الترمودينامیك

الجزء الثاني

السنة الثالثة

القسم: هندسة التصميم الميكانيكي

منشورات جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

الترموديناميك

الجزء الثاني

الدكتور المهندس

سهيل عرشة

أستاذ مساعد في قسم الميكانيك العام

جامعة دمشق

1438-1437 هـ

2017-2016 م

وقل رب زدني علما
Damascus University

الفهرس

مقدمة.....13

الفصل الثامن: بخار الماء.....15

8-1: تعاريف ومفاهيم أساسية.....17

8-2: عملية توليد بخار الماء عند ضغط ثابت وتمثيلها على مخطط (p,v) لبخار الماء.....19

8-2-1: عملية توليد بخار الماء عند ضغط ثابت.....19

8-2-2: تمثيل عملية توليد بخار الماء على مخطط (p,v).....21

8-3: مخطط (T,s) لبخار الماء.....24

8-4: حساب بارامترات حالة بخار الماء.....26

8-4-1: عملية تشكيل البخار عند $(p=const.)$.....27

8-4-2: حساب بارامترات بخار الماء بوساطة الجداول.....29

8-4-3: مخططات بخار الماء.....38

8-5: العمليات الترموديناميكية الأساسية على بخار الماء مع تمثيلها.....47

8-5-1: العملية الإيزوخورية $(v=const.)$.....49

8-5-2: العملية الإيزوبارية $(p=const.)$.....53

8-5-3: العملية الإيزوترمية $(t=const.)$.....57

8-5-4: العملية الأديباتية $(dq=0=const.)$.....59

مسائل غير محلولة.....63

الفصل التاسع: الهواء الرطب.....75

مقدمة.....77

9-1: تعاريف ومفاهيم أساسية.....78

9-1-1: الهواء الجاف.....78

9-1-2: الهواء الرطب.....79
9-1-3: الهواء الرطب المشبع.....80
9-1-4: الهواء الرطب غير المشبع.....80
9-2: الخواص الفيزيائية للهواء الرطب.....83
9-2-1: مضمون الرطوبة.....83
9-2-2: الرطوبة المطلقة للهواء.....85
9-2-3: الرطوبة النسبية للهواء.....85
9-2-4: درجة إشباع الهواء.....86
9-2-5: كثافة الهواء الرطب.....87
9-2-6: الحجم النوعي.....88
9-2-7: الحرارة النوعية الكتلية للهواء الرطب.....89
9-2-8: إنتالبي الهواء الرطب.....89
9-2-9: الثابت النوعي للهواء الرطب.....90
9-3: درجة حرارة نقطة الندى.....91
9-4: مخطط (h,d) للهواء الرطب.....93
9-5: العمليات الترموديناميكية على الهواء الرطب مع تمثيلها على مخطط (h,d)
.....101
9-5-1: عملية تسخين الهواء.....102
9-5-2: عملية تبريد الهواء.....104
9-5-3: عملية مزج كتل هوائية.....105
9-6: التأثير المشترك بين الماء والهواء عند تلامسهما، ترطيب الهواء الأدياباتي.....110
9-7: المخطط السايكومتري.....118

9-8: راحة الانسان والتكييف.....124
9-9: عمليات التكييف مع تمثيلها على المخطط السايكومتري.....127
مسائل غير محلولة.....130
الفصل العاشر: تغير حالة الغاز عند الحركة.....133
مفاهيم أساسية.....135
10-1: العلاقات الأساسية للغاز المتحرك.....136
10-2: تحديد سرعة الغاز وتدفقه عند حركته.....141
10-3: نسبة الانضغاط الحرجة.....146
10-4: السرعة الحرجة.....149
10-5: عمليات الجريان الحقيقية للغازات والأبخرة.....154
10-6: الخنق.....156
10-7: التأثير التفاضلي للخنق.....163
10-8: منحني الانقلاب.....167
10-9: مزج الغازات والأبخرة.....171
10-9-1: النموذج الأول هو المزج في الحجم الإجمالي.....172
10-9-2: النموذج الثاني يسمى المزج عند الحركة.....176
10-9-3: النموذج الثالث هو المزج عند التعبئة.....178
مسائل غير محلولة.....182
الفصل الحادي عشر: انضغاط الغازات والأبخرة.....183
11-1: معلومات عامة.....185
11-2: العمليات الأساسية في ضاغط مكبسي مثالي وحيد المرحلة.....187
11-2-1: مبدأ العمل.....187
11-3: حساب عمل الضاغط المثالي.....191

11-4: دورة عمل الضاغط المكبسي الفعلي.....199
11-5: إنتاجية الضاغط الفعلي.....202
11-5-1: المعامل الحجمي (λ_v).....203
11-6: كمية الحرارة المطروحة خلال عملية الانضغاط.....210
11-7: الضواغط متعددة المراحل.....212
11-8: الضواغط العنفية (التوربينية).....225
مسائل غير محلولة.....228
الفصل الثاني عشر : دورات الآلات البخارية.....233
12-1: مبدأ عمل الآلة البخارية.....235
12-2: دورة كارنو لبخار الماء.....236
12-3: دورة رانكين.....238
12-3-1: تأثير رفع الضغط البدائي (قبل الدخول للعنفة).....240
12-3-2: تأثير تحميص البخار الداخل إلى العنفة.....241
12-3-3: تأثير تخفيض ضغط التكاثف p_2 244
12-4: دورة رانكين الحقيقية.....248
12-5: الدورة مع التحميص المرحلي للبخار 249
12-6: العنفات.....252
12-7: الدورة البخارية الغازية.....253
مسائل غير محلولة.....261
الفصل الثالث عشر : دورات آلات التبريد.....265
13-1: معلومات عامة عن آلات التبريد.....267
13-2: آلات التبريد الضاغطية.....268
13-2-1: الة التبريد الضاغطية الهوائية.....268

13-2-2: دورة آلة التبريد البخارية.....275
13-2-3: الدورة النظرية لآلة التبريد البخارية.....282
13-2-4: الدورة الفعلية لآلة التبريد البخارية (في منطقة البخار المشبع الرطب).....289
13-2-5: تبريد سائل وسيط التبريد قبل صمام التمدد.....292
13-2-6: الدورة الفعلية لآلة التبريد البخارية مع سحب بخار مشبع جاف.....293
13-2-7: آلة تبريد بخارية مع مبادل حراري استرجاعي.....304
13-3: المضخة الحرارية.....306
13-4: آلات التبريد القاذفة للبخار.....307
13-4-1: مبدأ العمل، إجراء العمل النظري والمعامل الحراري.....307
13-4-2: خواص عمل آلات التبريد القاذفة البخارية عند عملها على أجسام تشغيل مختلفة.....311
13-5: آلات التبريد الامتصاصية.....311
13-5-1: مخطط ومبدأ عمل آلة التبريد الامتصاصية.....312
13-5-2 مخطط (ح.ز).....315
13-6: الأنبوبة الإعصارية.....319
13-6-1: لمحة تاريخية.....319
13-6-2: مزايا وعيوب الأنبوبة الإعصارية.....320
13-6-3: تعريفات هامة (البارامترات المميزة).....322
13-6-4: تصنيفات الأنبوبة الإعصارية.....323
13-6-4-1: الأنبوبة الإعصارية ذات الجريان المتعاكس.....323
13-6-4-2: الأنبوبة الإعصارية وحيدة الجريان.....325
مسائل غير محلولة.....326

