics of Moving Gases

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
A	مقطع القناة	m^3
A^*	مقطع القناة الحرج	m^3
C	سرعة موجة الصوت	m/s
C^*	سرعة موجة الصوت عند المقطع الحرج	m/s
C_o	سرعة الركود لموجة الصوت	m/s
c_P	الحرارة النوعية عند حجم ثابت	$kJ/kg\ K$
g	تسارع الجاذبية الأرضية	m/s^2
H	الإنتالبي	kJ
h	الإنتالبي النوعي	kJ/kg
h_o	إنتالبي الركود النوعي	kJ/kg
k	المعامل الأدياباتي	لا بعدي
Ma	عدد ماخ	لا بعدي
Ma_n	عدد ماخ الناظمي	لا بعدي
m	الكتلة	kg
$\dot{m}$	التدفق الكتلي	kg/sec
$\dot{m}_{max}$	التدفق الكتلي الأعظمي	kg/sec
P	الضغط	kPa أو bar
P_o	ضغط الركود	kPa أو bar
P^*	الضغط الحرج	kPa أو bar
P_e	ضغط الخروج	kPa أو bar

P_b	الضغط الخلفي	kPa أو bar
Q	كمية الحرارة	J
$\dot{Q}_{in}$	معدل تغيير كمية الحرارة من المصدر الحراري	W
$\dot{Q}_{out}$	معدل تغيير كمية الحرارة إلى المصرف الحراري	W
$\dot{Q}_{cv}$	معدل تغيير كمية الحرارة على سطح التحكم	W
q_{in}	كمية الحرارة النوعية من المصدر الحراري	kJ/kg
q_{out}	كمية الحرارة النوعية إلى المصرف الحراري	kJ/kg
R	ثابت وسيط التشغيل (الغاز)	$kJ/kg\,K$
R_u	ثابت الغاز العام	$kJ/kmol\,K$
s	الإنتروبي النوعي	$kJ/kg\,K$
T	درجة الحرارة	K أو ℃
T_o	درجة الحرارة الركود	K أو ℃
T^*	درجة الحرارة الحرجة	K أو ℃
V	الحجم	m^3
v	الحجم النوعي	m^3/kg
V	السرعة	m/s
V_n	السرعة الناظمية	m/s
V_t	السرعة المماسية	m/s
W	العمل	J
$\dot{W}_{in}$	معدل تغيير العمل المقدم إلى النظام	W
$\dot{W}_{out}$	معدل تغيير العمل المأخوذ من النظام	W
w	العمل النوعي	kJ/kg
ρ	كثافة وسيط التشغيل	kg/m^3
ρ_o	كثافة الركود	kg/m^3

ρ^*	الكثافة الحرجة	kg/m^3
τ	زاوية الصدمة	
θ	زاوية الانحراف	
α, β, γ	ثوابت	

مقدمة الفصل.

اعتبرنا في الفصول الماضية أن قيم الكثافة المستخدمة لوسائط التشغيل ثابتة وبالتالي كانت تأثيرات انضغاط وسيط التشغيل *Compressibility Effects* (الغاز) عند الحركة مهملة. في هذا الفصل سوف ندرس تأثير تغيير الكثافة عند الحركة في كافة بارامترات وسيط الشتغيل. يسمى الجريان الذي تتغير فيه الكثافة عند الحركة بالجريان القابل للانضغاط *Compressible Flow*. تظهر في الجريانات القابلة للانضغاط سرعات عالية جداً قد تصل في بعض الأحيان إلى سرعة الصوت *Speed of Sound*. لكي نفهم وندرس تغييرات بارامترات هذا الوسيط يجب علينا الجمع مابين علم ميكانيك السوائل وعلم الترموديناميك. سنحدد في هذا الفصل العلاقات العامة لجريان أحادي البعد لغاز مثالي ذي حرارة نوعية ثابتة. سنبدأ في هذا الفصل بالتعرف على بارامترات حالة الركود *Stagnation State* والعدد اللابعدي ماخ *Mach Number* في الجريانات القابلة للانضغاط. يتم بعد ذلك وصف بارامترات الوسيط عند السرع الصوتية *Sonic* والسرع فوق الصوتية *Supersonic* وتحت الصوتية *Subsonic*. سنقيم فيما بعد بارامترات الغاز المثالي في جريان إيزونتروبي بدلالة المعامل الأدياباتي وعدد ماخ. كما سنتعرف بعد ذلك على كيفية تمثيل هذه الجريانات الإيزونتروبية في أقنية متقاربة *Converging* (تسمى الأبوق *Nozzles*) وأقنية متباعدة *Diverging* (تسمى نواشرة *Diffusers*) وأقنية متقاربة – متباعدة *Converging-Diverging*. سندرس أيضاً تأثير تغيير المقطع في القناة على الجريان الأحادي البعد وبسرعات صوتية وتحت صوتية وفوق صوتية. وسنقوم أيضاً بدراسة الصدمات *Shock Waves* وتغيير بارامترات الغاز عند الصدمات الشاقولية والمائلة *Oblique*.

<u>الفوائد العلمية من الفصل.</u>

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

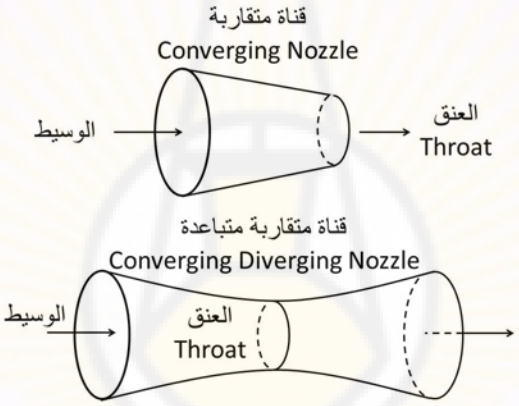
- ✓ تطوير العلاقات الأساسية للجريان القابل للانضغاط عند حركة الغاز بسرعات عالية.
- ✓ توضيح فكرة حالة الركود.
- ✓ تعريف سرعة الصوت وعدد ماخ في الجريان القابل للانضغاط.
- ✓ تطوير العلاقات التي تحدد البارامترات في الجريانات الإيزونتروبية للغازات المثالية.
- ✓ تطوير العلاقات لجريان إيزونتروبية للغازات المثالية بدلالة نسب الحرارة النوعية وعدد ماخ.
- ✓ اشتقاق علاقة تأثير تغيير المقطع في لجريان إيزونتروبي أحادي البعد تحت صوتي وفوق صوتي وتحديد المقطع الحرج ضمن القناة.
- ✓ تحليل الجريانات الإيزونتروبية ضمن أقنية متقاربة ومتباعدة ومتقاربة متباعدة وتأثير الضغط الخلفي في الجريان.
- ✓ تعريف الصدمات وأنواعها وحساب البارامترات المتعلقة بها.
- ✓ تطوير فكرة الجريان في قناة معزولة ذات مقطع ثابت مع احتكاك والذي يسمى بجريان فانو *Fanno Flow*.
- ✓ تطوير فكرة الجريان في قناة غير معزولة ذات قطع ثابت ومن دون الاحتكاك والذي يسمى بجريان ريلية *Rayleigh Flow*

محتويات هذا الفصل.

		الصفحة
1.9	بارامترات الركود.	616
2.9	سرعة الصوت وعدد ماخ.	623
3.9	جريان إيزونتروبي أحادي البعد لغاز مثالي.	627
1.3.9	معادلات بارامترات الغاز المثالي بدلالة عدد ماخ والركود.	634
2.3.9	معادلات بارامترات الغاز المثالي بدلالة مقطع القناة.	638
4.9	الجريان الإيزونتروبي في الأقنية.	641
1.4.9	الأقنية المتقاربة.	641
2.4.9	الأقنية المتقاربة – المتباعدة.	661
5.9	ترموديناميك موجات الصدم.	667
1.5.9	الصدمات الشاقولية.	667
2.5.9	الصدمات المائلة.	670
6.9	تاثير الاحتكاك والتبادل الحراري على الجريان في الأقنية.	673
1.6.9	جريان فانو.	673
2.6.9	جريان ريليه.	678
ملخص الفصل.		684
مسائل غير محلولة.		687
نهاية الفصل.		688

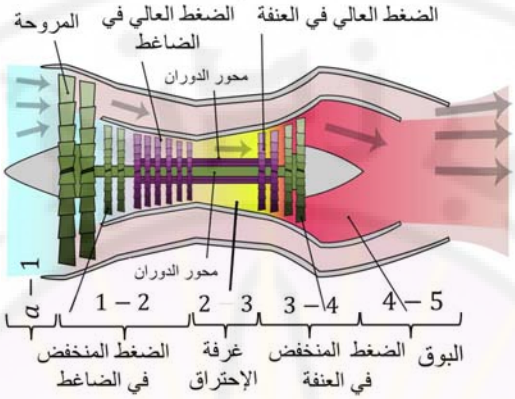
1.9 بارامترات الركود *Stagnation Properties*.

سندرس حركة وبارامترات الغاز المثالي (هواء جاف أو بخار أو هواء رطب) في الأقنية *Ducts* ذات المقاطع الثابتة والمتغيرة ونحدد فيما لو كان تدفق هذه الغازات يُحدث ما يسمى صدمات *Shocks* عامودية أو مائلة على طول تلك القناة. تسمى الأقنية التي تعمل على زيادة سرعة الغاز بالنفاثة أو البوق *Nozzles* (الحركة متسارعة) وتسمى الأقنية التي تعمل على تخفيض سرعة الغاز بالناشرة *Diffusers* (الحركة متباطئة) كما في الشكل (1–9).



الشكل (1–9) الأقنية المتقاربة والمتباعدة.

هناك الكثير من التطبيقات الهندسية التي تتحرك فيها الغازات بسرعات عالية (تحت وفوق صوتية) وتتغير فيها كثافتها. من إحدى هذه التطبيقات الهندسية محرك الدفع التوربيني *Turbojet Engine* المستخدم في الطائرات كما هو مبين في الشكل (2–9). يستخدم محرك الدفع التوربيني أقنية لتخفيض سرعة الهواء الداخل إلى الضاغط وتسريع غازات العادم الخارجة من العنفة لتحقيق الدفع المناسب للطائرة. يتألف المحرك من ثلاث مراحل:



الشكل (9–2) أقسام المحرك الدفع التوربيني.

♥) الديفيوزر (الناشرة *Diffuser*) في القسم $(a - 1)$.

♥) مولد الغاز *Gas Generator* والذي يتألف من ضاغط *Compressor* في القسم $(1 -$ 2) و غرفة الاحتراق *Combustors* في القسم $(2 - 3)$ وتوربين *Turbine* في القسم $(3 -$ 4).

♥) النفاثة (البوق *Nozzle*) في القسم $(4 - 5)$.

يوضع الديفيوزر قبل الضاغط ليخفض من سرعة الهواء الداخل إلى المحرك (الوضع 1) ونتيجة هذا التباطؤ يرتفع الضغط الستاتيكي وينخفض الضغط الديناميكي. يسمى هذا الارتفاع في الضغط الستاتيكي بعتبة الرفع *Ram Effect*. تتمدد الغازات المحترقة الخارجة من التوربين (الوضع 4) ضمن النفاثة إلى سرعات عالية قبل دفقها إلى الوسط الخارجي محققة الدفع المناسب للطائرة.

في الجريانات ذات السرعات العالية لا يمكن إهمال الطاقة الحركية لوسيط التشغيل لذلك يجب علينا إيجاد بارامتر جديد يعبر عن المحتوى الطاقي لوسيط التشغيل وطاقته الحركية. يسمى هذا البارامتر باسم إنتالبي الركود *Stagnation Enthalpy* ويعطى الرمز (H_o) أو يعطى بالنسبة إلى واحدة الكتل باسم إنتالبي الركود النوعي بحسب العلاقة

$$h_o = h + \frac{V^2}{2} \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \tag{1-9}$$

تعني تسمية الركود دراسة حالة وسيط التشغيل عند لحظة ساكنة نعد فيها الوسيط المتحرك في تلك اللحظة ثابتاً. يتألف إنتالبي الركود، كما تبين العلاقة (1−9)، من المحتوى الطاقي لوسيط التشغيل عند حالة ما **مضافاً** إليه الطاقه الناتجة عن توقف وسيط التشغيل وبشكل مباشر أدياباتياً (الطاقة الحركية في تلك الحالة). نكون بهذه العملية قد حولنا هذه النظام من نظام متحرك إلى نظام ثابت أو غير متحرك *Stationary*. يعرف (h) في العلاقة (1−9) بالإنتالبي الستاتيكي *Static Enthalpy* للتمييز بينه وبين إنتالبي الركود. يمكن أيضاً تعريف بارامترات ترموديناميكية الأخرى للجريانات ذات السرعات العالية ببارامترات الركود *Stagnation Properties* مثل درجة حرارة الركود وضغط الركود وكثافة الركود إلخ. عندما تكون العملية عكوسة وأدياباتية فإن حالة الركود التي تصف هذه العملية تسمى بحالة الركود الإيزونتروبي *Isentropic Stagnation State*.

إذا قمنا بتطبيق قانون انحفاظ الطاقة (القانون الأول في الترموديناميك) على وسيط ما يتحرك ضمن قناة (بوق أو ناشرة) وبشكل مستقر نجد أن قانون الأول في الترموديناميك لنظام مفتوح يعطى بالشكل

$$\left(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in}\right) + \sum_{in} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) = \left(\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out}\right) + \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \qquad (kW)$$

بفرض أن هذه القناة معزولة حرارياً (أدياباتية) وبفرض عدم وجود تبادل طاقي على شكل عمل مع الوسط الخارجي وبفرض أن التغييرات في الطاقة الكامنة مهملة تتحول معادلة التوازن الطاقي إلى

$$(0) + \sum_{in} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + 0\right) = (0) + \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + 0\right)$$

وبتطبيق قانون انحفاظ الكتلة على قناة ذات مدخل ومخرج واحد نجد

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = \dot{m}$$

فتتحول معادلة التوازن الطاقي ضمن قناة (بوق أو ناشرة) إلى

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

أي أن إنتالبي الركود يبقى محفوظاً بين الحالة الأولى والثانية

$$h_{o1} = h_{o2} \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \tag{2-9}$$

تبين العلاقة (2−9) أن إنتالبي الركود يبقى ثابتاً في الجريانات المستقرة وضمن الشروط السابقة. نلاحظ أيضاً من العلاقة السابقة أن زيادة سرعة وسيط التشغيل ضمن هذه الأجهزة يؤدي إلى انخفاض في الإنتالبي الستاتيكي لأن إنتالبي الركود محفوظ والعكس صحيح. من أجل وسيط تشغيل غازي مثالي يمكن أن نعوض الإنتالبي بدلالة الحرارة النوعية عند ضغط ثابت

$$h = c_P * T$$

$$h_o = c_P * T_o$$

أي أن تعريف إنتالبي الركود يتحول إلى

$$T_o = T + \frac{V^2}{2c_P}$$

بالتعويض في العلاقة (2−9) نجد أن

$$T_{o1} = T_{o2} \quad (K) \tag{3-9}$$

تسمى (T_o) بدرجة حرارة الركود الكلية *Total Stagnation Temperature* وتمثل درجة حرارة الوسيط المثالي عند توقفه بشكل مباشر أدياباتياً. العنصر $(V^2/2c_P)$ يسمى

بدرجة الحرارة الديناميكية *Dynamics Temperature* والتي تمثل الزيادة في درجة حرارة الوسيط عند تحولها وبشكل كامل إلى حرارة خلال العملية نفسها فمثلاً درجة الحرارة الديناميكية لهواء يتحرك بسرعة $(100m/s)$ هي

$$\frac{V^2}{2c_P} = \frac{(100\ m/s)^2}{2 * 1.005\ kJ/kgK} = 5\ K$$

وإذا كانت درجة حرارة الهواء المتحرك هي $(300K)$ وإذا أردنا دراسته على أساس أنه هواء ثابت فإن درجة حرارته يجب أن تكون $(305K)$ أي أن الطاقة الحركية أدت إلى رفع درجة حرارة الهواء بمقدار $(5\ K)$.

عند تطبيق القانون الأول في الترموديناميك على هذه الأنظمة والتي يتحرك فيها وسيط التشغيل بسرعات عالية فإن الطاقة الحركية لاتظهر في هذه المعادلات بسبب استخدام بارامترات الركود كما في المعادلة التالية للأنظمة المفتوحة والمستقرة

$$q_{in} + w_{in} + (h_{o1} + gz_1) = q_{out} + w_{out} + (h_{o2} + gz_2) \qquad (4\text{-}9)$$

وعندما يكون وسيط التشغيل غازاً مثالياً فتتحول المعادلة إلى الشكل

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = c_P(T_{o2} - T_{o1}) + g(z_2 - z_1)\ \ \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (5\text{-}9)$$

المثال التطبيقي 9–1 – انضغاط الهواء عند حركة الطائرة بسرعة عالية.

تتحرك طائرة بسرعة $(250\ m/s)$ على ارتفاع $(5000\ m)$ من فوق سطح الأرض حيث أن الضغط في ذاك الارتفاع هو $(54.05\ kPa)$ ودرجة الحرارة هي $(255.7\ K)$. بفرض أن العملية داخل نفاثة محرك الطائرة إيزونتروبية حدد 1) ضغط الركود عند مدخل الضاغط و2) عمل الضاغط النوعي إذا كانت نسبة ضغط الركود هي (8).

الفرضيات: 1) العمليات في الضاغط والنفاثة هي عمليات إيزونتروبية 2) الهواء غاز مثالي والحرارة النوعية ثابتة وتأخذ عند درجة حرارة الغرفة.

التحليل: 1) بما أن عملية الانضغاط إيزونتروبية (أدياباتية عكوسة) أي أن ضغط الركود يخضع للعلاقة

$$P_{o1} = P_1 \left(\frac{T_{o1}}{T_1}\right)^{k/k-1}$$

يجب تحديد درجة حرارة الركود عند مدخل الضاغط

$$T_{o1} = T_1 + \frac{V_1^2}{2c_p}$$

$$T_{o1} = 255.7\ K + \frac{\frac{(250)^2}{1000}\left(\frac{m}{s}\right)^2}{2 * 1.005\ \frac{kJ}{kg\ K}}$$

علاقة التحويل

$$\frac{kJ}{kg} = \frac{1000N * m}{kg} = 1000 * \left(kg * \frac{m}{s^2}\right)\frac{m}{kg} = 1000\left(\frac{m}{s}\right)^2$$

$$T_{o1} = 286.8\ K$$

بالتعويض نجد أن ضغط الركود

$$P_{o1} = 54.05\ kPa * \left(\frac{286.8\ K}{255.7\ K}\right)^{1.4/0.4}$$

$$P_{o1} = 80.77\ kPa$$

أي أن درجة حرارة الهواء ارتفعت بمقدار (31.1℃) وارتفع الضغط بمقدار ($26.72\ kPa$) عندما تتناقص سرعة الهواء من ($250\ m/s$) إلى الصفر نتيجة تحول الطاقة الحركية إلى طاقة حرارية وميكانيكية (إنتالبي). يمكن أيضاً حساب ضغط الركود من تعريف حالة الركود للضغط بالعلاقة

$$P_{o1} = P_1 + \rho_1 \frac{V_1^2}{2}$$

حيث

$$\rho_1 = \frac{RT_1}{P_1}$$

2) يمكن تحديد عمل الضاغط من معادلة التوازن الطاقي لنظام مفتوح وباستخدام الهواء كغاز مثالي

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = c_P(T_{o2} - T_{o1}) + g(gz_2 - gz_1)$$

بما أن الضاغط معزول أي لاتبادل في الحرارة بين الضاغط والوسط الخارجي وبإهمال الطاقة الكامنة تتحول معادلة القانون الأول في الترموديناميك إلى

$$(0) + (w_{in} - 0) = c_P(T_{o2} - T_{o1}) + 0$$

$$w_{in} = c_P(T_{o2} - T_{o1})$$

درجة الحرارة النهائية تحدد من نسبة ضغط الضاغط وباستخدام العلاقات الإيزونتروبية وعلاقة الغاز المثالي

$$Pv^k = Tv^{(k-1)} = P^{(1-k)}T^k = constant$$

$$T_{o2} = T_{o1} * \left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}}\right)^{k-1/k}$$

$$T_{o2} = 286.8\ K * (8)^{0.4/1.4}$$

$$T_{o2} = 519.5\ K$$

بالتعويض في علاقة العمل نجد

$$w_{in} = 1.005\ \frac{kJ}{kg\ K} * (519.5\ K - 286.8\ K)$$

$$w_{in} = 233.9\ kJ/kg$$

2.9 سرعة الصوت وعدد ماخ.

تنشأ موجة الصوت عند تغيير بسيط في الضغط وتنتشر هذه الموجة بسرعة مقدارها (C) تسمى سرعة الصوت *Speed of Sound* أو السرعة الصوتية *Sonic Speed*. تتغير قيمة هذه السرعة بحسب مواصفات الوسيط الناقل لها (مادة غازية أو مادة سائلة أو مادة صلبة). لاستنتاج علاقة سرعة الصوت نقوم بتحريك مكبس وبسرعة (V) فتتولد موجة ضغط تنتشر باتجاه حركة المكبس بسرعة (C).

- باستخدام معادلة انحفاظ الكتلة *Conservation of Mass* وباعتبار ان الحالة مستقرة *Steady State*

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\rho * A * C = (\rho + d\rho) * A * (C - dV)$$

(dV) هو التغيير في سرعة المكبس والعنصر $(C - dV)$ هو السرعة النسبية بين الموجة والمكبس. بفك الأقواس نجد

$$\rho AC = \rho AC - \rho AdV + ACd\rho - AdVd\rho$$

وبما أن التغيير $AdVd\rho \approx 0$ صغير جداً يمكن إهماله

$$C * d\rho - \rho * dV = 0 \qquad \text{(a)}$$

وبالتالي

$$dV = \left(\frac{C}{\rho}\right) d\rho$$

- وأيضاً باستخدام معادلة انحفاظ الطاقة لنظام مفتوح مستقر نجد أن

$$h + \frac{C^2}{2} = (h + dh) + \frac{(C - dV)^2}{2}$$

بفك الأقواس نجد أن وبإهمال العنصر $([dV]^2)$

$$dh - C * dV = 0 \qquad \text{(b)}$$

- باستخدام علاقة الإنتروبي الناتجة من القانون الأول في الترموديناميك لنظام مفتوح ولغاز مثالي

$$\delta Q - \delta W = du$$

$$Tds - Pdv = du$$

ولكن

$$dh = du + Pdv + vdP$$

$$Tds = dh - \frac{dP}{\rho}$$

باعتبار أن الجريان إيزونتروبي $(ds = 0)$

$$dh = \frac{dP}{\rho} \qquad \text{(c)}$$

بحل المعادلات (a, b, c) نجد أن علاقة السرعة في جريان إيزونتروبي هي

$$C^2 = \left(\frac{dP}{d\rho}\right)_s \qquad \text{(6-9)}$$

أو يمكن كتابتها بحسب العلاقات الترموديناميكية من الشكل

$$C^2 = k\left(\frac{dP}{d\rho}\right)_T \qquad \text{(7-9)}$$

حيث (k) المعامل الأدياباتي. يمكن استخراج هذه العلاقة أيضاً من معادلة انحفاظ الطاقة الحركية *Conservation of Momentum* في اتجاه الحركة مع إهمال قوى الجاذبية وكافة الإجهادات *Stresses*

$$PA - (P + dP)A = \dot{m}\,(C - dV) - \dot{m}\,C$$

$$dP = \rho\, C\, dV$$

بتعويض (dV) المستنتجة من معادلة انحفاظ الكتلة نجد أن

$$C^2 = \left(\frac{dP}{d\rho}\right)_s$$

عندما يكون الوسيط المتحرك غازاً مثالياً تعطى علاقة سرعة الصوت بالشكل

$$C^2 = k\left(\frac{dP}{d\rho}\right)_T$$

$$C^2 = k\left(\frac{d(\rho RT)}{d\rho}\right)_T = kRT$$

وبالتالي

$$C = \sqrt{kRT} = \sqrt{kPv} \quad (m/s) \qquad (8\text{-}9)$$

حيث أن (k) هو المعامل الأدياباتي و$(R, J/kgK)$ ثابت الغاز للوسيط المتحرك. يُعرف عدد ماخ *Mach Number* بنسبة سرعة جسم ما في وسط ما إلى السرعة الصوتية لهذا الجسم في نفس الوسط ويعبر عنه بالعلاقة

$$Ma = \frac{V}{C} \qquad (9\text{-}9)$$

إن عدد ماخ هو عدد لابعدي كما هو واضح في العلاقة (9−9). يمكن أن نوصف حالات الجريان ضمن قناة باستخدام عدد ماخ اللابعدي كما يلي

$(Ma < 0.3)$ جريان غير قابل للانضغاط.

$(0.3 < Ma < 0.8)$ جريان تحت الصوتي *Subsonic* حيث أن تغيير الكثافة مهم ولكن لا وجود إلى موجات الصدم *Shock Waves*.

$(0.8 < Ma < 1.2)$ جريان قريب من سرعة الصوت *Transonic* تظهر فيه موجات صدم تفصل بين الجريان تحت الصوتي والجريان فوق الصوتي.

$(Ma = 1)$ جريان صوتي *Sonic*.

$(1.2 < Ma < 3)$ جريان فوق الصوتي *Supersonic* تظهر فيه موجات الصدم ولا يمكن ظهور جريانات تحت صوتية.

$(\mathrm{Ma} > 3)$ جريان مابعد فوق صوتي *Hypersonic*.

المثال التطبيقي 9-2 – عدد ماخ لجريان هواء في ناشرة.

يدخل هواء إلى ناشرة بسرعة ($200\ m/s$)، حدد 1) سرعة الصوت و2) عدد ماخ عند مدخل الناشرة عندما تكون درجة حرارة الهواء (30°C).

الفرضيات: 1) الهواء غاز مثالي 2) الطاقة الكامنة مهملة 3) الناشرة معزولة.

التحليل: من الجداول نجد أن الهواء عند درجة حرارة (30°C) له المواصفات التالية

$$R = 287\frac{J}{kgK} = 287\frac{m^2}{s^2K}$$

$$k = 1.4$$

السرعة الصوتية للهواء هي

$$C = \sqrt{kRT} = \sqrt{kPv}$$

$$C = \sqrt{1.4 * 287\ \frac{m^2}{s^2K} * 303\ K}$$

$$C = 349\ m/s$$

يعطى عدد ماخ بالعلاقة

$$Ma = \frac{V}{C}$$

$$Ma = \frac{200}{349}$$

$$Ma = 0.573$$

بما أن ($Ma < 1$) الجريان تحت صوتي وتتغير فيه الكثافة ولاتظهر فيه الصدمات.

3.9 جريان إيزونتروبي أحادي البعد *One-Dimensional Isentropic Flow* لغاز مثالي.

في الكثير من التطبيقات الهندسية مثل النفاثات (الأبواق) أو النواشر أو الممرات الموجودة في ريش العنفات يتغير التدفق في اتجاه حركة وسيط التشغيل. يمكن اعتبار هذا الجريان جرياناً إيزونتروبياً أحادي البعد وبدقة عالية ومن دون خسارة كبيرة في المعلومات.

لتحديد ما إذا كانت النواشر أو النفاثات متباعدة *Diverging* أو متقاربة *Converging* أو متباعدة ومتقاربة *Converging-Diverging Shape*، يجب أن نستخدم قوانين انحفاظ الكتلة والطاقة على هذه الأشكال.

- لنبدأ باختيار سطح التحكم المغلق لقناة مع تطبيق معادلة انحفاظ الكتلة لجريان ما مستقر ضمنها فنجد

$$\dot{m} = \rho * V * A = constant$$

بمفاضلة العلاقة نجد أن

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} + \frac{dA}{A} = 0 \qquad (10\text{-}9)$$

أما معادلة انحفاظ الطاقة لنفس سطح التحكم فتكون بالشكل

$$\dot{Q} + \sum_{inlet} \dot{m}_{in} \left(h + \frac{\vec{V}^2}{2} + gz \right)_{in} = \dot{W} + \sum_{outlet} \dot{m}_{out} \left(h + \frac{\vec{V}^2}{2} + gz \right)_{out}$$

بما أن العمل وكمية الحرارة هي كميات مهملة في الناشرة وبإهمال الطاقة الكامنة

$$0 + \sum_{inlet} \dot{m}_{in} \left(h + \frac{\vec{V}^2}{2} + gz \right)_{in} = 0 + \sum_{outlet} \dot{m}_{out} \left(h + \frac{\vec{V}^2}{2} + gz \right)_{out}$$

وبما أن الكتلة ثابتة لوجود مدخل واحد ومخرج واحد فتتحول المعادلة إلى

$$\left(h + \frac{V^2}{2} \right)_{in} = \left(h + \frac{V^2}{2} \right)_{out} = constant$$

بمفاضلة المعادلة السابقة نجد أن

$$dh + VdV = 0 \qquad (11\text{-}9)$$

تظهر المعادلة (11−9) أنه إذا **ازدادت** (أو تناقصت) السرعة في اتجاه الجريان فإن الإنتالبي يجب أن **ينقص** (أو يزداد) في الاتجاه نفسه.

- بفرض أن الجريان الآن هو جريان إيزونتروبي (أدياباتي عكوس، $ds = 0$) فيمكن أن نستنتج من علاقة القانون الأول أن

$$dh - \frac{dP}{\rho} = T\,ds$$

وبالتالي

$$dh - \frac{dP}{\rho} = 0 \qquad (12\text{-}9)$$

تظهر المعادلة (12−9) السابقة إلى أنه إذا **تزايد** (أو تناقص) الضغط في اتجاه الجريان فإن الإنتالبي يجب أن يتبع هذه التغييرات أيضاً في الاتجاه نفسه.

- بمقارنة العلاقة (11−9) والعلاقة (12−9) نجد أن

$$\frac{1}{\rho}dP + V\,dV = 0 \qquad (13\text{-}9)$$

تظهر المعادلة (13−9) إلى أنه إذا **إزدادت** (أو تناقصت) السرعة في اتجاه الجريان فإن الضغط يتناقص (أو يتزايد) ايضاً في نفس الاتجاه.

- بمفاضلة علاقة الضغط في جريان إيزونتروبي نجد أن

$$P = P(\rho, s)$$

$$dP = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s d\rho + \left(\frac{\partial P}{\partial s}\right)_\rho ds$$

وبتعويض علاقة سرعة الصوت في المعادلة السابقة نجد

$$dP = C^2\, d\rho \qquad (14\text{-}9)$$

باستخدام معادلة انحفاظ الكتلة (9–10)

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} + \frac{dA}{A} = 0$$

وعلاقة الضغط بالسرعة (9–13)

$$\frac{d\rho}{\rho} - \frac{1}{\rho V^2} dP + \frac{dA}{A} = 0$$

وعلاقة الضغط بالسرعة الصوتية (9–14)

$$\frac{dP}{\rho C^2} - \frac{1}{\rho V^2} dP + \frac{dA}{A} = 0$$

يمكن الحصول على العلاقة التي تربط بين تغييرات مقطع القناة والسرعة وعدد ماخ بالشكل التالي

$$\frac{dA}{A} = (1 - Ma^2)\, \frac{dP}{\rho V^2} \qquad (15\text{-}9)$$

نجد من المعادلة (9–15) السابقة العلاقة بين الضغط (P) ومقطع القناة (A). القيم (A, ρ, V) هي قيم موجبة وبالتالي إشارة العلاقة تتبع إلى إشارة العنصر $(1 - Ma^2)$ فإذا كان عدد ماخ أقل من الواحد (جريان تحت صوتي) يكون التغيير في الضغط والمقطع متوافقاً أي أن الضغط يزداد مع ازدياد المقطع (نفاثة) ويتناقص مع نقصان المقطع (ناشرة). عندما يكون عدد ماخ أكبر من الواحد (جريان فوق صوتي) يكون الضغط والمقطع متعاكسين أي مع ازدياد الضغط يتناقص المقطع ويتناقص مع زيادة المقطع.
يمكن أيضاً أن نكتب المعادلة (9–15) من العلاقة (9–13) بالشكل

$$\frac{dA}{A} = (Ma^2 - 1)\, \frac{dV}{V} \qquad (16\text{-}9)$$

تحدد المعادلة (9–16) العلاقة بين السرعة (V) ومقطع القناة (A)، هنا القيم (A,V) هي قيم موجبة وبالتالي إشارة العلاقة تتبع إلى قيمة (Ma^2-1). يمكن مناقشة ثلاث حالات مختلفة.

- الحالة الأولى جريان تحت الصوتي (*Subsonic*). يكون في هذه الحالة عدد ماخ أقل من الواحد $(Ma<1)$ أي أن

$$(Ma^2-1)<0$$

بالتعويض في المعادلة (9–15) و (9–16) نجد أن

$$\frac{dA}{A}=(const)\,\frac{dP}{\rho V^2}$$

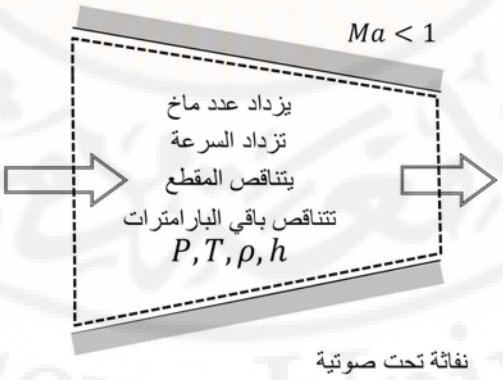
$$\frac{dA}{A}=(-const)\frac{dV}{V}$$

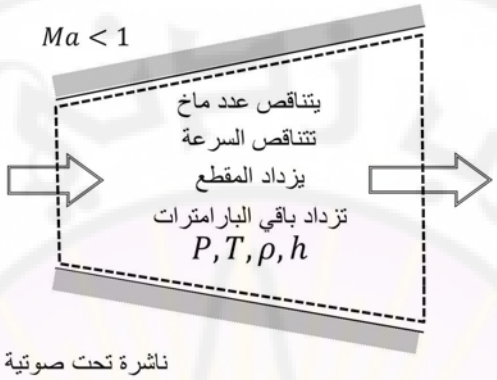
هذا يؤدي إلى الحالات التالية

1- $(dA>0 \rightarrow dV<0)$ تكون القناة تتوسع *Diverges* في اتجاه الجريان أي أن القناة هي قناة ناشرة *Diffuser*.