الفصل الرابع عشر : التوصيل الحراري.....329
14-1: معلومات ومفاهيم عامة.....331
14-2: انتقال الحرارة بالتوصيل.....335
14-2-1: تعاريف ومفاهيم أساسية.....335
14-2-2: القانون الأساسي للتوصيل الحراري.....336
14-3: انتقال الحرارة عبر جدار مستو.....345
14-3-1: جدار وحيد الطبقة.....345
14-3-2: جدار مستو متعدد الطبقات.....348
14-4: انتقال الحرارة عبر جدار أسطواني.....353
14-4-1: جدار أسطواني وحيد الطبقة.....353
14-4-2: جدار أسطواني متعدد الطبقات.....356
مسائل غير محلولة.....361
الفصل الخامس عشر : عمليات التوصيل الحراري غير المستقرة.....369
15-1: معلومات ومفاهيم عامة.....371
15-2: تبريد صفيحة مستوية غير منتهية.....374
15-3: تحديد كمية الحرارة المطروحة من صفيحة أثناء عملية تبريدها.....397
مسائل غير محلولة.....405
الفصل السادس عشر : التبادل الحراري بالحمل.....409
16-1: معلومات ومفاهيم أساسية.....411
16-2: معادلة التبادل الحراري الحملي (بالحمل).....413
16-3: تشابه عمليات التبادل الحراري بالحمل.....415
16-4: الأعداد التشابهية اللابعدية.....418
الفصل السابع عشر : التبادل الحراري بالإشعاع.....425

17-1: تعاريف ومفاهيم أساسية.....427
17-2: القوانين الأساسية للإشعاع الحراري.....431
17-2-1: قانون بلانك.....431
17-2-2: قانون الإزاحة فين.....433
17-2-3: قانون ستيفان–بولتسمان.....433
17-2-4: قانون لامبرت.....434
17-2-5: قانون كيرشوف.....435
الفصل الثامن عشر : انتقال الحرارة والمبادلات الحرارية.....437
18-1: انتقال الحرارة من وسط لآخر عبر جدار.....439
18-1-1: جدار مستو متجانس وحيد الطبقة.....439
18-1-2: جدار مستو متجانس متعدد الطبقات.....442
18-1-3: جدار أسطواني متجانس وحيد الطبقة.....447
18-1-4: جدار أسطواني متجانس متعدد الطبقات.....450
18-2: المبادلات الحرارية.....453
18-2-1: المبادلات الحرارية المزجية.....455
18-2-2: المبادلات الحرارية السطحية.....455
18-3: الحساب الحراري للمبادلات الحرارية السطحية.....460
18-3-1: فرق درجة الحرارة الوسطي اللغاريتمي للمبادلات الحرارية ذات التأثير المستمر.....462
مسائل غير محلولة.....468
الملاحق.....477
الملحق -1-: جدول بخار الماء المشبع الرطب بدلالة الضغط.....479
الملحق -2-: جدول بخار الماء المشبع الرطب بدلالة درجة الحرارة.....480

الملحق -3-: مخطط ($s - i$) الفعلي لبخار الماء.....482
الملحق -4-: مخطط ($i - \log p$) للأمونيا R717.....483
الملحق -5-: مخطط ($i - \log p$) للفريون R134a.....484
الملحق -6-: جدول بخار الفريون R134a المشبع الرطب.....485
الملحق -7-: جدول بخار الأمونيا المشبع الرطب.....489
الملحق -8-: جدول بخار الفريون R22 المشبع الرطب.....493
معجم المصطلحات العلمية باللغة الإنكليزية.....498
جدول الرموز المستخدمة.....505
المراجع المعتمدة.....515

مقدمة

يعتبر كتاب الترموديناميك – الجزء الثاني – المخصص لطلاب السنة الثالثة هندسة التصميم الميكانيكي استمراراً لما تناولته من أسس ومفاهيم عرضتها في كتاب الترموديناميك الجزء الأول. يتناول هذا الجزء عرض للمفاهيم الأساسية التي تلزمنا عند دراسة بقية الآلات الحرارية والتي سنستعرضها خلاله.

من أجل ذلك بدأته بفصل مهم جدا عن الماء وبخاره الذي يعتبر كجسم تشغيل في الآلة العنفية البخارية، وقمت بوضع العلاقات الأساسية المستخدمة في حساب بارامتراته، التي نعتمدها نفسها عند دراسة آلات التبريد الضاغطة البخارية. حيث يعتبر الضاغط العنصر الأساسي فيها فأفردت له فصلاً كاملاً، وحتى يتسنى للطلاب فهم مقرر التدفئة والتكييف في السنوات الأعلى كان هناك فصل كامل عن الهواء الرطب الذي يعد كجسم تشغيل في وحدات معالجة الهواء أو عند تجفيف المواد.

لما كان الترموديناميك الهندسي يقوم على دعامتين أساسيتين هما الترموديناميك وانتقال الحرارة فكان لابد من إعطاء ولو بصورة موجزة لمحة عن المفاهيم الأساسية لانتقال الحرارة سواء بالتوصيل أو الحمل أو الاشعاع وأنهيت فصول الجزء الثاني ببحث عن المبادلات الحرارية.

لقد اتبعت عند كتابة هذا الجزء نفس الهيكلية المتبعة في الجزء الأول، حيث أرفقت بعد كل فقرة نظرية مجموعة كبيرة من الأمثلة المحلولة (قدر الإمكان) وأنهيت كل فصل بمجموعة من المسائل غير المحلولة المرفقة بالإجابات. كما زودت هذا الجزء بمجموعة من الملاحق الضرورية التي تخدم فصوله.

أرجو في النهاية أن أكون قد وفقت في عرض الأسس العلمية بشكل مبسط بما يخدم أبناءنا الطلاب ولما فيه مصلحة بلدنا الحبيب سوريا، وأن يغني مكتبتنا العلمية العربية بحيث يكون رديفا للأعمال العلمية السابقة وأساسا للأعمال القادمة. كما أنني أشكر كل من ساهم في إخراج هذا العمل العلمي المتواضع إلى حيز الوجود وهنا أخص بالشكر المهندس فراس عبود والمهندس فوزي الكيلاني لمجمل الخدمات التي قدموها.