2- $(dA<0 \rightarrow dV>0)$ تكون القناة تتضيق *Converges* في اتجاه الجريان أي أن القناة هي قناة نفاثة (بوق) *Nozzle*.

يوضح الشكل (3–9) البارامترات لناشرة ونفائة في جريان تحت صوتي.





الشكل (3–9) جريان تحت الصوتي (*Subsonic*) في نفاثة وناشرة.

- الحالة الثانية جريان فوق الصوتي (*Supersonic*). يكون في هذه الحالة عدد ماخ أكبر من الواحد $(Ma > 1)$ أي أن

$$(Ma^2 - 1) > 0$$

بالتعويض في المعادلة (9–15) و (9–16) نجد أن

$$\frac{dA}{A} = (-const)\ \frac{dP}{\rho V^2}$$

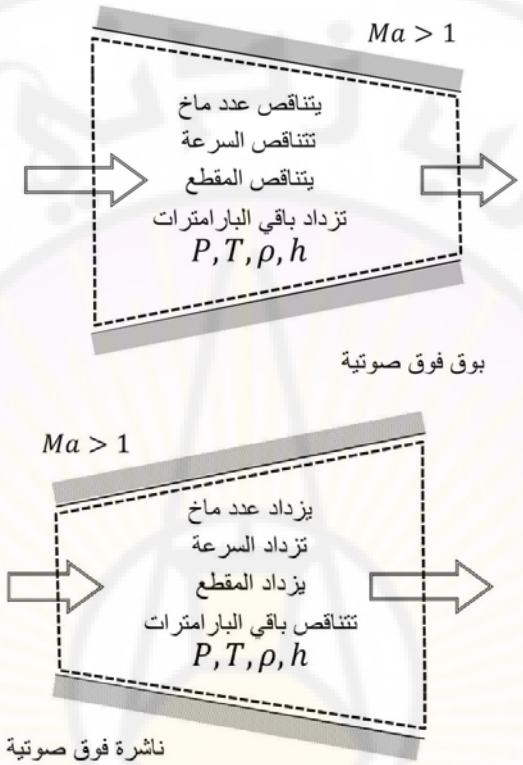
$$\frac{dA}{A} = (const)\frac{dV}{V}$$

هذا يؤدي إلى الحالات التالية

1- $(dA > 0 \rightarrow dV > 0)$ تكون القناة تتوسع *Diverges* في اتجاه الجريان أي أن القناة هي ناشرة *Diffuser*.

2- $(dA < 0 \rightarrow dV < 0)$ تكون القناة تتضيق *Converges* في اتجاه الجريان أي أن القناة هي نفاثة (بوق) *Nozzle*.

يوضح الشكل (4–9) البارامترات لناشرة ونفاثة في جريان فوق صوتي.



الشكل (4−9) جريان فوق الصوتي (*Supersonic*).

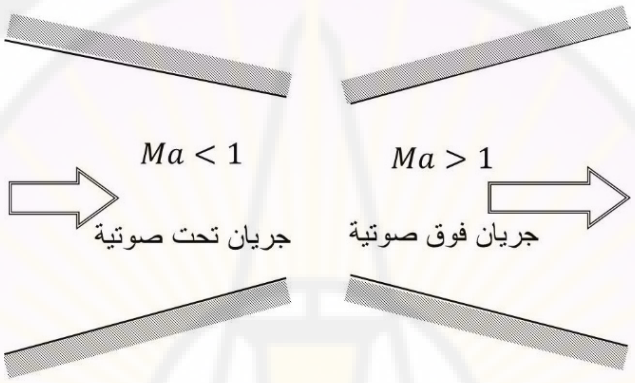
- الحالة الثالثة الجريان صوتي (*Sonic*). يكون في هذه الحالة عدد ماخ يساوي الواحد $(Ma = 1)$ وفي هذه الحالة لايوجد تغييرات في مقطع القناة سواء كانت ناشرة أو نفاثة.

$$\frac{dA}{A} = 0$$

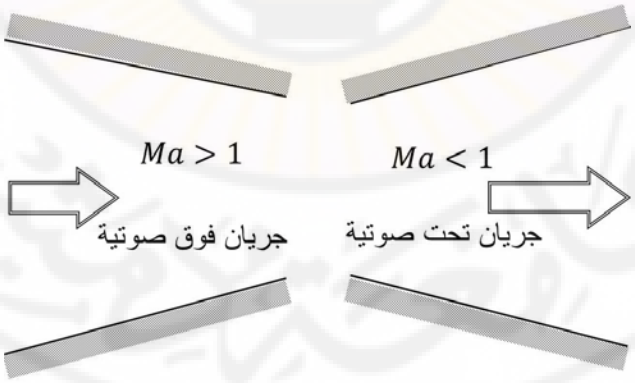
$$A = constant$$

يسمى هذا المقطع بالعنق *Throat* وكافة بارامترات الغاز في هذا المقطع تسمى بالبارامترات الحرجة *Critical Parameters* و تعطى إشارة (*). نجد من العلاقات السابقة

إلى أنه إذا أردنا تسريع جريان ما يتحرك بسرعة تحت صوتية ($Ma < 1$) كما في الشكل (9–5) فإننا بحاجة أولاً إلى نفاثة *Nozzle* حتى نصل إلى السرع الصوتية ($Ma = 1$) وبعدها نحتاج إلى ناشرة *Diffuser* للوصول إلى السرع فوق الصوتية ($Ma > 1$).



الشكل (9–5) الحصول على سرع فوق صوتية بتغيير نوع القناة.



الشكل (9–6) الحصول على سرع تحت صوتية بتغيير نوع القناة.

أما إذا أردنا تخفيض سرعة جريان ما يتحرك بسرعة فوق صوتية $(Ma > 1)$ كما في الشكل (6−9) فإننا بحاجة إلى نفاثة *Nozzle* حتى نصل إلى السرع الصوتية $(Ma = 1)$ وبعدها نحتاج إلى إلى ناشرة *Diffuser* للوصول إلى السرع تحت الصوتية $(Ma < 1)$.

1.3.9 معادلات بارامترات الغاز المثالي بدلالة عدد ماخ والركود.

يمكن كتابة علاقات بارامترات الغاز المثالي ذات الحرارة النوعية الثابتة بدلالة بارامترات الركود وعدد ماخ في الجريانات الإيزونتروبية كما يلي

$$\alpha = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{(-1)}$$

وبالتالي

$$\frac{T}{T_o} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{(-1)} = \alpha \qquad (17\text{-}9)$$

$$\frac{P}{P_o} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{k/(k-1)} = (\alpha)^{k/k-1} \qquad (18\text{-}9)$$

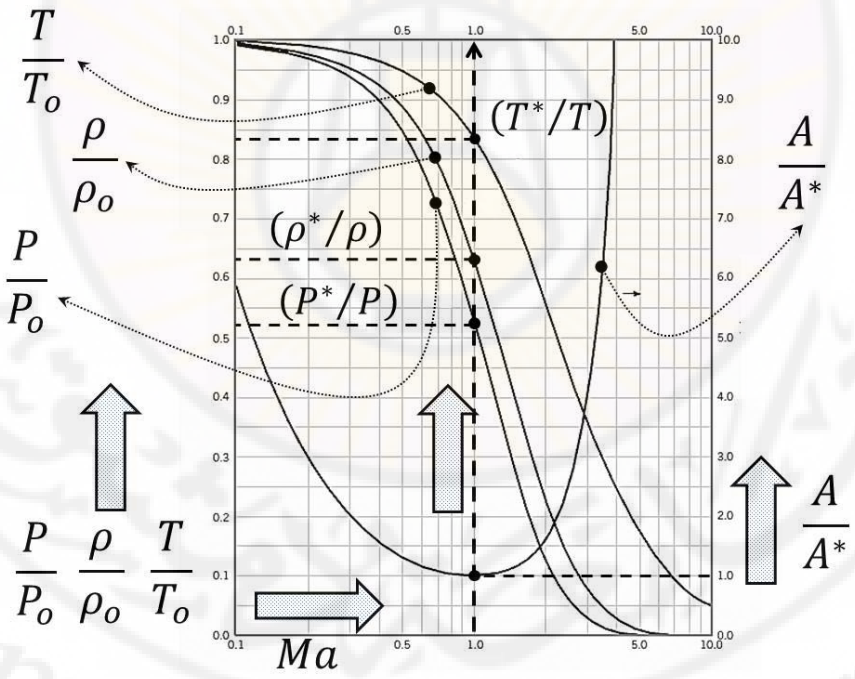
$$\frac{\rho}{\rho_o} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{1/(k-1)} = (\alpha)^{1/k-1} \qquad (19\text{-}9)$$

$$\frac{C}{C_o} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{1/2} = (\alpha)^{1/2} \qquad (20\text{-}9)$$

يبين الجدول (1−9) بعض القيم لعلاقة عدد ماخ مع نسب الضغط ودرجة الحرارة ونسبة المقطع للهواء في جريان إيزونتروبي. يوضح الشكل (7−9) العلاقة بين البارامترات السابقة حيث يبين المحور اليميني قيم نسبة المقطع ويبين المحور اليساري قيم نسب الضغط ونسب الكثافة ونسب درجة الحرارة ويبين المحور الأفقي قيم عدد ماخ. يجب الانتباه إلى أن المخطط المبين هو مخطط لوغاريتمي.

الجدول (1–9) علاقة بارامترات وسيط التشغيل وعدد ماخ في جريان إيزونتروبي.

Ma	T/T_o	P/P_o	ρ/ρ_o	A/A^*
0.5	0.952	0.843	0.8852	1.3398
1	**0.833**	**0.528**	**0.6339**	**1**
2	0.555	0.1278	0.2300	1.6875
3	0.3571	0.0272	0.076	4.2346
5	0.1667	0.0019	0.0113	25
∞	0	0	0	∞



الشكل (7–9) بارامترات الغاز المثالي بدلالة بارامترات الركود وعدد ماخ في الجريانات الإيزونتروبية.

من أجل سرع صوتية $(Ma = 1)$ تتحول هذه البارامترات إلى بارامترات حرجة وتعطى بالشكل

$$\beta = \frac{2}{k+1}$$

وبالتالي

$$\frac{T^*}{T_o} = \frac{2}{k+1} = \beta \qquad (21\text{-}9)$$

$$\frac{P^*}{P_o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/k-1} = (\beta)^{k/k-1} \qquad (22\text{-}9)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/k-1} = (\beta)^{1/k-1} \qquad (23\text{-}9)$$

$$\frac{C^*}{C_o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/2} = (\beta)^{1/2} \qquad (24\text{-}9)$$

تعطى النسب السابقة بدلالة عدد ماخ ضمن جداول معينة وبحسب نوع وسيط التشغيل فإذا كان وسيط التشغيل هو الهواء حيث $(k = 1.4)$ نجد أن هذه البارامترات تتحول إلى القيم التالية

$$\frac{T^*}{T_o} = 0.8333, \quad \frac{P^*}{P_o} = 0.5283$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_o} = 0.6339, \quad \frac{C^*}{C_o} = 0.9129$$

يبين الجدول (2–9) بعض البارامترات الحرجة لبعض الغازات المهمة

الجدول (9−2) قيم البارامترات الحرجة لبعض الغازات.

	بخار محمص	غازات الاحتراق	هواء	غازات أحادية الذرة
	$(k = 1.3)$	$(k = 1.33)$	$(k = 1.4)$	$(k = 1.667)$
(P^*/P_o)	0.5457	0.5404	**0.5283**	0.4871
(T^*/T_o)	0.8696	0.8584	**0.8333**	0.7499
(ρ^*/ρ_o)	0.6276	0.6295	**0.634**	0.6495

يبين أيضاً الشكل (7−9) محور البارامترات الحرجة والتي تقع على الخط $(Ma = 1)$.

المثال التطبيقي 9−3 – درجة الحرارة الحرجة والضغط الحرج في تدفق غاز.

احسب البارامترات الحرجة من ضغط ودرجة حرارة لغاز ثاني أوكسيد الكربون عندما تكون بارامترات الركود لهذا الغاز هي $[P_o = 1.4\ MPa, T_o = 473\ K]$.

الفرضيات: غاز ثاني أوكسيد الكربون هو غاز مثالي مع حرارة نوعية ثابتة.

التحليل: من جداول غاز ثاني أوكسيد الكربون نجد عند درجة حرارة الغرفة أن المعامل الأدياباتي لهذا الغاز هو

$$k = 1.289$$

تحسب درجة الحرارة الحرجة من العلاقة

$$\beta = \frac{2}{k+1}$$

$$\frac{T^*}{T_o} = \beta$$

$$\frac{T^*}{T_o} = \frac{2}{1.289 + 1}$$

$$\frac{T^*}{T_o} = 0.8737$$

$$T^* = T_o * 0.8737$$

$$T^* = 413\ K$$

أما الضغط الحرج فيحسب من العلاقة

$$\frac{P^*}{P_o} = (\beta)^{k/k-1}$$

$$\frac{P^*}{P_o} = \left(\frac{2}{1.289 + 1}\right)^{1.289/0.289}$$

$$\frac{P^*}{P_o} = 0.5477$$

$$P^* = P_o * 0.5477$$

$$P^* = 767\ kPa$$

2.3.9 معادلات بارامترات الغاز المثالي بدلالة المقطع القناة.

يمكن كتابة معادلات تغيير بارامترات الغازات المثالية بدلالة تغيير المقطع (A) فمن معادلة انحفاظ الكتلة

$$\dot{m} = \frac{A * V}{v} = constant$$

وتفاضلها نجد أن

$$\frac{dA}{A} = \frac{dv}{v} - \frac{dV}{V}$$

وباستبدال علاقة السرعة والمقطع (16–9) نجد

$$\frac{dA}{A} = \frac{dv}{v} - \frac{dA}{(Ma^2 - 1)A}$$

وباستبدال الحجم النوعي في الجريان الإيزونتروبي بالحرارة

$$\frac{dv}{v} = -\left(\frac{1}{k-1}\right)\frac{dT}{T}$$

$$\frac{dA}{A} = -\left(\frac{1}{k-1}\right)\frac{dT}{T} - \frac{dA}{(Ma^2 - 1)A}$$

نجد أن

$$\varepsilon = \frac{Ma^2}{Ma^2 - 1}$$

وبالتالي

$$\frac{dT}{T} = -\varepsilon * (k-1)\frac{dA}{A} \qquad (25\text{-}9)$$

$$\frac{dP}{P} = -\varepsilon * k\frac{dA}{A} \qquad (26\text{-}9)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\varepsilon * \frac{dA}{A} \qquad (27\text{-}9)$$

يمكن استخراج علاقة نسبة مقطع القناة إلى المقطع الحرج بمفاضلة معادلة عدد ماخ اللابعدي $(V^2 = (kRT)\,Ma^2)$

$$\frac{dV^2}{V^2} = \frac{dT}{T} + \frac{d(Ma^2)}{Ma^2}$$

واستخدام المعادلات السابقة وإجراء التكامل بين $(Ma^2, 1)$ وبين (A, A^*)

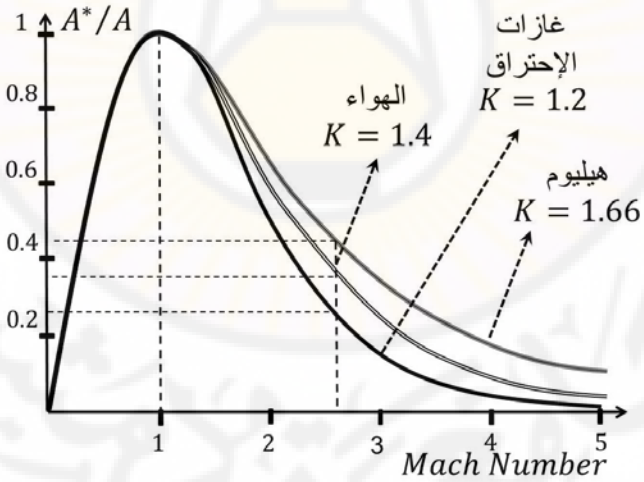
$$\gamma = \frac{k+1}{2(k-1)}$$

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{Ma}\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)\left(1+\frac{k-1}{2}Ma^2\right)\right]^{\gamma}$$

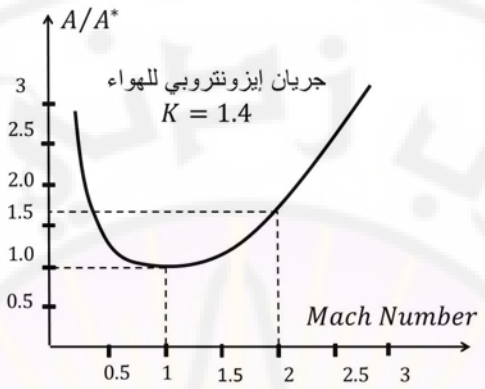
وبالتالي

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{Ma} * \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{\gamma} \qquad (28\text{-}9)$$

يبين الشكل (8–9) العلاقة بين عدد ماخ ونسب المقطع الحرج إلى مقطع القناة وأيضاً يبين الشكل (9–9) العلاقة نفسها ولكن يجب الانتباه إلى أن نسبة المقاطع مقلوبة ووسيط التشغيل هو الهواء فقط.



الشكل (8–9) العلاقة بين نسب المقطع مع عدد ماخ.



الشكل (9−9) العلاقة بين نسب المقطع مع عدد ماخ للهواء.

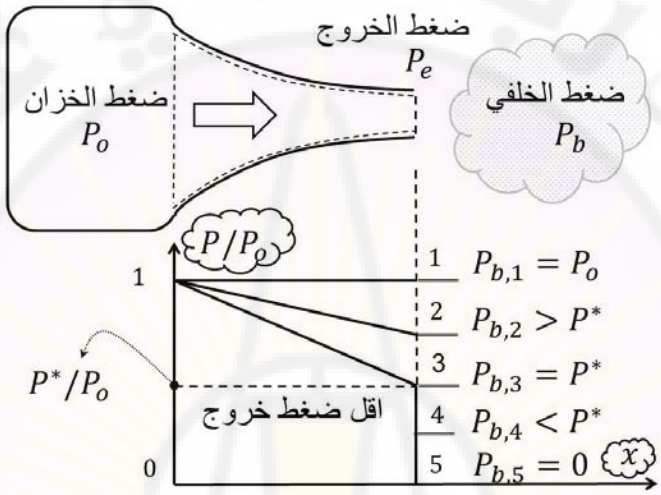
4.9 الجريان الإيزونتروبي في الأقنية *Isentropic Flow Through Nozzles*.

توجد الأقنية المتقاربة والمتباعدة في الكثير من التطبيقات الهندسية وخصوصاً في العنفات الغازية والبخارية ومحركات الطائرات وأجهزة الدفع الصاروخي حتى في أدوات اللحام *Torch* المستخدمة في الصناعة. في هذه الفقرة سوف نتحدث عن تأثير الضغط الخلفي *Back Pressure* على سرعة خروج الغازات وتدفقها من الأقنية وعلى توزع الضغط داخل الأقنية. يعرف الضغط الخلفي (P_b) بأنه الضغط الموجود خارج القناة أو المحيط بالقناة.

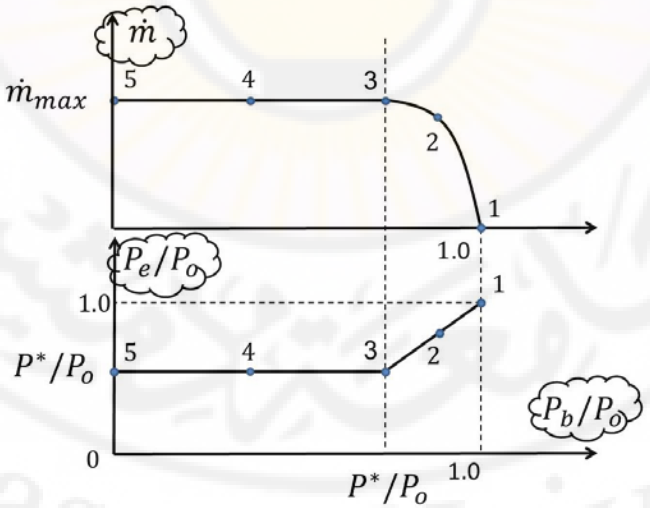
1.4.9 الأقنية المتقاربة *Converging Nozzles*.

بفرض أن لدينا جرياناً تحت صوتي إيزونتروبي في قناة متقاربة تتصل بخزان ذي ضغط ركود (P_o) ودرجة حرارة ركود (T_o). الخزان كبير جداً بحيث يمكن إهمال سرعة دخول الوسيط إلى القناة. الضغط عند فوهة القناة يسمى بضغط الخروج *Exit Pressure* ويعطى الرمز (P_e) أما الضغط خارج القناة فيسمى الضغط الخلفي ويعطى الرمز (P_b). يبين الشكل (9−10) قيم نسبة الضغط (P/P_o) على طول محور القناة (x). يبين الشكل (9−11) العلاقة بين التدفق ضمن القناة ونسبة ضغط الخلفي

(P_b/P_o). المحور العامودي يعطي بين نسبة ضغط الخروج (P_e/P_o) والتدفق ضمن القناة $(\dot{m})$ أما المحور الأفقي فيعطي نسبة الضغط الخلفي (P_b/P_o).



الشكل (10–9) تأثير الضغط الخلفي على توزع الضغط ضمن القناة.



الشكل (11–9) تأثير الضغط الخلفي على تدفق القناة وضغط الخروج.

نبدأ الأن بتخفيض الضغط الخلفي كما هو موضح بالشكل (9-10) فتظهر لدينا مجموعة من الحالات سنقوم على دراستها.

- **الحالة الأولى**. يكون في الحالة الأولى ضغط الخروج يساوي ضغط الركود (ضغط الخزان) وضغط الخروج أي ($P_b = P_e = P_o$) وبالتالي لايوجد فرق في الضغوط بين القناة والضغط الخارجي وبالتالي ينعدم التدفق من القناة. يمكن أن نمثل هذه النقطة بالرقم (1) على مخطط ($P/P_o, x$) المبين في الشكل (9-10). يبين الشكل (9-11) أن التدفق عند النقطة (1) معدوم والنسبة بين الضغط الخروج (P_e/P_o) والضغط الخلفي (P_b/P_o) متساوية.
- **الحالة الثانية**. يبدأ الضغط الخلفي (P_b/P_o) في الحالة الثانية بالتناقص ويظهر جرياناً تحت صوتي إلى أن تصبح قيمة ضغط الخروج مساوية لقيمة الضغط الخلفي ($P_b = P_e$) والتي تمثل بالنقطة (3) على مخطط ($P/P_o, x$). يبين الشكل (9-11) أن النقطة (3) تملك أعظم تدفق ويكون ضغط الخروج (P_e/P_o) مساوياً للضغط الحرج (P^*/P_o). تمثل النقطة (2) إحدى الحالات بين النقطة (1) والنقطة (3). يمكن كتابة علاقة التدفق بدلالة بارمترات الركود عند أي مقطع بين النقطة (1) والنقطة (3) بالعلاقة

$$\dot{m} = \rho * A * V \qquad (29\text{-}9)$$

بالتعويض نجد أن

$$\dot{m} = \left(\frac{P}{RT}\right) * A * \left(Ma * \sqrt{kRT}\right)$$

$$\dot{m} = P * A * \left(Ma * \sqrt{\frac{k}{RT}}\right)$$

نعوض علاقة درجة الحرارة (9-17)

$$\frac{T}{T_o} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{(-1)} = \alpha \rightarrow T = \alpha * T_o$$

وفي علاقة الضغط (9−18)

$$\frac{P}{P_o} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{k/(k-1)} = (\alpha)^{k/k-1} \rightarrow P = (\alpha)^{k/k-1} * P_o$$

بالتعويض في علاقة التدفق نجد

$$\dot{m} = \left[(\alpha)^{k/k-1} * P_o\right] * A * \left(Ma * \sqrt{\frac{k}{R * \alpha * T_o}}\right)$$

وبالتالي

$$\dot{m} = \alpha^{\gamma} * Ma * A * P_o \sqrt{\frac{k}{R * T_o}} \qquad (30\text{-}9)$$

يجب أن تكون واحدات ثابت الغاز (kJ/kgK) من أجل التخلص من الجذر. نلاحظ من العلاقة (9−30) أن التدفق يتعلق فقط ببارامترات الركود ووسيط التشغيل وعدد ماخ. نلاحظ أيضاً عند استخدام الهواء كوسيط تشغيل **يبقى** ضغط الخروج **مساوياً** للضغط الخلفي ضمن حدود العلاقة التالية

$$1 > \frac{P_e}{P_o} = \frac{P_b}{P_o} > 0.5283$$

حيث

$\left(1 > \frac{P_e}{P_o} = \frac{P_b}{P_o}\right)$ تمثل نسبة ضغط الخروج أي نقطة **بعد** النقطة (1) بالشكل (9−11). القيمة (1) هي تساوي ضغط الخروج مع ضغط الركود وإنعدام التدفق.

$\left(\frac{P_e}{P_o} = \frac{P_b}{P_o} > 0.5283\right)$ تمثل نسبة ضغط الخروج أي نقطة **قبل** النقطة (3) بالشكل (9−11). القيمة $\left(\frac{P^*}{P_o} = 0.5283\right)$ هي قيمة المقطع الحرج إلى ضغط الركود.

يرجى الانتباه هنا إلى واحدات التحويل هي

$$kPa * m^2 \Big/ \sqrt{\frac{kJ}{kg}} = \sqrt{1000}\ \frac{kg}{s}$$

✍ **<u>الحالة الثالثة</u>**. يبدأ التدفق في الحالة الثالثة بالتزايد ويبدأ الضغط في القناة بالتغير ويبدأ عدد ماخ بالتزايد مع تناقص الضغط الخلفي. عندما يصبح عدد ماخ عند فتحة الخروج مساوياً إلى الواحد (سرع صوتية) يصبح ضغط الخروج أعضمياً ومساوياً إلى الضغط الحرج (P^*) ويكون التدفق أعظمياً. يعطى التدفق الأعظمي بالعلاقة

$$\dot{m}_{max} = \rho^* * A^* * V^*$$

$$\dot{m}_{max} = \rho^* * A^* * C^*$$

باستخدام علاقة الكثافة الحرجة (9–23)

$$\frac{\rho^*}{\rho_o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/k-1} = \beta^{1/k-1} \rightarrow \rho^* = \beta^{1/k-1} * \rho_o$$

والعلاقة السرعة الحرجة (9–24)

$$\frac{C^*}{C_o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/2} = \beta^{1/2} \rightarrow C^* = \beta^{1/2} * C_o$$

بالتعويض في التدفق الأعظمي نجد أن

$$\dot{m}_{max} = \left(\beta^{1/k-1} * \rho_o\right) * A^* * \left[\beta^{1/2} * C_o\right]$$

$$\dot{m}_{max} = \left(\beta^{1/k-1} * \frac{P_o}{RT_o}\right) * A^* * \left[(\beta)^{1/2} * \sqrt{kRT_o}\right]$$

وبالتالي

$$\dot{m}_{max} = \beta^{\gamma} * A^* * P_o \sqrt{\frac{k}{R * T_o}} \qquad (31\text{-}9)$$

من أجل $(k = 1.4)$ و $(R = 287\ J/kg\ K)$ نجد ان المعادلة تصبح

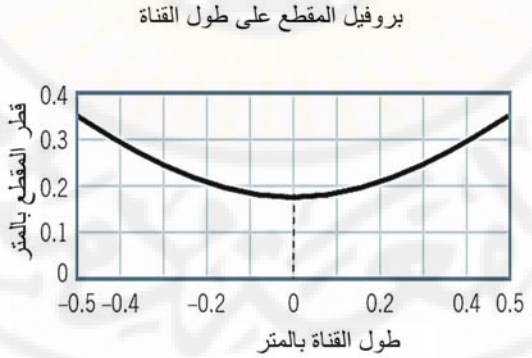
$$\frac{\dot{m}_{max} * \sqrt{T_o}}{A * P_o} = 0.040418 \qquad (32\text{-}9)$$

تسمى هذه المعادلة باسم " معادلة فليجنر *Fliegner Formula*"

✍ **<u>الحالة الرابع</u>**. عندما يتناقص الضغط الخلفي في الحالة الرابعة إلى قيمة أقل من قيمة الضغط الحرج فإن التدفق لايتغير كما في الشكل (11–9) ويبقى عدد ماخ عند العنق مساوياً إلى الواحد وتبقى النسبة $(P_b/P_o = 0.528)$. يحاول الغاز وعند خروجه من العنق أن يتمدد بشكل فوق صوتي مما يؤدي إلى ظهور الصدمة *Shock*.

<u>المثال التطبيقي 9–4 – تغييرات عدد ماخ على طول القناة.</u>

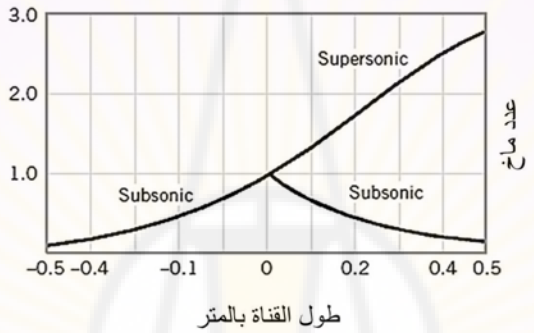
يدخل هواء بسرعة تحت صوتية وبشروط نظامية وبحريان إيزونتروبي بقناة متقاربة متباعدة لها مقطع دائري (A, m^2). يتغير مقطع القناة بالشكل $(A = 0.1 + x^2)$ إبتداءً من العنق وباتجاه فتحة الخروج كما في الشكل المرفق في نهاية المسألة. المحور الأفقي $x\ (m)$ هو المحور على طول القناة ويمتد من $(x \in [-0.5, 0.5])$. تحتوي القناة على صدمة في العنق. ارسم مقطع جانبي للقناة وارسم تغييرات عدد ماخ ونسبة T/T_o و P/P_o على طول محور القناة ومنحني $(T - s)$.



بروفيل المقطع على طول القناة.

الفرضيات: 1) الهواء غاز مثالي وبمعامل أدياباتي يساوي 1.4 2) الجريان إيزونتروبي ضمن القانة المتقاربة المتباعدة 3) يوجد صدمة في العنق أي أن ضغط الخروج ضمن القناة يساوي الضغط الحرج

$$\frac{P^*}{P_o} = 0.5283$$



علاقة عدد ماخ على طول القناة.

التحليل: يظهر من الشكل أن القناة تحتوي على صدمة. مقطع القناة هو مقطع دائري وبالتالي فإن نصف القطر يعطى من الشكل

$$A = \pi r^2$$

$$(A = 0.1 + x^2)$$

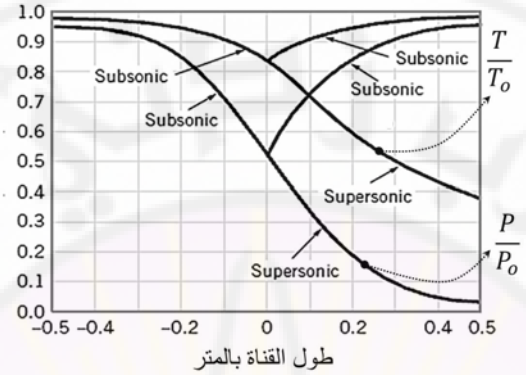
$$r = \left(\frac{0.1 + x^2}{\pi}\right)^{1/2}$$

وبما القناة تحتوي على صدمة في عنق القناة ومساحة هذا العنق (عند $x = 0$) هي $A^* = 0.1\ m^2$ وبالتالي فإن نسبة المقاطع تعطى

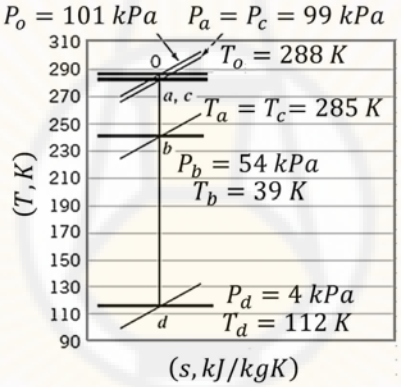
$$\frac{A}{A^*} = \frac{0.1 + x^2}{0.1} = \frac{1}{Ma}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{\gamma}$$

بتعويض قيم x ضمن المعادلة السابقة نجد الجدول التالي

الحالة على الرسم	P/P_o	T/T_o	Ma	A/A^*	$r\,(m)$	$x\,(m)$
الحل تحت الصوتي (القسم المتقارب)						
الحالة a	***0.98***	***0.99***	***0.17***	***3.5***	***0.334***	***-0.5***
	0.97	***0.99***	***0.23***	***2.6***	***0.288***	***-0.4***
	0.93	***0.98***	***0.32***	***1.9***	***0.246***	***-0.3***
	0.86	***0.96***	***0.47***	***1.4***	***0.211***	***-0.2***
	0.73	***0.91***	***0.69***	***1.1***	***0.187***	***-0.1***
الحالة b	*0.53*	*0.83*	*1*	*1*	*0.178*	*0*
	0.73	*0.91*	*0.69*	*1.1*	*0.187*	*0.1*
	0.86	*0.96*	*0.47*	*1.4*	*0.211*	*0.2*
	0.93	*0.98*	*0.32*	*1.9*	*0.246*	*0.3*
	0.97	*0.99*	*0.23*	*2.6*	*0.288*	*0.4*
الحالة c	***0.98***	***0.99***	***0.17***	***3.5***	***0.334***	***0.5***
الحل فوق الصوتي (القسم المتباعدة)						
	0.33	*0.73*	*1.37*	*1.1*	*0.187*	*0.1*
	0.18	*0.62*	*1.76*	*1.4*	*0.211*	*0.2*
	0.1	*0.52*	*2.14*	*1.9*	*0.246*	*0.3*
	0.06	*0.45*	*2.48*	*2.6*	*0.288*	*0.4*
الحالة d	*0.04*	*0.39*	*2.8*	*3.5*	*0.334*	*0.5*



علاقة نسب الضغط ودرجة الحرارة على القناة.