3/2/2016 الدكتور سهيل مرشة

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الثامن

بخار الماء

- تعاريف ومفاهيم أساسية
- عملية توليد بخار الماء عند ضغط ثابت وتمثيلها على مخطط (p,v) لبخار الماء:
  - عملية توليد بخار الماء عند ضغط ثابت
  - تمثيل عملية توليد بخار الماء على مخطط (p,v)
- مخطط (T,s) لبخار الماء
- حساب بارامترات حالة بخار الماء
  - عملية تشكيل البخار عند $(p=const.)$
  - حساب بارامترات بخار الماء بوساطة الجداول
  - مخططات بخار الماء
- العمليات الترموديناميكية الأساسية على بخار الماء مع تمثيلها
  - العملية الإيزوخورية $(v=const.)$
  - العملية الإيزوبارية $(p=const.)$
  - العملية الإيزوترمية $(t=const.)$
  - العملية الأديباتية $(dq=0=const.)$
- مسائل غير محلولة

وقل رب زدني علما
Damascus University

الفصل الثامن

بخار الماء

8-1: تعاريف ومفاهيم أساسية

تستخدم في الهندسة الحرارية وهندسة التبريد الموائع المختلفة مع أبخرتها (الزئبق– الأمونيا– الفريونات وبخار الماء) كأجسام تشغيل. إن الماء وبخاره هو أكثر أجسام التشغيل انتشاراً بسبب رخص ثمنه وسهولة الحصول عليه وكذلك لعدم تأثيره على صحة الإنسان. في هذا الفصل سوف ندرس بخار الماء ولكن النتائج التي سنستخلصها منه يمكن اعتمادها بالنسبة إلى بخار أي مائع اخر .

يستخدم بخار الماء في أجهزة الطاقة عند ضغوط عالية ودرجات حرارة غير مرتفعة، عندها يكون البخار قريباً من الحالة المائعة ولا يجوز إهمال حجوم جزيئاته وقوى التماسك المؤثرة بينها. وعليه لا يجوز تطبيق قوانين الغازات المثالية (2-8 وحتى 2-20 من كتاب الترموديناميك الجزء الأول) عليه.

يعد بخار الماء للحالات المشار إليها أعلاه غازاً حقيقياً[1] ولما كانت قوانين سلوك الغازات الحقيقية معقدة وغير قابلة للاستخدام اليومي فإن حساب الغازات الحقيقية يتم بوساطة الجداول والمخططات.

التبخر والغليان

التبخر : إذا كان فوق المائع فراغ أو غاز ما فإن الجزيئات الأسرع في المائع (أي الجزيئات ذات الطاقة الحركية الأكبر) تتغلب على قوى التوتر السطحي وتغادر سطح المائع. تجري في الوقت نفسه ظاهرة معاكسة أي أن بعض جزيئات البخار الموجود فوق المائع يصطدم بسطح المائع و يعود إليه. فإذا كان عدد الجزيئات المغادرة للمائع أكبر من عدد الجزيئات العائدة إليه نقول إنه قد حصلت عملية تبخر . أما إذا كان عدد

[1] هناك حالات يجوز فيها عد بخار الماء غازاً مثالياً مثل حالات تواجد البخار في الهواء الجوي (الضغط الجزئي صغير جداً) وفي منتجات الاحتراق (درجات الحرارة مرتفعة بينما الضغط الجزئي صغير).

الجزيئات المغادرة أصغر من عدد الجزيئات العائدة فنقول إنه قد حصل تكاثف. وفي الحالة عندما تتساوى أعداد الجزيئات المغادرة والعائدة نقول إن الحالة هي حالة توازن ديناميكي أي حالة لا تبخر ولا تكاثف، ونسمي البخار الموجود فوق المائع بخاراً مشبعاً وللبخار المشبع خواص تختلف عن خواص الغاز المثالي لأن له عند درجة حرارة معينة ضغطاً معيناً موافقاً لها وهو لا يتغير مع تغير الحجم الذي يحتويه . مع ازدياد درجة الحرارة يزداد ضغط البخار المشبع.

يحصل التبخر عند أية درجة حرارة للمائع فبزيادة درجة حرارة المائع يزداد معدل الجزيئات المغادرة لسطح الماء وذلك بسبب ازدياد سرعة الجزيئات وطاقتها وانخفاض قوى التماسك فيما بينها ومن ثم فإن فعالية التبخر تتعلق بطبيعة المائع ودرجة حرارته. تعد مساحة سطح السائل المعرض للهواء وسرعة جريان الهواء المحيط بالسائل، بالإضافة إلى درجة الجفاف للوسط المحيط من العوامل الأخرى المؤثرة على شدة التبخر .

بقي أن نقول إن ظاهرة التبخر تقترن بانخفاض في درجة حرارة المائع وذلك لأن متوسط الطاقة الحركية لجزيئات المائع (الماء) المتبقية ينخفض بسبب مغادرة الجزيئات الأسرع.

الغليان: هو عملية تشكيل بخار الماء في جميع كتلة المائع. فعند تسخين مائع موجود في وعاء يبدأ بعد فترة تشكل فقاعات غازية على قعر الوعاء وجدرانه وأحياناً ضمن كتلة المائع وعندما تصل درجة حرارة المائع إلى قيمة معينة تابعة للضغط المطبق على المائع يصبح ضغط البخار المشبع داخل الفقاعات مساوياً للضغط المحيط وعندها تصبح الفقاعات قادرة على النمو . عندما تنمو الفقاعة إلى الحد الذي تصبح فيه دافعة أرخميدس قادرة على اقتطاع الفقاعة (أو فصلها عن الجدار)، فتتجه الفقاعة نحو السطح الحر وتنفجر هناك بينما تتابع الأجزاء المتبقية من الفقاعة نموها لتشكيل فقاعة جديدة. تسمى هذه العملية الغليان.

إذا حدث الغليان عند ضغط ثابت فإن درجة حرارة المائع تبقى ثابتة إلى أن تتبخر آخر قطرة ماء. تسمى درجة الحرارة التي يغلي عندها المائع درجة حرارة الغليان أو درجة حرارة الإشباع و نرمز لها بـ (t_s) وهي تابعة لضغط المائع (ضغط الإشباع)، هناك علاقة تجريبية لتحديد هذه الدرجة بالنسبة للماء من الشكل:

$$t_s \approx 100\sqrt[4]{p_s} + 0.004 \quad °C$$

حيث p_s : الضغط المطبق على الماء مقدراً بالـ $[at]$.