مخطط $(T - s)$ للقناة.

المثال التطبيقي 9–5 – تأثير الضغط الخلفي على التدفق.

يدخل هواء بسرعة تحت صوتية وقدرها $(150\ m/s)$ قناة متقاربة بضغط $(1MPa)$ ودرجة حرارة (600°C). حدد التدفق خلال القناة بفرض أن عنق القناة ذا مساحة $(50\ cm^2)$ عندما يكون الضغط الخلفي 1) $(0.7\ MPa)$ و2) $(0.4\ MPa)$.

الفرضيات: 1) الهواء غاز مثالي وبحرارة نوعية ثابتة تؤخذ عند درجة حرارة الغرفة 2) التدفق مستقر وببعد واحد وإيزونتروبي.

التحليل: تحسب بارامترات الركود كما يلي

$$T_{o,inlet} = T_{inlet} + \frac{V_{inlet}^2}{2c_p}$$

$$T_{o,inlet} = 873\ K + \frac{\left(150\frac{m}{s}\right)^2}{2 * 1.005\frac{kJ}{kgK}} * \frac{1\frac{kJ}{kg}}{\frac{1000m^2}{s^2}} = 884\ K$$

ضغط الركود يحسب من العلاقة

$$P_{o,inlet} = P_{inlet} * \left(\frac{T_{o,inlet}}{T_{inlet}}\right)$$

$$P_{o,inlet} = 1\ MPa * \left(\frac{884}{873}\right) = 1.045\ MPa$$

تبقى درجة حرارة الركود وضغط الركود ثابتة على طول القناة لأن الجريان إيزونتروبي.

$$T_{o,inlet} = T_o = 884\ K\ , P_{o,inlet} = P_o = 1.045\ MPa$$

إن نسبة الضغط الحرج للهواء وبحسب الجداول هي

$$\frac{P^*}{P_o} = 0.5283$$

وبالتالي فإن الضغط الحرج لظهور صدمة على فوهة القناة هو

$$P^* = 0.5283 * 1.045\ MPa = 0.5521\ MPa$$

<u>الحالة الأولى</u>. عندما يكون الضغط الخلفي $(0.7\ MPa)$ يكون

$$P_b = 0.7\ MPa > P^* = 0.5521\ MPa$$

وبالتالي فإن ضغط الخروج يساوي الضغط الخلفي ولا توجد صدمات على فوهة القناة أي

$$P_{throat} = P_e = P_b = 0.7\ MPa$$

$$\frac{P_{throat}}{P_o} = \frac{P_e}{P_o} = \frac{P_b}{P_o} = \frac{0.7}{1.045} = 0.67$$

من الجداول وعند قيم نسب الضغوط السابقة نجد أن

$$Ma_e = Ma_{throat} = 0.778$$

$$\frac{T_{throat}}{T_o} = \frac{T_e}{T_o} = 0.892$$

$$T_e = T_{throat} = 0.892 * 884\ K = 788.528\ K$$

يمكن حساب التدفق من العلاقة

$$\dot{m} = \rho_e * A_e * V_e$$

$$\rho_e = \frac{P_e}{R * T_e}$$

$$\rho_e = \frac{700\ kPa}{0.287 \frac{kJ}{kgK} * 788.528\ K} = 3.093\ kg/m^3$$

$$V_e = Ma_e * C = Ma_e * \sqrt{k * R * T_e}$$

$$V_e = 0.778 \sqrt{1.4 * 287 \frac{J}{kgK} * 788.528\ K}$$

$$V_e = 437.9\ m/s$$

بالتعويض نجد أن

$$\dot{m} = 3.093 \frac{kg}{m^3} * (50 * 10^{-4} m^2) * 437.9 \frac{m}{s}$$

$$\dot{m} = 6.77\ kg/s$$

<u>الحالة الثانية</u>. عندما يكون الضغط الخلفي $(0.4\ MPa)$ يكون

$$P_b = 0.4\ MPa < P^* = 0.5521\ MPa$$

وبالتالي فإن ضغط الخروج يساوي الضغط الحرج وتوجد صدمة صوتية على فوهة القناة والتدفق يكون أعظمياً ويعطى بالعلاقة

$$\dot{m}_{max} = \beta^{\gamma} * A^* * P_o * \sqrt{\frac{k}{R * T_o}}$$

$$\dot{m}_{max} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{[k+1/2(k-1)]} A^* * P_o * \sqrt{\frac{k}{R * T_o}}$$

$$\dot{m}_{max} = \left(\frac{2}{2.4}\right)^{2.4/0.8} * (50 * 10^{-4} m^2) * 1045\ kPa * \sqrt{\frac{1.4}{0.287\frac{kJ}{kgK} * 884\ K}}$$

$$\dot{m}_{max} = 0.2245 \frac{kPa * m^2}{\sqrt{\frac{kJ}{kg}}}$$

$$\dot{m}_{max} = 0.2245 * \sqrt{1000}$$

$$\dot{m}_{max} = 7.10\ kg/s$$

المثال التطبيقي 9–6 – نفاثة متقاربة وتدفقها.

يدخل هواء إلى نفاثة متقاربة بمقطع خروج $(0.001\ m^2)$ بسرعة مهملة وضغط$(1.0\ MPa)$ وحرارة $(360\ K)$. عند جريان إيزوتروبي لغاز مثالي $(k = 1.4)$، حدد تدفق النفاثة وعدد ماخ عند المخرج لكل من الضغط الخلفي a) $500\ kPa$ *b)* $784\ kPa$.

الفرضيات: 1) الهواء غاز مثالي وبحرارة نوعية ثابتة تؤخذ عند درجة حرارة الغرفة 2) التدفق مستقر وببعد واحد وإيزونتروبي.

التحليل: الخطوة الأولى هي تحديد فيما إذا هناك صدمة أم لا ضمن النفاثة. من أجل الهواء كوسيط تشغيل نجد أن نسبة الضغط الحرج إلى ضغط الركود هي

$$P^*/P_o = 0.528$$

أي أن الضغط الحرج هو

$$P^* = 1\ MPa * 0.528$$

$$P^* = 528\ kPa$$

إذا كان الضغط الخلفي أقل من الضغط الحرج فيكون هناك صدمة وعندما يكون الضغط الخلفي أكبر من الضغط الحرج فلا يوجد صدمة.

1) **<u>الحالة الأولى</u>**. بما أن الضغط الخلفي $(500kPa)$ أقل من الضغط الحرج فإن النفاثة مصدومة. يكون عدد ماخ مساوياً للواحد عند العنق $(Ma = 1)$ وضغط الخروج يساوي الضغط الحرج أي $(P_e = P^* = 528\ kPa)$. التدفق يحسب من المعادلة

$$\dot{m}_{max} = \beta^{\gamma} * A^* * P_o * \sqrt{\frac{k}{R * T_o}}$$

$$\dot{m}_{max} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{[k+1/2(k-1)]} A^* * P_o * \sqrt{\frac{k}{R * T_o}}$$

$$\dot{m}_{max} = \left(\frac{2}{2.4}\right)^{2.4/0.8} * (0.001\ m^2) * 1000\ kPa * \sqrt{\frac{1.4}{0.287\ \frac{kJ}{kgK} * 360\ K}}$$

$$\dot{m}_{max} = 0.0673 \frac{kPa * m^2}{\sqrt{\frac{kJ}{kg}}}$$

$$\dot{m}_{max} = 0.0673 * \sqrt{1000}$$

$$\dot{m}_{max} = 2.13\ kg/s$$

أو يمكن حسابها من العلاقة العامة للتدفق

$$\dot{m} = \rho_e A_e V_e = \frac{P_e}{R\,T_e} A_e V_e = \frac{P^*}{R * T_e} A_e V_e$$

نجد من العلاقات السابقة كلا من V_e و T_e أن

$$T_e = {T_o}\Big/{\left(1 + \frac{k-1}{2}\, Ma^2\right)} = 300\ \mathrm{K}$$

$$V_e = \sqrt{k * R * T_e}$$

$$V_e = \sqrt{1.4 * 287 \frac{J}{kgK} * 300\ K}$$

$$V_e = 347.2\ m/s$$

بالتعويض نجد أن التدفق

$$\dot{m} = \frac{528\ kPa}{0.287 \frac{kJ}{kgK} * 300\ K} * (0.001\ m^2) * 347.2\ \frac{m}{s}$$

$$\dot{m} = 2.13\ kg/s$$

2) **<u>الحالة الثانية</u>**. بما أن الضغط الخلفي $(784\ kPa)$ أكبر من الضغط الحرج فإن التدفق في النفاثة هو تدفق تحت صوتي وضغط الخروج يساوي الضغط الخلفي $(P_e = P_b = 784\ kPa)$ أما عدد ماخ والحرارة والسرعة. يحسب التدفق في أي مقطع بالشكل

$$\dot{m} = Ma * P_o * A * \alpha^{\gamma} * \sqrt{\frac{k}{R * T_o}}$$

بالنسبة إلى مقطع الخروج تتحول المعادلة إلى

$$\dot{m} = Ma_e * P_o * A_e * \alpha^{\gamma} * \sqrt{\frac{k}{R * T_o}}$$

يحسب عدد ماخ من علاقة نسب الضغط أو الحرارة من الشكل

$$\frac{P_e}{P_o} = \left(\frac{T_e}{T_o}\right)^{k/(k-1)} = (\alpha)^{k/k-1}$$

$$\frac{P_e}{P_o} = \frac{P_b}{P_o} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma_e^2\right)^{-k/k-1}$$

$$Ma_e = \sqrt{\frac{2}{k-1}\left(\left(\frac{P_o}{P_b}\right)^{k-1/k} - 1\right)}$$

$$Ma_e = \sqrt{\frac{2}{0.4} * \left(\left(\frac{1000}{784}\right)^{0.4/1.4} - 1\right)}$$

$$Ma_e = 0.6 < 1$$

$$\alpha^{\gamma} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma_e^2\right)^{-1 * \frac{k+1}{2(k-1)}}$$

$$\alpha^{\gamma} = \left(1 - \frac{0.4}{2} * 0.36\right)^{-2.4/0.8}$$

$$\alpha^{\gamma} = 0.812$$

بالتعويض نجد

$$\dot{m} = Ma_e * P_o * A_e * \alpha^{\gamma} * \sqrt{\frac{k}{R * T_o}}$$

$$\dot{m} = 0.6 * 1000\ kPa * 0.001\ m^2 * 0.812 * \sqrt{\frac{1.4}{0.287\frac{kJ}{kgK} * 360K}}$$

$$\dot{m} = 0.0567\ kPa * m^2 \Big/ \sqrt{\frac{kJ}{kg}}$$

$$\dot{m} = 0.0873 * \sqrt{1000}$$

$$\dot{m} = 1.79 \frac{kg}{s}$$

أو يمكن حساب التدفق من العلاقة

$$\dot{m} = \frac{P_e}{R\,T_e} A_e V_e$$

$$T_e = {T_o} \Big/ {1 + \frac{k-1}{2}\, Ma^2}$$

$$T_e = \frac{360K}{1 + \frac{0.4}{2} * 0.36}$$

$$T_e = 335.82\ K$$

$$V_e = Ma_e C$$

$$V_e = Ma_e \sqrt{k * R * T_e}$$

$$V_e = 0.6 * \sqrt{1.4 * 287 \frac{J}{kgK} * 335.82K}$$

$$V_e = 220.4 m/s$$

بالتعويض نجد

$$\dot{m} = \frac{784\ kPa}{0.287 \frac{kJ}{kgK} * 335.82K} * 0.001\ m^2 * 220.4 \frac{m}{s}$$

$$\dot{m} = 1.78\ kg/s$$

المثال التطبيقي 9–7 – مساحة عنق قناة متقاربة .

يجري هواء في أنبوب دائري مستقيم وبشكل مستقر من قناة متقاربة وبالشروط النظامية التالية $\{P_o = 101\ kPa\ (abs), T_o = 15℃ = 288K, \rho_0 = 1.23\ kg/m^3\}$. مساحة عنق القناة عند دخوله إلى الأنبوب $(1 * 10^{-4} m^2)$. حدد تدفق الهواء إذا كان ضغط الأنبوب المطلق في الحالة الأولى $(80\ kPa)$ وفي الحالة الثانية $(40\ kPa)$.

الفرضيات: 1) الهواء غاز مثالي وبحرارة نوعية ثابتة تؤخذ عند درجة حرارة الغرفة 2) التدفق مستقر وببعد واحد وإيزونتروبي.

التحليل: الضغط الحرج عند العنق وبفرض أن الجريان إيزونتروبي والهواء غاز مثالي بحرارة نوعية ثابتة هو

$$\frac{P^*}{P_o} = 0.5283$$

$$P^* = 0.5283\ P_o = 0.5283 * 101\ kPa\ (abs) = 53.3\ kPa\ (abs)$$

الحالة الأولى

$$P_b = 80\ kPa\ >\ P^* = 53.3\ kPa$$

الضغط الخلفي أكبر من الضغط الحرج وبالتالي فإن ضغط العنق يساوي الضغط الخلفي ولايوجد أي صدمة في العنق. يمكن حساب التدفق من العلاقة

$$\dot{m} = Ma_{throat} * P_o * A_{throat} * \alpha^{\gamma} * \sqrt{\frac{k}{R * T_o}}$$

عدد ماخ عند العنق من معادلة

$$Ma_{throat} = \sqrt{\frac{2}{k-1}\left(\left(\frac{P_o}{P_b}\right)^{k-1/k} - 1\right)}$$

$$Ma_{throat} = \sqrt{\frac{2}{0.4}\left(\left(\frac{101}{80}\right)^{0.4/1.4} - 1\right)}$$

$$Ma = 0.587 < 1$$

$$\alpha = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{-1}$$

$$\alpha = \left(1 + \frac{0.4}{2}(0.587)^2\right)^{-1}$$

$$\alpha = 0.9355$$

$$\alpha^{\gamma} = 0.9355^{(2.4/0.8)} = 0.8188$$

$$\dot{m} = 0.587 * 101\ kPa * 0.0001\ m^2 * 0.8188 * \sqrt{\frac{1.4}{0.287\frac{kJ}{kgK} * 288K}}$$

$$\dot{m} = 6.317 * 10^{-4}\ kPa * m^2 \Big/ \sqrt{\frac{kJ}{kg}}$$

$$\dot{m} = 6.317 * 10^{-4} * \sqrt{1000} = 0.02\frac{kg}{s}$$

يمكن أيضاً حساب التدفق من العلاقة

$$\dot{m} = \rho_{throat} * V_{throat} * A_{throat}$$

الكثافة عند العنق هي تحسب من العلاقة

$$\frac{\rho_{throat}}{\rho_o} = (\alpha)^{1/k-1}$$

$$\rho_{throat} = (\alpha)^{1/k-1} * \rho_o$$

$$\rho_{throat} = 1.23\frac{kg}{m^3} * (0.9355)^{1/0.4}$$

$$\rho_{throat} = 1.0412\ kg/m^3$$

درجة حرارة العنق تحسب من

$$\frac{T_{throat}}{T_o} = \alpha$$

$$T_{throat} = 0.9355 * 288K$$

$$T_{throat} = 269.424\ K$$

بالتعويض في معادلة السرعة نجد

$$V_{throat} = Ma\sqrt{kRT_{throat}}$$

$$V_{throat} = 0.587 * \sqrt{1.4 * 287\frac{J}{kgK} * 269.424\ K}$$

$$= 193.135\ m/s$$

بالتعويض في معادلة التدفق نجد أن

$$\dot{m} = 1.0412\frac{kg}{m^3} * 193.135\frac{m}{s} * 0.0001\ m^2$$

$$\dot{m} = 0.02\ kg/s$$

<u>الحالة الثانية</u>: في هذه الحالة يكون

$$P_b = 40\ kPa\ <\ P^* = 53.3\ kPa$$

بالتالي فإن ضغط العنق هو الضغط الحرج لوجود صدمة ($P_{throat} = P^*$) وعدد ماخ عند العنق يساوي الواحد ($Ma = 1$). الكثافة والحرارة تحسب من المعادلات الحرجة السابقة

$$\frac{\rho^*}{\rho_o} = \frac{\rho_{throat}}{\rho_o} = 0.6339\ \rightarrow\ \rho_{throat} = 0.7796\ kg/m^3$$

$$\frac{T^*}{T_o} = \frac{T_{throat}}{T_o} = 0.8333\ \rightarrow\ T_{throat} = 240\ K$$