يتم الحصول على بخار الماء في الصناعة في أجهزة خاصة تسمى المراجل البخارية وهي ذات تصاميم وأبعاد مختلفة. فلتدفئة المنازل تستعمل مراجل ذات سطوح تسخين تقدر بعدة أمتار مربعة بينما تستعمل في المحطات الكبيرة مراجل ضخمة يبلغ ارتفاعها عشرات الأمتار ويزيد إنتاجها على (١٢٠٠) طن بخار في الساعة. في المراجل البخارية على اختلاف أنواعها يحصلون على البخار بطريقة واحدة من حيث المبدأ وهي إنتاج البخار عند ضغط ثابت أما قيم الضغط فهي متباينة جداً بدءاً من البار وحتى مئات البارات.

2-8: عملية توليد بخار الماء عند ضغط ثابت وتمثيلها على مخطط (p,v) لبخار الماء

1-2-8: عملية توليد بخار الماء عند ضغط ثابت

لنفرض أنه لدينا $1kg$ من الماء المحصور في أسطوانة مزودة بمكبس متحرك عند درجة حرارة $0°C$ والحجم النوعي $v_0 = 0.001 m^3/kg$ (للسهولة سنهمل كون كثافة الماء العظمى عند $4°C$ بدلاً من $0°C$).

تؤثر في المكبس قوة ثابتة ومن ثم فإن الضغط المؤثر في الماء الموجود تحت المكبس يبقى ثابتاً خلال العملية (انظر الشكل (٨ – ١) الوعاء a). بتسخين الماء حتى درجة حرارة الغليان t_s يزداد حجمه النوعي لـ٨حتى v' (الوعاء b) وهذا الماء ندعوه ماء مشبعاً (ماء عند بدء الغليان).

باستمرار التسخين يبدأ الماء تدريجيا بالتحول إلى بخار بينما تبقى درجة الحرارة ثابتة ومساوية لـ t_s (الوعاء c) لأن كامل الحرارة المعطاة يستوعبها الماء المتحول إلى بخار (كمية الحرارة المعطاة للماء تذهب للتغير الطوري أي: تحويل الماء السائل إلى الماء بالطور الغازي دون أن يؤدي ذلك إلى رفع درجة حرارة السائل). باستمرار التسخين تزداد كمية البخار داخل (الوعاء c) ويزداد معها الحجم إلى أن يتحول الماء الموجود كله

إلى بخار درجة حرارته t_1 (الوعاء d). هذا البخار ندعوه بخاراً مشبعاً جافاً أو بخاراً جافاً. الخليط الموجود في (الوعاء c) نسميه بخاراً مشبعاً رطباً وهو يتألف من طورين (ماء عند بدء الغليان وبخار مشبع جاف).



الشكل 8-1: عملية توليد بخار الماء عند ضغط ثابت

بما أن الأيزوبار ينطبق على الإيزوترم في منطقة البخار المشبع الرطب لذلك ومن أجل تحديد مواصفات البخار المشبع الرطب ندخل مفهوم كسر الجفاف (محتوى البخار) ونرمز له بـ χ وهو نسبة كتلة البخار المشبع الجاف إلى كتلة البخار المشبع الرطب:

$$\chi = \frac{m''}{m' + m''} \qquad (1\text{-}8)$$

حيث m'': كتلة البخار المشبع الجاف.

m': كتلة الماء المشبع.

$m' + m''$: كتلة الخليط (كتلة بخار الماء الرطب).

فعلى سبيل المثال إذا كانت $\chi = 0.5$ فإن $1kg$ من البخار المشبع الرطب يحتوي $0.5kg$ بخاراً مشبعاً جافاً والباقي ماء عند بدء الغليان أما إذا كانت $\chi = 0.9$ فهذا يعني أن $1kg$ بخاراً مشبعاً رطباً يحتوي على $0.9kg$ بخاراً مشبعاً جافاً والباقي ماء عند بدء الغليان. إذا كان الحجم النوعي لكل من: الماء عند بدء الغليان v' وللبخار المشبع الجاف v'' فإن الحجم النوعي للبخار المشبع الرطب v_χ يقع في المجال:

$$v' < v_\chi < v''$$

بمتابعة التسخين يتحول البخار المشبع الجاف إلى بخار محمص (بخار زائد التسخين). درجة حرارة البخار المحمص ترتفع مع إعطائه الحرارة وكذلك يزداد حجمه النوعي (الوعاء e). بالانطلاق مما ذكر يمكن القول إن البخار الذي له عند ضغط معين درجة حرارة أعلى من درجة حرارة البخار المشبع هو بخار محمص. وكل بخار حجمه النوعي عند ضغط ما أصغر من الحجم النوعي للبخار الجاف وأكبر من الحجم النوعي للمائع في حالة الغليان هو بخار مشبع رطب. ويكون الجسم مائعاً إذا كانت درجة حرارته أخفض من درجة حرارة الغليان عند ضغط معطى.

وهكذا فإن عملية الحصول على البخار عند $p = const.$ في الحالة العامة تتألف من ثلاث مراحل:

١) تسخين المائع حتى درجة حرارة الغليان،

٢) غليان المائع (تحويل الماء عند بدء الغليان إلى بخار مشبع جاف)،

٣) تحميص البخار.

2-2-8: تمثيل عملية توليد بخار الماء على مخطط (p,v)

لندرس عملية تشكيل بخار الماء عند ثبوت الضغط على مخطط (p,v) وسنستخدم لذلك الرموز التالية:

بارامترات الماء عند $t = 0°C$ هي: v_0, t_0, s_0, i_0

بارامترات الماء المشبع: v', t_χ, s', i'

بارامترات البخار المشبع الرطب: $v_\chi, t_\chi, s_\chi, i_\chi$

بارامترات البخار المشبع الجاف: v'', t_χ, s'', i''

بارامترات البخار المحمص: v, t, s, i

ولنفرض أنه لدينا $1kg$ من الماء عند الدرجة $0°C$ موجود في أسطوانة مزودة بمكبس متحرك تؤثر فيه قوة ثابتة $(p = const.)$ تمثل النقطة (a) على مخطط (p,v) الحالة البدائية لهذا الماء (الشكل 8-2). عند إعطاء الماء كمية من الحرارة فإن حجمه

النوعي سيزداد[٢] وعندما تصل درجة حرارته إلى t_1 يصبح حجمه النوعي v' (النقطة b) باستمرار التسخين تبدأ عملية تشكيل البخار وتبقى درجة حرارة الخليط البخاري المائي ثابتة. تستمر هذه العملية حتى الحصول على بخار مشبع جاف (النقطة d)، القطعة المستقيمة (b-d) تمثل عملية الحصول على البخار المشبع الجاف من المائع المشبع وهي قطعة مشتركة بين الإيزوبار والإيزوترم. بإعطاء الحرارة للبخار المشبع الجاف نحصل على بخار محمص (النقطة e). بإعادة التجربة ولكن عند ضغط p_1 أعلى من الضغط الأول ($p_1 > p$) فإن هذا الإيزوبار على مخطط (p,v) سيتوضع أعلى من الإيزوبار p أما النقاط الواصفة لعمليات تشكيل البخار عند هذا الضغط فستتوضع على النحو التالي:



الشكل 8-2: تمثيل عملية توليد بخار الماء على مخطط (p,v)

تتوضع النقطة ('a) الواصفة لحالة الماء البدائية على الشاقول نفسه المار من النقطة (a) (وذلك على افتراض أن الماء سائل غير قابل للانضغاط). بينما تمثل النقطة

[٢] يكون الحجم النوعي للماء أصغرياً عند درجة الحرارة 4°C+ ولتسهيل المناقشة فقد افترضنا أثناء الشرح أن الحجم النوعي الأصغري للماء هو عند 0°C.