وتعطى معادلة التدفق بالشكل

$$\dot{m} = (\rho AV)_{throat} = 0.0242\ kg/s$$

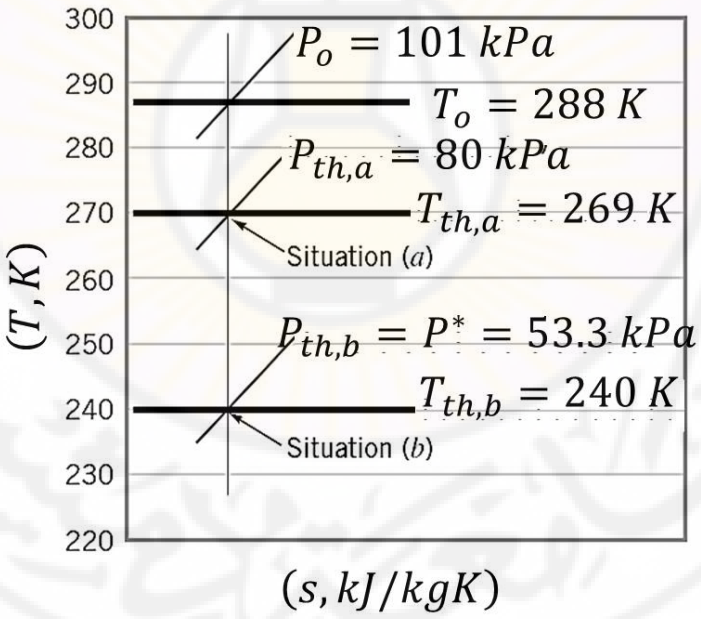
يمكن أيضاً حساب التدفق من المعادلة

$$\dot{m}_{max} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{[k+1/2(k-1)]} (A_{throat}) * P_o * \sqrt{\frac{k}{R * T_o}}$$

$$\dot{m}_{max} = \left(\frac{2}{2.4}\right)^{[3]} (0.001m^2) * 101kPa * \sqrt{\frac{1.4}{287\frac{J}{kgK} * 288\ K}}$$

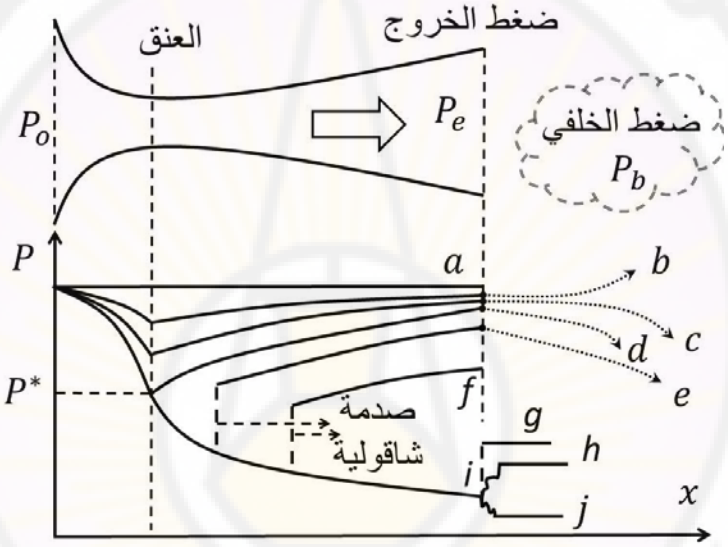
$$\dot{m}_{max} = 0.024\ kg/s$$

رسم الحالتي على منحني $(T-s)$ بالشكل التالي



2.4.9 الأقنية المتقاربة – المتباعدة *Converging - Diverging Nozzles*.

أكبر سرعة يمكن الحصول عليها في الأقنية المتقاربة هي سرع صوتية ومن أجل التوصل إلى سرع فوق صوتية نصل القناة المتقاربة بقناة متباعدة على التسلسل. يبين الشكل (12–9) مقطع لقناة متقاربة متباعدة وتوزع الضغط على طول القناة.

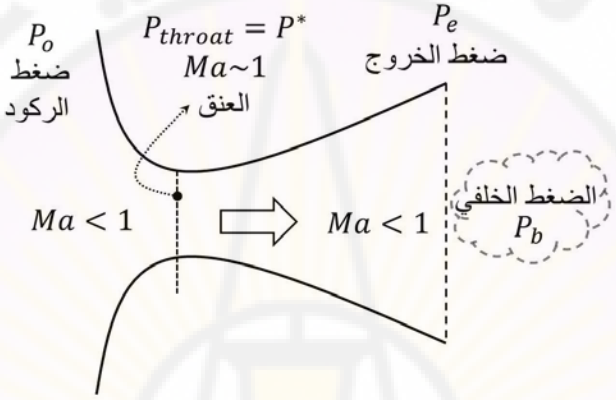


الشكل (12–9) تأثير الضغط الخلفي على توزع الضغط ضمن القناة متقاربة متباعدة.

عند نبدأ بتخفيض الضغط الخلفي نشاهد الحالات التالية:

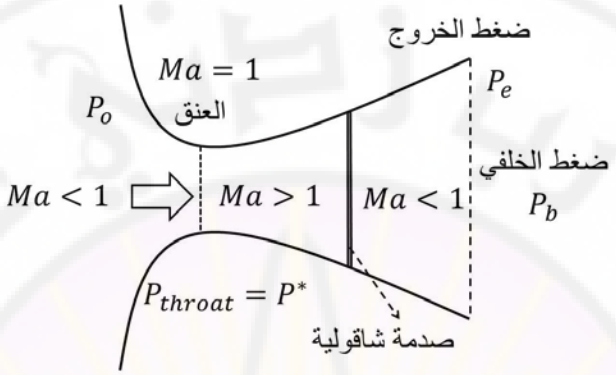
- **الحالة الأولى** جريان تحت صوتي إيزونتروبي في النفاثة. عندما تكون النسبة (P_b/P_o) قريبة من الواحد يحدث تدفق عبر القناة وبسرع تحت صوتية ويكون الضغط الخلفي مساوياً لضغط الخروج في القناة المتقاربة المتباعدة $(P_b = P_e)$. هنا يحسب عدد ماخ كما تم حسابه في الأقنية المتقاربة. مع تناقص نسبة الضغط (P_b/P_o) فإن الصدمة سوف تظهر في العنق. تمثل الحالات قبل حدوث الصدمة بالمنحنيات (a, b, c, d).

المنحني (a) هو بداية الجريان وبسرعات صغيرة وتساوي ضغط الخلفي مع ضغط الركود. المنحني (d) يمثل وصول السرعة في العنق إلى الصوتية كما هو واضح في القناة المتقاربة المتباعدة في الشكل (13–9).

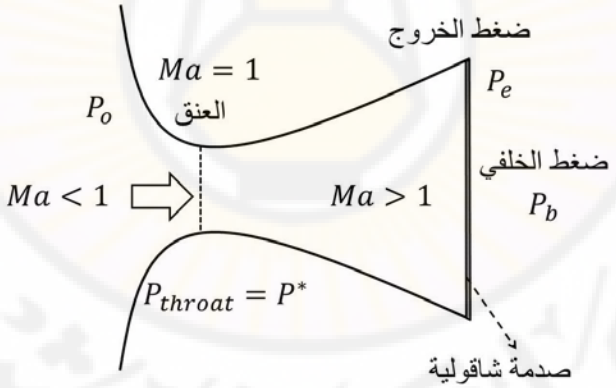


الشكل (13–9) جريان تحت صوتي إيزونتروبي ضمن القناة (الحالات *a,b,c,d*).

الحالة الثانية جريان صوتي غير إيزونتروبي في العنق. إذا تناقصت نسبة الضغط (P_b/P_o) إلى مادون النسبة (P^*/P_o) لوسيط التشغيل المستخدم في القناة فسوف تتشكل بعد العنق صدمة عامودية *Normal Shock* وتبدأ بالتحرك باتجاه الجريان كما هو مبين في الشكل (14–9) والشكل (15–9). يبقى الإنتروبي ثابتاً إلى حدود الصدمة ويزداد عبر الصدمة ويبقى ثابتا حتى فتحة الخروج. تمثل المنحنيات (e, f, g, i) تحرك الصدمة باتجاه الجريان أي باتجاه الخروج من القناة. المنحني *(e)* يبين تشكل الصدمة والمنحني *(f)* تحركها ضمن القناة المتباعدة حتى تصل إلى فتحة الخروج في المنحني *(i)*.

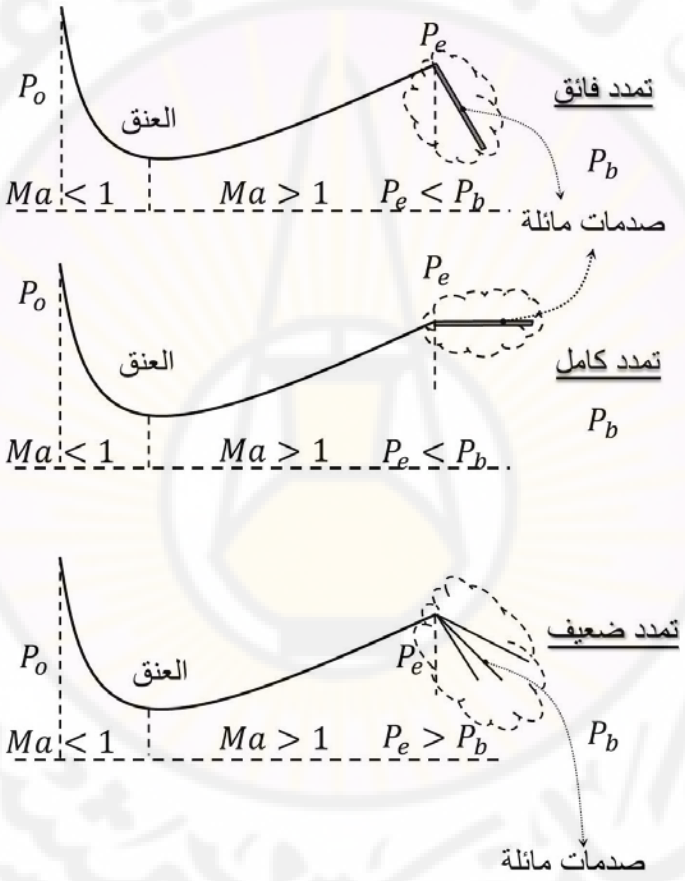


الشكل (14–9) جريان صوتي غير إيزونتروبي
ضمن القناة (الحالة *e* أو *f* أو *g*).



الشكل (15–9) جريان صوتي غير إيزونتروبي
ضمن القناة (الحالة *i*).

الحالة الثالثة جريان فوق صوتي إيزونتروبي في النفاثة. إذا تناقصت نسبة الضغط إلى حدود كبيرة فإن الصدمة سوف تتجه إلى الخارج. وهناك ثلاث حالات كما في الشكل (16-9):



الشكل (16-9) جريان فوق صوتي إيزونتروبي في القناة.

- تدفق مع تمدد فائق *Over Expanded Flow* وهنا تظهر الصدمات المائلة.
- تدفق مع تمدد كامل *Fully Expanded Flow* هنا يخرج الهواء بهدوء من دون صدمات موازياً للجريان.
- تدفق مع تمدد ضعيف *Under Expanded Flow* ويصعب في هذه الحالة السيطرة على الاهتزازات التي تحدث في القناة.

المثال التطبيقي 9-8 – قناة متقاربة متباعدة.

هواء يدخل إلى قناة متقاربة متباعدة بضغط $(1\ MPa)$ ودرجة الحرارة $(800\ K)$ مع إهمال سرعة الدخول. التدفق أحادي البعد مستقر وإيزونتروبية بعامل $(k = 1.4)$. عدد ماخ عند الخروج هو $(Ma = 2)$ ومساحة مقطع $(20cm^2)$ حدد 1) شروط العنق 2) شروط مقطع الخروج بما في ذلك المساحة و3) تدفق الهواء عبر القناة.

الفرضيات: 1) هواء غاز مثالي والحرارة النوعية هي ثابتة وتأخذ عند درجة حرارة الغرفة 2) التدفق مستقر وذات بعد أحادي وإيزونتروبي.

التحليل: بما أن السرعة عند المخرج هي فوق صوتية أي يجب أن تكون السرعة عند العنق صوتية. شروط الركود هي

$$P_o = 1\ MPa, T_o = 800\ K$$

$$\rho_o = \frac{P_o}{RT_o} = \frac{1000\ kPa}{(0.287\ kJ/kgK) * 800K} = 4.355\ kg/m^3$$

عند العنق ومن الجداول نجد أن

$$\frac{P^*}{P_o} = 0.5283\ , \frac{T^*}{T_o} = 0.8333\ , \frac{\rho^*}{\rho_o} = 0.6339$$

أي أن شروط العنق هي

$$P^* = 0.5283 * 1MPa = 0.5283\ MPa$$

$$T^* = 0.8333 * 800K = 666.6\ K$$

$$\rho^* = 0.6339 * 4.355\ kg/m^3 = 2.761\ kg/m^3$$

السرعة عند العنق هي

$$V^* = c^* = \sqrt{kRT^*} = \sqrt{1.4 * 0.287 \frac{kJ}{kgK} * 666.6\ K * \frac{1000\ m^2/s^2}{1\ kJ/kg}}$$

$$V^* = 517.5\ m/s$$

وبما أن الجريان لإيزونتروبي يمكن أيضاً أن نجد عند عدد ماخ $(Ma = 2)$ ومن الجداول أو المخططات أن

$$\frac{P_e}{P_o} = 0.1278\ , \frac{T_e}{T_o} = 0.5556\ , \frac{\rho_e}{\rho_o} = 0.23, \frac{A_e}{A^*} = 1.6875$$

أي أن شروط الخروج هي

$$P_e = 0.1278 * 1MPa = 0.1278\ MPa$$

$$T_e = 0.5556 * 800K = 444.5\ K$$

$$\rho_e = 0.23 * 4.355\ kg/m^3 = 1.002\ kg/m^3$$

$$A_e = 1.6875 * 20\ cm^2 = 33.75\ cm^2$$

السرعة عند الخروج هي

$$V_e = Ma_e * c_e = Ma_e * \sqrt{kRT_e}$$

$$V_e = 2 * \sqrt{1.4 * 0.287 \frac{kJ}{kgK} * 444.5\ K * \frac{1000\ m^2/s^2}{1\ kJ/kg}}$$

$$V_e = 845.2\ m/s$$

بما أن الجريان أيزونتروبي على طول القناة ولايوجد صدمة فإن التدفق يحسب من العلاقة

$$\dot{m} = \rho^* * A^* * V^*$$

$$\dot{m} = 2.761 \frac{kg}{m^3} * (20 * 10^{-4}\ m^2) * 517.5\ m/s$$

$$\dot{m} = 2.86\ kg/s$$

5.9 ترموديناميك موجات الصدم *Shock Waves*.

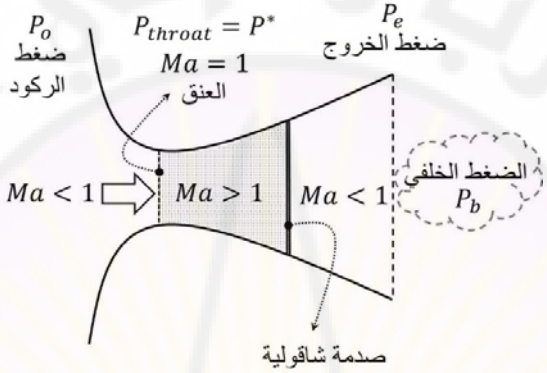
من الضروري دراسة الصدمات التي تحدث في جريان ما ضمن القناة للتعرف على شروط حدوث هذه الصدمة وماهو تأثيرها في الجريان.

1.5.9 الصدمات الشاقولية *Normal Shocks*.

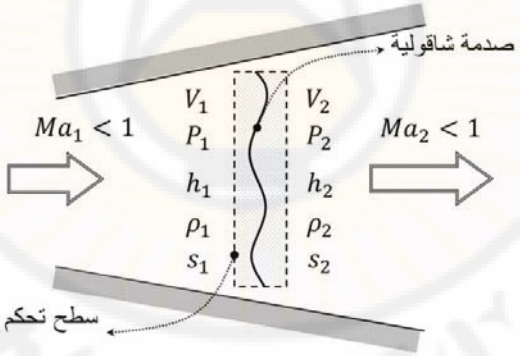
شاهدنا في القناة المتقاربة المتباعدة ذات الجريان الصوتي وغير الإيزونتروبي أن الصدمة العاموية قد ظهرت في العنق وبدأت بالتحرك ضمن الناشرة (القسم المتباعد) كما في الشكل (17−9). لكي ندرس بارامترات وسيط التشغيل قبل الصدمة الشاقولية وبعدها نفرض أن لدينا سطح تحكم يحتوي على صدمة شاقولية كما هو واضح في الشكل (18−9). بفرض أن الجريان مستقر ومهمل 1) انتقال الحرارة $(\dot{Q}_{cv} = 0)$ 2) العمل المتبادل بين وسيط التشغيل والوسط المحيط $(\dot{W}_{cv} = 0)$ 3) الطاقة الكامنة 4) التغيير في مقطع القناة عبر الصدمة لأن سماكة الصدمة الشاقولية صغير جداً وبحدود $(10^{-5}\ cm)$ وبتطبيق العلاقات العامة والرئيسية على سطح التحكم المحيط بالصدمة نجد أن

- ✓ معادلة انحفاظ الكتلة تعطى

$$\rho_1 * V_1 = \rho_2 * V_2 \qquad (33\text{-}9)$$



الشكل (17–9) الصدمة الشاقولية ضمن قناة متقاربة متباعدة.



الشكل (18–9) بارمترات وسيط الشتغيل قبل وبعد الصدمة الشاقولية ضمن قناة.