(b') حالة الماء المشبع وتقع على يمين النقطة (b) وذلك لأنه بازدياد الضغط تزداد درجة حرارة الإشباع ومن ثم يزداد الحجم النوعي للمائع. أما النقطة (d') والتي تمثل حالة البخار المشبع الجاف عند الضغط p_1 فهي تقع على يسار النقطة (d) وأخيرا تمثل النقطة (e') حالة البخار المحمص والتي يمكن أن تقع على يمين أو يسار النقطة (e) بحسب درجة تحميص البخار. بصورة مشابهة تم الحصول على النقاط ("a، "b، "d، "e) الموافقة للضغط $p_2 > p_1$ وعلى النقاط ("'a، "'b، "'d، "'e) الموافقة للضغط $p_3 > p_2$.

بوصل النقاط ("a, a', a", a") والنقاط ("b, b', b", b") والنقاط ("d, d', d", d") نحصل على ثلاثة خطوط:

١) Aa: يمثل حالات الماء عند $0°C$.

٢) MK: المنحنى الحدي الأدنى ($\chi = 0$) ويمثل حالات الماء المشبع.

٣) NK: المنحني الحدي الأعلى ($\chi = 1$) ويمثل حالات بخار الماء المشبع الجاف.

نقطة تلاقي المنحنيين الحديين الأدنى والأعلى (النقطة K) تسمى النقطة الحرجة وهي تمثل الحالة الحرجة. بالنسبة للماء فإن بارامترات الحالة الحرجة هي:

$$t_{cr} = 374.15°C$$

$$p_{cr} = 225.65\ at$$

$$v_{cr} = v' = v'' = 0.00326\ m^3/kg$$

$$\rho_{cr} = \rho' = \rho'' = 307\ g/m^3$$

ولكل مادة نقطة حرجة خاصة بها وفيها تنطبق خواص المائع وبخاره والجدول (1-8) يبين درجة الحرارة الحرجة والضغط الحرج لبعض الغازات.

إن المنحنيين الحديين MK و NK يقسمان مخطط (p, v) إلى ثلاث مناطق:

١) منطقة المائع المحصورة بين المنحنيين Aa و MK: المنطقة ①

٢) منطقة البخار المشبع الرطب: المحصورة بين المنحنيين الحديين $\chi = 0$ و $\chi = 1$: المنطقة ②

٣) منطقة البخار المحمص: وتقع على يمين المنحنى NK: المنطقة ③

الجدول (8-1): درجة الحرارة الحرجة والضغط الحرج لبعض الغازات

اسم الغاز	الضغط الحرج [atm]	درجة الحرارة الحرجة [$°C$]
الهليوم	2.26	-267.8
الهيدروجين	12.8	-239.9
الآزوت	33.4	-147.1
الأوكسجين	49.7	-118.8
غاز الفحم	73	31
غاز الكبريت	78	157
الماء	225	374
الزئبق	-	1,550
أمونيا	11.28	132.3

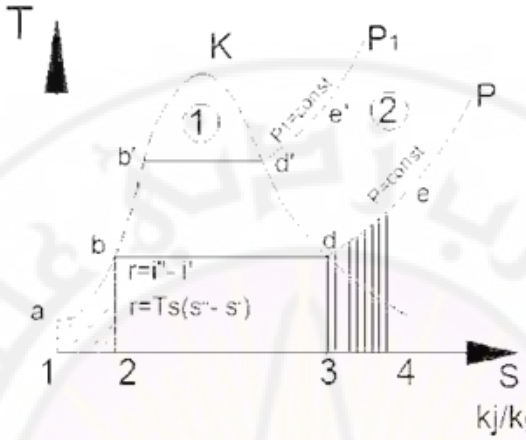
مخطط (p,v) المبين في الشكل 8-2 ذو مقياس مشوه وذلك بسبب محاولة إبراز منطقة الماء الضيقة جداً والتي يمكن أن تندمج مع المنحني الحدي الأدنى في حال رسم المخطط بمقياس نظامي.

8-3: مخطط (T,s) لبخار الماء

إن إنشاء مخطط (T,s) لبخار الماء يتم على أساس المعطيات نفسها (الجداول) التي تم على أساسها إنشاء مخطط (p,v) وعندها فإن الحالة البدائية للماء $(t_{''} = 0°C, s_{''} = 0)$ تمثلها النقطة (a) على المحور T [3] (الشكل 8-3)، أما النقطة (b)

[3] بسبب ضآلة قابلية الماء للانضغاط فإن النقطة (1) تمثل جميع حالات الماء البدائية و هي أيضاً تمثل حالة الماء المشبع عند درجة الحرارة $0°C$.

فتمثل الماء المشبع $(t = t_s, \chi = 0)$، النقطة (d) تمثل حالة البخار المشبع الجاف $(t = t_s, \chi = 1)$ والنقطة (e) تمثل حالة البخار المحمص $(t > t_s)$.



الشكل 8-3: تمثيل عملية توليد بخار الماء على مخطط (T, s)

الخط المنكسر (الإيزوبار) (a-b-d-e) يمثل عملية تشكيل البخار من الماء عند الضغط p. أما الخط المنكسر (a'-b'-d'-e') فيمثل عملية تشكيل البخار من الماء عند الضغط $p_1 > p$. بوصل النقاط الممثلة لحالات الماء المشبع نحصل على المنحني الحدي الأدنى (a-b-b'-k) (حيث $\chi = 0$). بوصل النقاط الممثلة لحالات البخار المشبع الجاف نحصل على المنحني الحدي الأعلى(d-d'-k) (حيث $\chi = 1$). انظر الشكل (3-8).

المنحنيان الحديان يقسمان مخطط (T, s) إلى ثلاث مناطق:

- منطقة الماء وهي إسفين ضيق محاذ للمنحنى الحدي الأدنى. على المخططات صغيرة المقياس تندمج منطقة المائع مع المنحني الحدي الأدنى.
- منطقة البخار المشبع الرطب (المحصورة بين المنحنيين الحديين الأدنى والأعلى) المنطقة ①
- منطقة البخار المحمص (الواقعة على يمين المنحني الحدي الأعلى $\chi = 1$) المنطقة ②

يؤدي مخطط (T,s) لبخار الماء دوراً مهماً في حسابات الهندسة الحرارية. فهو يتيح تحديد كميات الحرارة المعطاة لبخار الماء خلال أية مرحلة لأن المساحة الواقعة تحت أية عملية على هذا المخطط تقيس كمية الحرارة خلال العملية (الفقرة 3-9 من الجزء الأول)

فالمساحة الواقعة تحت الإيزوبار (a—b) على هذا المخطط تقيس كمية الحرارة اللازمة لتسخين $1kg$ من الماء إيزوبارياً من الدرجة $0°C$ وحتى درجة حرارة الغليان T_1 (حتى الحصول على ماء مشبع) وهي على المخطط ممثلة بالمساحة (1-a-b-2-1) أما المساحة تحت المنحني (b— d) أي المساحة (b-d-3-2-b) فهي تقيس كمية الحرارة اللازمة لتحويل $1kg$ من الماء المشبع إلى $1kg$ بخار مشبع جاف عند ضغط ثابت وتسمى الحرارة الكامنة لتشكيل البخار ونرمز لها r، كما أن المساحة تحت المنحني (d←e) (أي المساحة d-e-4-3-d) فهي تقيس كمية الحرارة اللازمة لتحويل $1kg$ من البخار المشبع الجاف إلى $1kg$ بخار محمص في العملية الإيزوبارية.

4-8: حساب بارامترات حالة بخار الماء

من دراسة المعادلات التجريبية المقترحة لبخار الماء بوصفه غازاً حقيقياً يمكن الاستنتاج بأنها معقدة جميعاً وغير صالحة للاستعمال في الحسابات الحرارية اليومية. وهذا ما يرغمنا على استعمال المخططات والجداول. ونظراً للأهمية الخاصة لجداول البخار في الأغراض الهندسية فقد جرت في الفترة ما بين عامي(1929) و (1934) مؤتمرات علمية لباحثي بخار الماء تمخضت عن وضع جداول هيكلية لبخار الماء حددت فيها بارامترات حالات مختارة لبخار الماء.

وبما أن ضرورات الحساب المريح والدقيق تتطلب إدراج عدد كبير من الحالات الأخرى فإن إيجاد بارامترات الحالات الإضافية يتم بالتقريب الداخلي اللاخطي بوساطة معادلات حالة بخار الماء كمعادلة فوكالوفيتش– نوفيكوف.

إن الاستعمال الواسع لبخار الماء كجسم تشغيل والزيادة المستمرة لبارامتراته (الضغط ودرجة الحرارة) في المحطات الكهرحرارية يتطلب توسيع مجالات الجداول والقيام بأعمال تجريبية جديدة.

8-4-1: عملية تشكيل البخار عند $(p = const.)$

لبعض العلاقات الخاصة بعملية تشكيل البخار عند ضغط ثابت أهمية خاصة في توضيح بعض خصائص المخططات وفي وضع شروط تحديد حالة البخار الاستقطابية وسندرس فيما يلي هذه العلاقات:

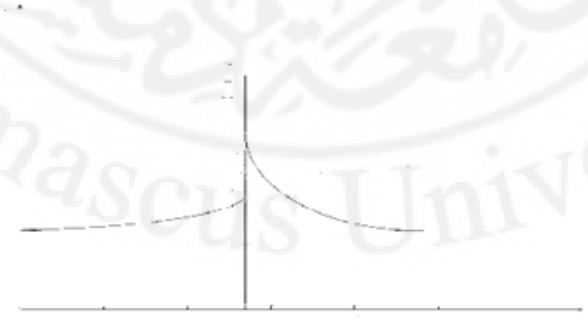
من مكاملة العلاقة $dq_p = c_p\,dT = di$ ينتج:

$$q_p = i_2 - i_1 = \int_{T_1=T_s}^{T_2} c_p\,dt \qquad (2\text{-}8)$$

من العلاقة السابقة ينتج أن ما يهم في الحسابات هو فرق الإنتالبي لذا فإن مبدأ الإحداثيات بالنسبة للإنتالبي غير مهم وقد اتفق على أن تعد حالة الماء عند $0°C$ وضغط الإشباع الموافق لدرجة الحرارة هذه مبدأ لإحداثيات الإنتالبي. إذا كان الحد الأدنى للتكامل المبين في العلاقة (8-2) $t_1 = 0°C$ والحد الأعلى $t_2 = t$ تتخذ العلاقة (8-2) الشكل التالي:

$$i = i_{at} = \int_{0°C,p}^{t,p} c_p\,dt \qquad (3\text{-}8)$$

وتكون c_p تابعة فقط لدرجة الحرارة. إن التابع $c_p = f(t)$ الموافق لضغط معين $(150at)$ في الشكل (8-4) يعاني من انفصام عند درجة الحرارة $t = t_{sp}$ (هنا $c_p = \infty$) لمنطقة الغليان ولأخذ التكامل المبين في العلاقة (8-3) لا بد من تجزئته إلى عدد من التكاملات يكون في كل منها التابع c_p مستمرا.



الشكل 8-4: التابع $c_p = f(t)$

وعلى هذا الأساس فإن العلاقة (3-8) وحسب الحالة المدروسة للبخار تتخذ أحد الأشكال التالية:

للماء: $$i - i_{o1} = \int_{0\,^\circ C,p}^{t,p} c_{pW}\,dt \qquad (4\text{-}8)$$

للبخار المشبع: $$i - i_{o1} = \int_{0\,^\circ C,p}^{t_{q=\chi},1} c_{pW}\,dt + \int_{t_{q=\chi},0}^{t_{q=\chi}} c_{pS}\,dt \qquad (5\text{-}8)$$

للبخار المحمص: $$i - i_{o1} = \int_{0\,^\circ C,p}^{t_{q=\chi},1} c_{pW}\,dt + \int_{t_{q=\chi},0}^{t_{q=\chi}} c_{pS}\,dt + \int_{t_{q=\chi},1}^{t,p} c_{pS}\,dt \qquad (6\text{-}8)$$

حيث: c_{pW} السعة الحرارية للماء.

c_{pS} السعة الحرارية للبخار المشبع وهي تساوي ∞.

c_{pS} السعة الحرارية للبخار المحمص.

يعد التكامل الثاني في المعادلتين (5-8) و (6-8) مثيرا للاهتمام لأن مكوناته $c_{pS} = \infty$ و $dt = 0$ لذا يفضل استبدال الجداء $c_{pS}\,dt$ فيه بـ dq_p وعندها يمكن فهم المعنى الفيزيائي لهذا التكامل وإيجاد قيمته.