✓ معادلة انحفاظ الطاقة تعطي

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

وباعتبار أن وسيط التشغيل مثالي

$$h_{o1} = \ h_{o2} = const \qquad (34\text{-}9)$$

- ✓ معادلة انحفاظ العطالة تعطى

$$(P_1 - P_2) = \rho_2 * V_2^2 - \rho_1 * V_1^2 \qquad (35\text{-}9)$$

- ✓ مبدأ تزايد الإنتروبي يعطي

$$s_2 - s_1 \geq 0$$

بفرض أن وسيط الشتغيل غاز مثالي تتحول المعادلة (34−9) إلى

$$T_o = T + \frac{V^2}{2c_P} = \ constant$$

حيث لايوجد تغيير في درجة حرارة الركود عبر الصدمة. يمكن كتابة العلاقة بين درجة الحرارة قبل وبعد الصدمة من الشكل

$$\alpha = \left(1 + \frac{k-1}{2}\ Ma^2\right)^{(-1)}$$

وبالتالي

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \qquad (36\text{-}9)$$

أما علاقة الضغط قبل الصدمة وبعدها فتكتب بالشكل

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1 + k * Ma_1}{1 + k * Ma_2} \qquad (37\text{-}9)$$

أما علاقة ضغط الركود فتعطى من الشكل

$$\frac{P_{o2}}{P_{o1}} = \frac{Ma_1}{Ma_2} * \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^{(k+1)/2(k-1)} \qquad (38\text{-}9)$$

من علاقة نسب درجات الحرارة والضغط قبل الصدمة وبعدها يمكن أن نكتب العلاقة التي تربط بين عدد ماخ قبل الصدمة وبعدها بالشكل

$$(Ma_2)^2 = \frac{(Ma_1)^2 + \frac{2}{k-1}}{\frac{2k}{k-1}(Ma_2)^2 - 1} \qquad (39\text{-}9)$$

تعطى القيم السابقة ضمن جداول معينة وبحسب وسيط الشتغيل كما في الجدول (3−9) للهواء.

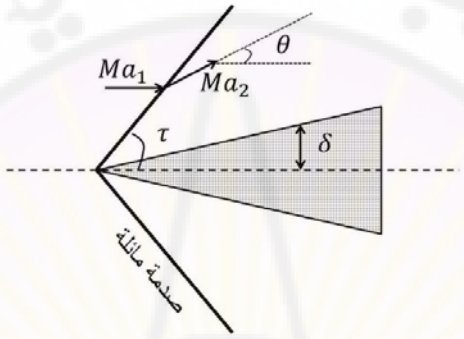
الجدول (3−9) بارامترات وسيط التشغيل قبل وبعد الصدمة الشاقولية.

Ma_1	Ma_2	P_2/P_1	T_2/T_1	P_{o2}/P_{o1}
1	1	1	1	1
1.5	0.70109	2.4583	1.3202	0.92978
2	0.57735	4.5	1.6875	0.72088
3	0.47519	10.333	2.679	0.32834
5	.415230	29	5.8	0.06172
10	0.38757	116.5	20.388	0.00304
∞	0.37796	∞	∞	∞

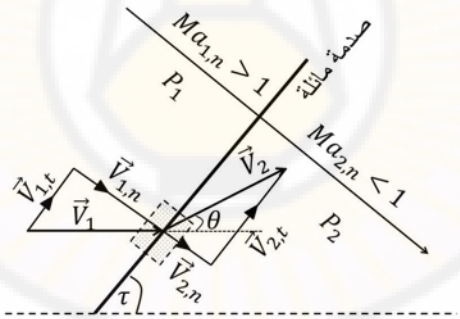
2.5.9 الصدمات المائلة ***Oblique Shocks***.

شاهدنا في القناة المتقاربة المتباعدة كيفية تشكل الصدمات الشاقولية عندما ينخفض الضغط الخلفي إلى قيم وكيفية تحول هذه الصدمة إلى صدمة مائلة عند الاستمرار في تخفيض الضغط الخلفي. لنفرض أن لدينا صدمة مائلة تتشكل على جناح حامل كما في الشكل (19−9) بزاوية (τ) تسمى بزاوية الصدمة *Shock Angle* أو *Wave Angle*. ينحرف وسيط التشغيل بعد الصدمة بزاوية (θ) تسمى زاوية

الانحراف *Deflection Angle* أو *Turning Angle* عن الجناح والتي هي جزء من زاوية الصدمة (τ).



الشكل (19–9) ظهور صدمة مائلة على جناح بزاوية (τ).



الشكل (20–9) مساقط السرع على الصدمة المائلة.

لكي نحدد بارامترات وسيط التشغيل قبل الصدمة وبعدها نختار سطح التحكم المبين في الشكل (20–9) ونطبق المعادلات الرئيسية فنجد أن

- ✓ معادلة انحفاظ الكتلة تعطى

$$\rho_1 * V_{1,n} = \rho_2 * V_{2,n} \quad (40\text{-}9)$$

لأنه لايوجد أي تأثير للسرعة المماسية.

- ✓ معادلة انحفاظ العطالة تعطى

$$h_1 + \frac{V_{1,n}^2}{2} + \frac{V_{1,t}^2}{2} = h_2 + \frac{V_{2,n}^2}{2} + \frac{V_{1,t}^2}{2} \quad (41\text{-}9)$$

بما أن السرع المماسية هي متساوية

$$h_1 + \frac{V_{1,n}^2}{2} = h_2 + \frac{V_{2,n}^2}{2} \quad (42\text{-}9)$$

- ✓ معادلة انحفاظ العطالة تعطى

$$(P_1 - P_2) = \rho_2 * V_{2,n}^2 - \rho_1 * V_{1,n}^2 \quad (43\text{-}9)$$

تظهر المعادلات الرئيسية للصدمات المائلة تشابهاً كبيراً مع المعادلات الرئيسية للصدمات الشاقولية والخلاف الوحيد أننا في الصدمات المائلة نأخذ السرعة الناظمية بدلاً من السرعة الكلية كما في الصدمات الشاقولية. عدد ماخ الناظمي قبل الصدمة يعطى بالشكل

$$Ma_{1,n} = Ma_1 * sin(\tau) \quad (44\text{-}9)$$

عدد ماخ الناظمي بعد الصدمة فيعطى بالشكل

$$Ma_{2,n} = Ma_2 * sin(\tau - \theta) \quad (45\text{-}9)$$

يمكن إعطاء العلاقة بين زاوية الصدمة وزاوية الانحراف بالشكل

$$tan\theta = \frac{2\cot\tau * (Ma_1^2 * sin^2\tau - 1)}{Ma_1^2(k + cos2\tau) + 2} \quad (46\text{-}9)$$

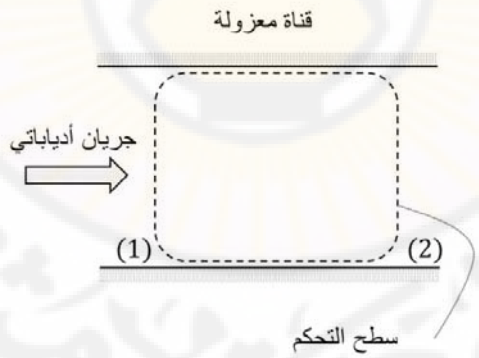
6.9 تاثير الاحتكاك والتبادل الحراري على الجريان في الأقنية.

سنقوم بدراسة جريان فانو ضمن أقنية بمقطع ثابت والذي يأخذ بعين الاعتبار الاحتكاك ويهمل التبادل الحراري مع الوسط الخارجي بينما يقوم جريان ريليه بالأخذ بعين الاعتبار التبادل الحراري ويهمل الاحتكاك.

1.6.9 جريان فانو *Fanno Flow*.

لنفرض ان لدينا غازاً مثالياً يجري في قناة بمقطع ثابت كما في الشكل (21–9) وبشكل أدياباتي وببعد واحد وبفرض أن الجريان مستقر وبإهمال 1) انتقال الحرارة $(\dot{Q}_{cv} = 0)$ 2) العمل المتبادل بين وسيط التشغيل والوسط المحيط $(\dot{W}_{cv} = 0)$ 3) الطاقة الكامنة. بتطبيق معادلة انحفاظ الطاقة على سطح تحكم مختار بين مقطع الدخول والخروج نجد أن

$$h_{o1} = \ h_{o2} = const$$



الشكل (21–9) جريان فانو في قناة بمقطع ثابت.

وباعتبار أن الغاز مثالي نجد

$$T_o = T + \frac{V^2}{2c_P} = \ constant$$

بكتابة معادلة الإنتروبي لهذا الجريان بفرض أن النقطة (1) هي المرجع

$$s - s_1 = \ c_P * ln\frac{T}{T_1} - R * ln\frac{P}{P_1} \qquad (47\text{-}9)$$

من تفاضل المعادلات الرئيسية نجد ان تفاضل معادلة انحفاظ الكتلة تعطي

$$\rho V = const$$

أي أن

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dV}{V} \qquad (48\text{-}9)$$

تفاضل معادلة العطالة تعطي

$$P + (\rho V)V = const$$

أي

$$\frac{dP}{dV} = -\rho V \qquad (49\text{-}9)$$

تفاضل معادلة الغاز المثالي تعطي

$$\frac{dP}{P} = \frac{dT}{T} + \frac{d\rho}{\rho} \qquad (50\text{-}9)$$

تفاضل معادلة الإنتروبي (47–9) تعطي

$$ds = c_P\frac{dT}{T} - R\frac{dP}{P} \qquad (51\text{-}9)$$

بتعويض تفاضل معادلة الإنتروبي مع الغاز المثالي نجد

$$ds = c_P \frac{dT}{T} - R\left(\frac{dT}{T} + \frac{d\rho}{\rho}\right)$$

$$ds = (c_P - R)\frac{dT}{T} - R\frac{d\rho}{\rho}$$

ولكن بحسب مايير نجد أن

$$(c_P - R) = c_v \rightarrow kc_v - R = c_v \rightarrow c_v = R/(k-1)$$

بالتقسيم على تغيير درجة الحرارة

$$\frac{ds}{dT} = \frac{R}{T*(k-1)} - \frac{R}{V}\frac{dV}{dT}$$

بتقسيم تفاضل معادلة الغاز المثالي والإستعانة بتفاضل معادلة الكتلة والعطالة نجد

$$\frac{dT}{dV} = \frac{T}{V} - \frac{V}{R}$$

بالتعويض في الإنتروبي

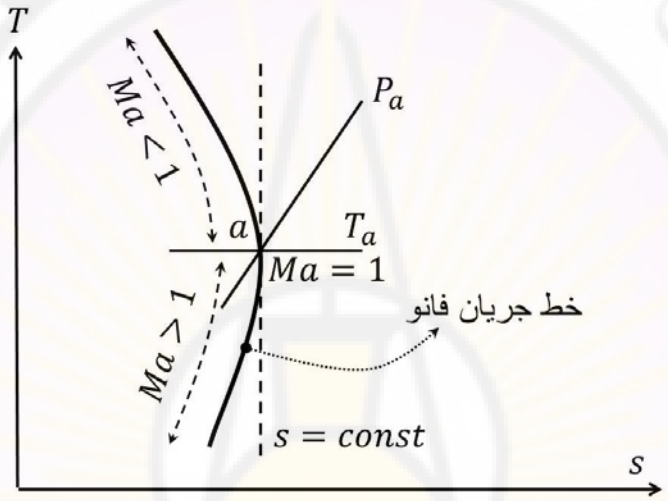
$$\frac{ds}{dT} = \frac{R}{T*(k-1)} - \frac{R}{T - V^2/R} \qquad (52\text{-}9)$$

برسم العلاقة (52–9) على منحني $(T-s)$ من أجل قيم معروفة لوسيط تشغيل ما نجد مايسمى خط فانو *fanno line* كما في الشكل (22–9). نلاحظ أن خط فانو يمر من النقطة (a) التي يكون فيها (ds/dT) يساوي الصفر ونحصل على أن السرعة عند النقطة (a) هي

$$V_a = \sqrt{kRT}$$

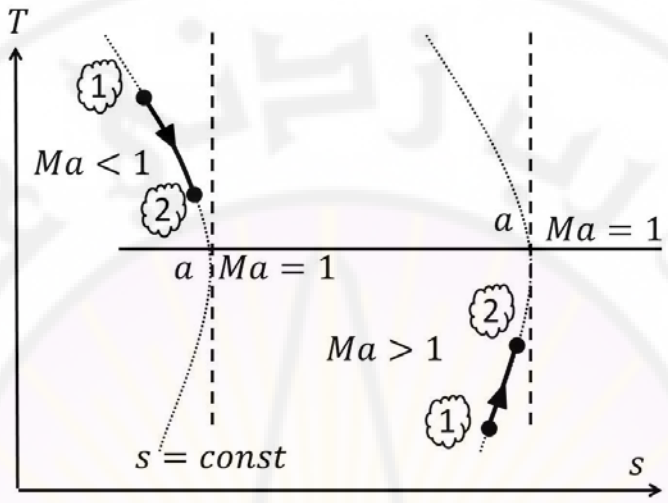
أما قيمة عدد ماخ عند تلك النقطة هي

$$Ma_a = \frac{V_a}{C_a} = 1 \qquad (53\text{-}9)$$

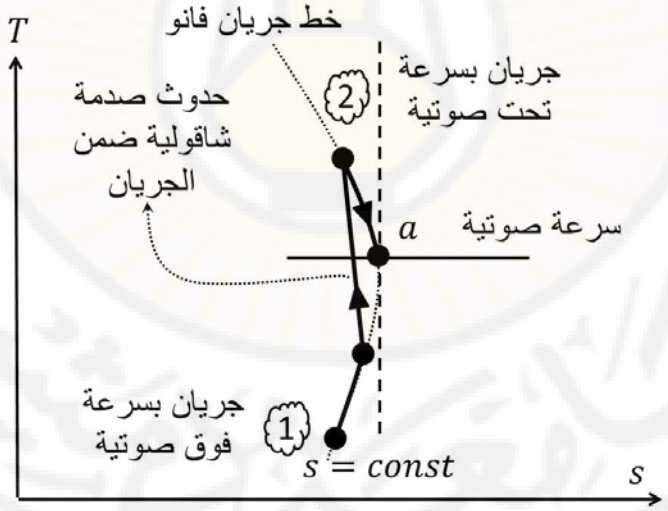


الشكل (22–9) خط جريان فانو.

ودرجة الحرارة النقطة (a) هي درجة الحرارة الحرجة (T^*). نلاحظ أيضاً أن الجريان من الأعلى باتجاه النقطة (a) يتسارع إلى أن يصل إلى السرعة الصوتية والجريان من الأسفل باتجاه النقطة (a) يتباطأ إلى أن يصل إلى السرعة الصوتية لذلك ينقسم الخط إلى قسمين، الأول ماقبل (T^*) أي النقطة (a) بسرع تحت صوتية والثاني ما بعد (T^*) أي النقطة (a) بسرع فوق صوتية كما في الشكل (23–9). يؤدي ظهور الصدمة إلى انتقال الجريان من فوق صوتي إلى تحت صوتي كما في الشكل (24–9).



الشكل (23–9) أقسام خط جريان فانو.

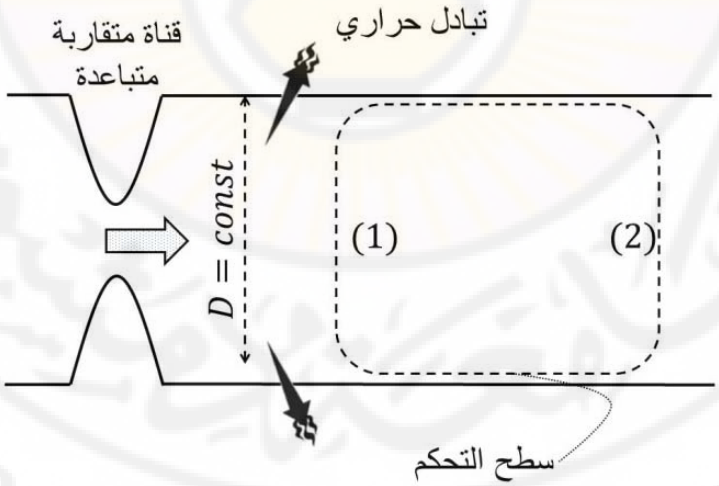


الشكل (24–9) ظهور الصدمة في جريان فانو.

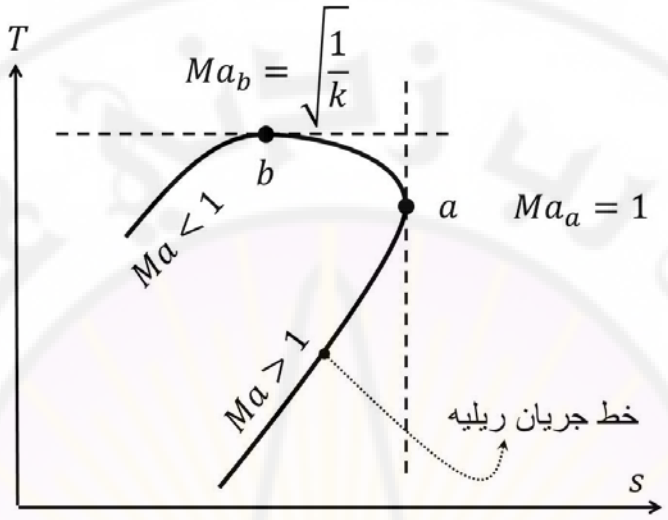
يمكن أن نستنتج بالاعتماد على القانون الثاني في الترموديناميك والذي يؤكد أن التغيير في الإنتروبي يزداد مع الجريان الأدياباتي في العمليات الحقيقية أو يبقى ثابتاً في العمليات الإيزونتروبية، أن الجريان تحت الصوتي يتسارع بالاحتكاك إلى عدد ماخ أكبر إلى أن يصل إلى السرعة الصوتية والجريان فوق الصوتي يتباطئ بفعل الاحتكاك إلى عدد ماخ أصغر إلى أن يصل إلى السرع الصوتية.