فالتكامل الثاني من العلاقة (6-8) يحسب كمية الحرارة المعطاة لـ $1kg$ من الماء المشبع (الماء عند بدء الغليان) لتحويله إلى بخار مشبع جاف في العملية الإيزوبارية. هذه الحرارة تسمى الحرارة الكامنة لتشكيل البخار ويرمز لها بالرمز r. أما التكامل الثاني من العلاقة (5-8) فهو يحسب كمية الحرارة المعطاة لـ $1kg$ من الماء المشبع لتحويله في العملية الإيزوبارية إلى بخار مشبع رطب كسر جفافه χ. فإذا تذكرنا أن البخار المشبع الرطب هو مزيج من χkg من البخار المشبع الجاف مع $(1-\chi)kg$ من الماء المشبع فإننا نستنتج أنه للحصول على بخار مشبع رطب من ماء مشبع يجب تحويل χkg من الماء المشبع إلى بخار مشبع جاف. هذا التحويل يحتاج إلى كمية من الحرارة (في عملية إيزوبارية) قدرها $r\chi$ وعليه فإن التكامل الثاني من المعادلة (5-8) يساوي $r\chi$.

يحسب التكامل الأول في العلاقتين (5-8) و (6-8) كمية الحرارة اللازمة لتحويل $1kg$ من الماء ذي درجة الحرارة $0^\circ C$ إلى ماء مشبع في عملية إيزوبارية وهذا يعني أن

التكامل المذكور يساوي $i' - i_{0^\circ C}$. بناء على ما تقدم تتخذ العلاقتان (5-8) و (6-8) الشكل التالي:

للبخار المشبع الرطب: $i = i' + r\chi$ (5-8-أ)

للبخار المشبع الجاف $(\chi = 1)$: $i'' = i' + r$ (5-8-ب)

للبخار المحمص: $i = i' + r + \int c_{p_H} dt$ (6-8-أ)

يحسب تغير الإنتروبي في العملية الإيزوبارية من تعريف الإنتروبي الذي يتخذ للعملية الإيزوبارية الشكل التالي:

$$(ds)_p = \frac{dq_p}{T} = c_p \frac{dT}{T}$$

بالمكاملة نحصل على:

$$s_2 - s_1 = \int_{t_1, p}^{t_2, p} c_p \frac{dT}{T} \quad (7\text{-}8)$$

إذا كان الحد الأدنى للتكامل $t_1 = 0^\circ C$ والحد الأعلى $t_2 = t$ تتخذ العلاقة (7-8) الشكل التالي:

$$s - s_{0^\circ C} = \int_{273.15, p}^{T, p} c_p \frac{dT}{T} \quad (8\text{-}8)$$

ولأخذ التكامل لا بد من تجزئته إلى عدد من التكاملات يكون في كل منها التابع c_p مستمرا. هنا أيضا نحصل على العلاقات التالية:

للبخار المشبع: $s - s' + \frac{r\chi}{T_s}$ (9-8)

للبخار المشبع الجاف: $s'' = s' + \frac{r}{T_s}$ (10-8)

2-4-8: حساب بارامترات بخار الماء بوساطة الجداول:

لبخار الماء ثلاث حالات استقطابية هي الماء والبخار المشبع الرطب والبخار المحمص. فالماء والبخار المحمص أحاديا الطور في حين أن البخار المشبع الرطب ثنائي الطور. هذا الوضع يجعل من العسير وضع جدول واحد لبخار الماء. لذا فإننا

نتعامل مع جدول للماء وجدول للبخار المشبع وجدول للبخار المحمص. إن الجمع بين جدولي الماء والبخار المحمص أمر ممكن وهناك العديد من جداول الماء وبخار الماء المحمص ولكن جدول البخار المشبع هو جدول مستقل دوماً.

تدرج في جداول الماء و بخار الماء المحمص العلاقة الجدولية بين البارامترات الخمس p,v,t,i,s وأحياناً يضاف البارامتر السادس u. ويكون ترتيب الجدول وفق الطريقة المستخدمة في جداول فوكالوفيتش (انظر الشكل 8-5) كالتالي: تدرج قيم الضغط في السطر العلوي وقيم درجة الحرارة في العمود الأول. في السطر الثاني تحت كل قيمة للضغط تدرج الرموز s,i,v للفصل بين منطقتي الماء والبخار المحمص رسمت مستقيمات أفقية (أو خط منكسر)، حيث تقع منطقة الماء فوق الخط المنكسر بينما تقع منطقة البخار المحمص تحته.

أدرج القيم التالية لمساعدة الطالب على التأكد من استيعاب طريقة استخدام جداول فوكالوفيتش للماء والبخار المحمص:

$t°C$	$1bar$			$2bar$			$3bar$			$4bar$		
	v	i	s	v	i	s	v	i	s	v	i	s
0												
10												
20												
30												

الشكل (8-5): جدول بخار الماء المحمص

$i_{0,6bar,300°C} = 3,065 kJ/kg \Rightarrow$ بخار محمص

$v_{0,8bar,90\pm 5°C} = 0.0010359 m^3/kg \Rightarrow$ ماء

$v_{0,4bar,90°C} - 4.163 m^3/kg \rightarrow$ بخار محمص

$s_{0,9bar,80°C} = 1.0748 kJ/kg\,\deg \rightarrow$ ماء

القيم المدرجة أعلاه مأخوذة من جدول الماء وبخار الماء المحمص »انظر المرجع (٥)«.

بالنسبة للبارامتر السادس u فإنه يحسب من تعريف الإنتالبي $(i = u + p\,v)$ حيث يجب الانتباه إلى تجانس الواحدات نظرا لكون الواحدات المأخوذة من الجداول ليست من داخل مجموعة محددة من الواحدات (انظر الأمثلة).