2.6.9 جريان ريليه *Rayleigh flow*.

لنفرض ان لدينا غازاً مثالياً يجري في قناة بمقطع ثابت مع تبادل حراري مع الوسط الخارجي ومن دون احتكاك وببعد واحد فقط كما في الشكل (25–9) وبفرض أن الجريان مستقر وبإهمال 1) العمل المتبادل بين وسيط التشغيل والوسط المحيط $(\dot{W}_{cv} = 0)$ 2) الطاقة الكامنة وبرسم العلاقة الإنتروبي في المعادلة (47–9) لهذا الجريان على منحني $(T - s)$ من أجل قيم معروفة لوسيط تشغيل نجد مايسمى خط ريلية *Rayleigh line* كما في الشكل (26–9).



الشكل (25–9) جريان ريليه بمقطع ثابت.



الشكل (9–26) خط جريان ريلية.

نلاحظ من المعادلة (9–52) أيضاً اننا يمكن الحصول على قيمة عدد ماخ عند النقطة (b) بمفاضلة $(dT/ds = 0)$ فتكون السرعة عند النقطة (b)

$$V_b = \sqrt{RT}$$

أما قيمة عدد ماخ عند تلك النقطة هي

$$Ma_a = \frac{V_b}{C_b} = \frac{1}{\sqrt{k}} \qquad (54\text{-}9)$$

كما تظهر النقطة (a) التي ظهرت في جريان فانو. من تطبيق القانون الأول في الترموديناميك نجد

$$\delta q = dh_o = d\left(h + \frac{V^2}{2}\right) = c_P dT + VdV \qquad (55\text{-}9)$$

بالتقسيم على $(c_P T)$ نحصل على

$$\frac{\delta q}{c_P T} = \frac{dT}{T} + \frac{V dV}{c_P T}$$

$$\frac{\delta q}{c_P T} = \frac{dV}{V}\left\{\frac{V}{dV} * \frac{dT}{T} + \frac{(k-1)V^2}{kRT}\right\}$$

ولكن

$$\frac{dT}{dV} = \frac{T}{V} - \frac{V}{R}$$

بالتعويض نجد

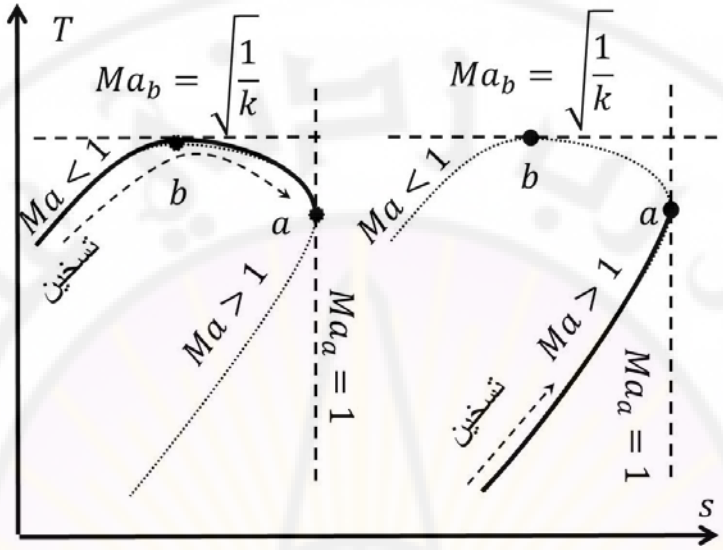
$$\frac{\delta q}{c_P T} = \frac{dV}{V}\left\{\frac{V}{T} * \left(\frac{T}{V} - \frac{V}{R}\right) + (k-1)Ma^2\right\}$$

$$\frac{\delta q}{c_P T} = \frac{dV}{V}\left\{1 - \frac{V^2}{RT} + (k-1)Ma^2\right\}$$

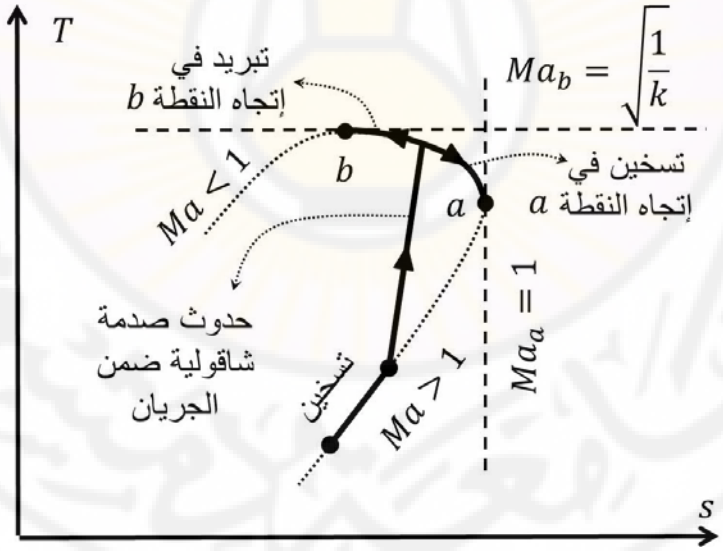
أي

$$\frac{dV}{V} = \frac{\delta q}{c_P T} * \left(\frac{1}{1 - Ma^2}\right) \qquad (56\text{-}9)$$

نلاحظ المعادلة (56–9) أنه عندما يكون الجريان تحت صوتي $(Ma < 1)$ فإن انتقال الحرارة (تسخين) إلى وسيط التشغيل $(\delta q > 0)$ يزيد من سرعته بينما تبريد وسيط التشغيل $(\delta q < 0)$ يخفض من سرعته وعندما يكون الجريان فوق صوتي $(Ma > 1)$ فإن تسخين وسيط التشغيل $(\delta q > 0)$ يخفض من سرعته بينما تبريد وسيط التشغيل $(\delta q < 0)$ يزيد من سرعته كما في الشكل (27–9). يؤدي ظهور الصدمة إلى انتقال الجريان من فوق صوتي إلى تحت صوتي كما في الشكل (28–9).

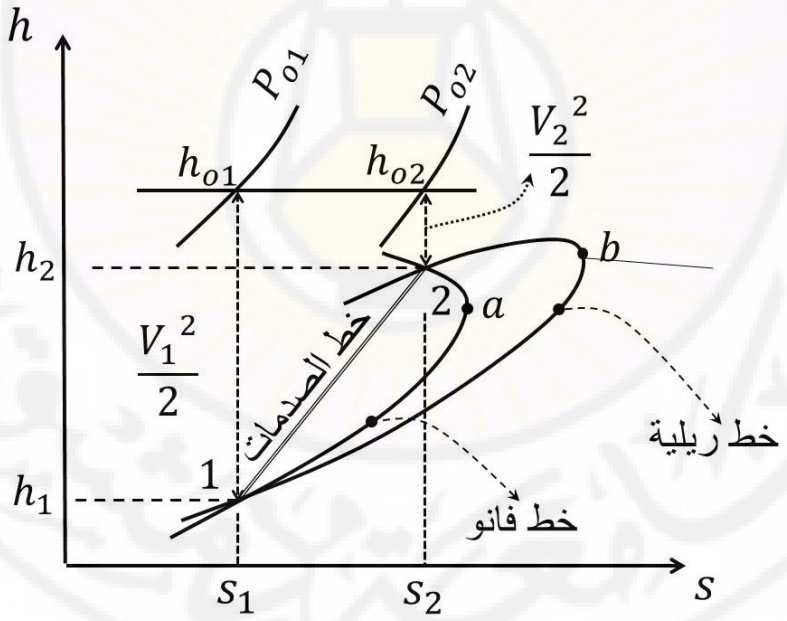


الشكل (27–9) أقسام خط جريان ريليه.



الشكل (28–9) ظهور الصدمة في جريان ريليه.

يمكن أن نستنتج بالاعتماد على القانون الثاني في الترموديناميك والذي يؤكد أن التغيير في الإنتروبي يزداد مع التسخين وينقص مع التبريد في العمليات الحقيقية أو يبقى ثابتاً في العمليات الإيزونتروبية، أن الجزء العلوي من خط جريان ريليه إلى النقطة (a) والذي يشمل النقطة (b) هو جريان تحت صوتي يساعد فيه التسخين على تسريع الجريان إلى أكبر قيمة له إلى أن يصل إلى السرعة الصوتية عند (a) والجزء السفلي من خط جريان ريليه إلى النقطة (a) هو جريان فوق صوتي يساعد فيه التسخين إلى بتباطأ الجريان إلى أقل قيمة له إلى أن يصل إلى السرعة الصوتية عند النقطة (a). يقوم التبريد بالفعل العكسي تماماً. بين النقطتين (b) و (a) تسخين الوسيط يؤدي إلى انخفاض درجة حرارته بينما تبريد الوسيط يؤدي إلى رفع درجة حرارته.



الشكل (29–9) تقاطع جريان فانو وريليه على مخطط $(h-s)$.

إذا قمنا بربط معادلة انحفاظ الكتلة ومعادلة انحفاظ الطاقة ورسمها على مخطط $(h-s)$ نحصل على منحن يسمى منحني فانو *Fanno Line*. كافة النقاط التي تقع على منحني فانو تمثل نقاط إنتالبي الركود تعطي تدفق وسيط الشتغيل. إذا قمنا بجمع معادلة انحفاظ الكتلة ومعادلة انحفاظ العطالة ورسمها على مخطط $(h-s)$ نحصل على منحن يسمى منحني ريليه *Rayleigh Line* كما في الشكل (29-9). نلاحظ أن جريان فانو وريليه يتقاطعان في نقطتين (1) و(2) واللتين تحققان قوانين الكتلة والطاقة والعطالة. يمثل الخط من النقطة (1) باتجاه النقطتين (b) و (a) جريان فوق صوتي ويمثل الخط من النقطة (2) باتجاه النقطتين (b) و (a) جريان تحت صوتي. لذلك يجب على الجريان أن يتغير من فوق صوتي إلى تحت صوتي وبالعكس إذا ظهرت الصدمة في أي نقطة قبل الوصول إلى النقطتين (b) و (a) وكلما كان عدد ماخ أكبر كانت الصدمة أقوى.

ملخص فصل ترموديناميك الغازات عند الحركة.

- إنتالبي الركود

$$h_o = h + \frac{V^2}{2} \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

- درجة حرارة الركود

$$T_o = T + \frac{V^2}{2c_p} \quad (K)$$

- السرعة الصوتية

$$C^2 = k\left(\frac{dP}{d\rho}\right)_T$$

$$C^2 = \left(\frac{dP}{d\rho}\right)_s$$

$$C = \sqrt{kPv} = \sqrt{kRT} \quad (m/s)$$

- عدد ماخ

$$Ma = \frac{V}{C}$$

- علاقة المقطع بالضغط والسرعة وعدد ماخ

$$\frac{dA}{A} = (1 - Ma^2)\,\frac{dP}{\rho V^2}$$

$$\frac{dA}{A} = (Ma^2 - 1)\,\frac{dV}{V}$$

- بارامترات الركود مع عدد ماخ في الجريانات الإيزونتروبية حيث أن الحرارة النوعية ثابتة

$$\alpha = \left(1 + \frac{k-1}{2}\,Ma^2\right)^{(-1)}$$

$$\frac{T}{T_o} = \left(1 + \frac{k-1}{2}\,Ma^2\right)^{(-1)} = \alpha$$

$$\frac{P}{P_o} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{\frac{k}{k-1}} = (\alpha)^{k/k-1}$$

$$\frac{\rho}{\rho_o} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{\frac{1}{k-1}} = (\alpha)^{1/k-1}$$

$$\frac{C}{C_o} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{1/2} = (\alpha)^{1/2}$$

- البارامترات الحرجة

$$\beta = \frac{2}{k+1}$$

$$\frac{T^*}{T_o} = \frac{2}{k+1} = \beta$$

$$\frac{P^*}{P_o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/k-1} = (\beta)^{k/k-1}$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/k-1} = (\beta)^{1/k-1}$$

$$\frac{C^*}{C_o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/2} = (\beta)^{1/2}$$

- البارامترات الحرجة للهواء

$$\frac{T^*}{T_o} = 0.8333, \quad \frac{P^*}{P_o} = 0.5283$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_o} = 0.6339, \quad \frac{C^*}{C_o} = 0.9129$$

- بارامترات الغازات المثالية بدلالة تغيير المقطع (A)

$$\varepsilon = \left(\frac{Ma^2}{Ma^2 - 1}\right)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\varepsilon * \frac{dA}{A}$$

$$\frac{dP}{P} = -\varepsilon * k * \frac{dA}{A}$$

$$\frac{dT}{T} = -\varepsilon * (k-1) * \frac{dA}{A}$$

- التدفق ضمن القناة

$$\dot{m} = \rho * A * V$$

$$\dot{m} = \left(\frac{P}{RT}\right) * A * Ma * \sqrt{kRT}$$

$$\dot{m} = \alpha^{\gamma} * Ma * A * P_o * \sqrt{\frac{k}{R * T_o}}$$

- التدفق الأعظمي

$$\dot{m}_{max} = \beta^{\gamma} * A^* * P_o \sqrt{\frac{k}{R * T_o}}$$

- بارامترات الصدمة الشاقولية

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1 + k * Ma_1}{1 + k * Ma_2}$$

$$\frac{P_{o2}}{P_{o1}} = \frac{Ma_1}{Ma_2} * \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^{(k+1)/2(k-1)}$$

$$(Ma_2)^2 = \frac{(Ma_1)^2 + \frac{2}{k-1}}{\frac{2k}{k-1}(Ma_2)^2 - 1}$$

- بارامترات الصدمة المائلة. نفس بارامترات الصدمة الشاقولية ولكن

$$Ma_{1,n} = Ma_1 * sin(\tau)$$

$$Ma_{2,n} = Ma_2 * sin(\tau - \theta)$$

$$tan\theta = \frac{2\cot\tau * (Ma_1^2 * sin^2\tau - 1)}{Ma_1^2(k + cos2\tau) + 2}$$

مسائل غير محلولة لفصل
ترموديناميك الغازات عند الحركة.

1. حدد بارامترات الركود من درجة حرارة وضغط لكل من الغازات التالية والتي تجري في قناة:
   - هيليوم بالشروط $(0.25\ MPa, 50℃. 240m/s)$.
   - نتروجين بالشروط التالية $(0.15\ MPa, 50℃. 300m/s)$.
   - بخار بالشروط التالية $(0.1\ MPa, 350℃. 480m/s)$.
2. يدخل هواء إلى ضاغط بضغط ركود $(100kPa)$ ودرجة حرارة ركود $(27℃)$ ويضغط إلى ضغط الركود $(900kPa)$. بفرض أن عملية الانضغاط إيزونتروبية حدد لاستطاعة الضاغط إذا كان تدفق الهواء $(0.02\ kg/s)$.
3. يدخل ثاني أوكسيد الكربون إلى نفاثه معزولة بدرجة حرارة $(1200\ K)$ وبسرعة $(50m/s)$ ويخرج بدرجة حرارة $(400\ K)$. بفرض أن الحرارة النوعية هي ثابتة وبدرجة حرارة الغرفة حدد عدد ملخ عند 1) المدخل و2) مخرج النفاثة.
4. بفرض أن لدينا نفاثة متقاربة وسرع صوتية عند مخرجها. تم تخفيض مساحة قطع الخروج للنفاثة مع الحفاظ على مساحة المدخل ماذا سيحدث 1) لسرعة الخروج و2) تدفق النفاثة.
5. يدخل هواء إلى نفاثة متقاربة متباعدة بضغط $(700kPa)$ وبدرجة حرارة $(450℃)$ مع سرعة مهملة. حدد السرعة الحرجة والضغط الحرج ودرجة الحرارة الحرجة والكثافة الحرجة ضمن القناة.
6. يدخل هواء إلى نفاثة متقاربة متباعدة بضغط $(0.5\ MPa)$ مع سرعة مهملة. بفرض أن الجريان إيزونتروبي حدد الضغط الخلفي الذي ينتج عند المخرج عدد ماخ بقيمة (1.8).

7. يدخل هواء إلى قناة متقاربة متباعدة بضغط ($1.2\ MPa$) وبسرعة مهملة. ماهو أخفض ضغط يمكن أن نحصل عليه في العنق.

8. يدخل هواء إلى نفاثة متقاربة متباعدة بضغط ($1.5\ MPa$) وبدرجة حرارة ($350°C$) مع سرعة مهملة. إذا فرضنا أن صدمة شاقولية تشكلت عند مخرج القناة عند عدد ماخ يساوي (2) حدد الضغط ودرجة الحرارة وعدد ماخ والسرعة وضغط الركود بعد الصدمة مباشرة.