في جداول البخار المشبع: تدرج فقط قيم البارامترات على المنحنيين الحديين الأعلى $(\chi = 1)$ والأدنى $(\chi = 0)$. بالإضافة إلى درجة حرارة الإشباع إذا كان الجدول بدلالة ضغط الإشباع الشكل (8-6). أما إذا كان الجدول بدلالة درجة الحرارة فتدرج قيمة الضغط في العمود الثاني الشكل (8-7).

p	t	v'	v''	i'	i''	r	s'	s''
$[bar]$	$[°C]$	$[m^3/kg]$		$[kJ/kg]$			$[kJ/kgK]$	
10	179,88	0,001273	0,1946	762,7	2,778	2,015	2,138	6,587

الشكل (8-6): جدول البخار المشبع بدلالة ضغط الإشباع

t	p	v'	v''	i'	i''	r	s'	s''
$[°C]$	$[bar]$	$[m^3/kg]$		$[kJ/kg]$			$[kJ/kgK]$	
100	1,0131	0,0010435	1,673	419,1	2,676	2,257	1,3071	7,3547

الشكل (8-7): جدول البخار المشبع بدلالة درجة الحرارة

تدرج في الأعمدة المتبقية من كلا الجدولين السابقين قيم بارامترات الماء عند الغليان (i', s', v') وبارامترات البخار المشبع الجاف (i'', s'', v'') بالإضافة إلى قيمة الحرارة الكامنة لتشكيل البخار r:

$$r = i'' - i' \qquad (أ-10-8)$$

أو:

$$r = T_s\left(s'' - s'\right) \qquad (ب-10-8)$$

ونورد في الملاحق جدول بخار الماء المشبع الرطب بدلالة الضغط (الملحق-1-) وبدلالة درجة الحرارة (الملحق-2-) وحيث أن جدول البخار المشبع يعطي فقط البارامترات على المنحنيات الحدية فإن إيجاد قيم بارامترات البخار المشبع الرطب ($0 < \chi < 1$) يتم باستخدام العلاقات الحسابية التالية (8-11) و (8-12) و (8-13) و (8-14) المستنتجة على أساس عد البخار المشبع الرطب مزيجا من البخار المشبع الجاف والماء عند بدء الغليان. سنوضح طريقة استخراج علاقة الحجم النوعي. ليكن لدينا $1kg$ من البخار المشبع الرطب ذي الضغط p (أو درجة الحرارة t) وكسر الجفاف χ هذا البخار هو مزيج من χkg من البخار المشبع الجاف ذي الحجم النوعي v'' و $(1-\chi)kg$ من الماء عند بدء الغليان ذي الحجم النوعي v'.

حجم هذا الكيلو غرام من المزيج v_χ يساوي مجموع حجمي العنصرين الداخلين في تركيبه وهما الماء وحجمه $(1-\chi)v'$ والبخار المشبع الجاف وحجمه $\chi v''$ وعليه:

$$v_\chi = \chi v'' + (1-\chi)v'$$

$$v_\chi = v' + \chi(v'' - v') \qquad (11\text{-}8)$$

نحصل بطريقة مماثلة على علاقات مشابهة للإنتالبي والإنتروبي والطاقة الداخلية:

$$i_\chi = i' + \chi(i'' - i') \qquad (12\text{-}8)$$

$$s_\chi = s' + \chi(s'' - s') \qquad (13\text{-}8)$$

$$u_\chi = u' + \chi(u'' - u') \qquad (14\text{-}8)$$

واضح أن استخدام العلاقة (8-14) قليل بسبب عدم وجود قيم u' و u'' في معظم جداول البخار المشبع.

نحصل من العلاقات (8-11) وحتى (8-14) على:

$$\chi = \frac{v_\chi - v'}{v'' - v'} = \frac{i_\chi - i'}{i'' - i'} = \frac{s_\chi - s'}{s'' - s'} = \frac{u_\chi - u'}{u'' - u'} \qquad (14'\text{-}8)$$

ملاحظة 1: يمكن تحديد إنتالبي وإنتروبي البخار المشبع الرطب وذلك بدلالة الحرارة الكامنة لتشكيل البخار r، انطلاقا من المعادلتين (8-12) و (8-13):

$$i_\chi = \chi r + i' \qquad (12'\text{-}8)$$

$$s_\chi = s' + \frac{r\chi}{T_s} \qquad (13'\text{-}8)$$

ملاحظة 2: يمكن تحديد الحجم النوعي للبخار الموجود في منطقة البخار الرطب على أنه حجم الخليط إلى كتلته:

$$v_\chi = \frac{V' + V''}{m' + m''} \qquad (15\text{-}8)$$

حيث: V', V'' حجم كل من الطور السائل والبخار المشبع الجاف على التوالي.

$V' + V''$ حجم البخار الرطب.

حجم كل طور : $V' = m'v'$ و $V'' = m''v''$

بوضع القيمتين السابقتين في المعادلة (15-8) نحصل على:

$$v_\chi = \frac{m'v' + m''v''}{m' + m''} = v'(1-\chi) + v''\chi$$

$$v_\chi = v' + \chi(v'' - v') \qquad (16\text{-}8)$$

كما نلاحظ هي نفسها العلاقة (11-8).

ملاحظة 3: نستخدم في الهندسة الحرارية أحيانا كسر الرطوبة r (بدلا من كسر الجفاف χ والذي يتحدد بالعلاقة:

$$r = \frac{m'}{m' + m''} \qquad (17\text{-}8)$$

حيث: m' كتلة الماء المشبع.

m'' كتلة البخار المشبع الجاف.

$m' + m''$ كتلة خليط البخار الرطب.

بمقارنة العلاقة (17-8) مع (1-8) نجد أن:

$$r = 1 - \chi \qquad (18\text{-}8)$$

عندما $\chi = 0$ (حالة الماء المشبع)، فإن: $r = 1$.

عندما $\chi = 1$ (حالة البخار المشبع الجاف)، فإن $r = 0$.

مثال 8-1:

حدد الحالة الاستقطابية لبخار الماء: (ماء – بخار مشبع رطب – بخار محمص – بخار مشبع جاف) مستعيناً بالجداول، إذا علمت أن حالته معطاة بالبارامترات التالية:

أ) $p = 5\,bar$ و $v = 0.22\,m^3/kg$.

ب) $p = 10\,bar$ و $t = 200°C$.

ت) $p - 20\,bar$ و $t = 212.4°C$.

ث) $p = 10\,bar$ و $v = 0.18\,m^3/kg$.

الحل:

أ) من جداول البخار المشبع مقابل الضغط ($p = 5\,bar$) (الملحق -1-) نجد:

$$p = 5\,bar \Rightarrow v' = 0.001\,m^3/kg\ ,\ v'' = 0.3749\,m^3/kg$$

كما هو واضح نجد: $v' < v = 0.22 < v''$

أي أن البخار المعطى هو بخار مشبع رطب.

ب) من جداول البخار المشبع مقابل الضغط ($p = 10\,bar$) (الملحق -1-) نجد أن: $t_s = 179.9°C$، وكما هو ملاحظ فإن:

$$t = 200°C > t_{s,10bar}$$

وبالتالي البخار المعطى هو بخار محمص ودرجة تسخينه (تحميصه):

$$\Delta t = 200 - 179.9 = 20.1°C$$

ت) للبخار عند الضغط $p = 20\,bar$ فإنه ومن الملحق -1- نجد قيمة درجة حرارة الإشباع $t_s = 212.4°C$، أي أن:

$$t = t_{s,20bar}$$

والبخار في هذه الحالة إما بخار مشبع جاف أو بخار مشبع رطب أو ماء مشبع.

ث) $p = 10\,bar \Rightarrow v' = 0.001127\,m^3/kg\ ,\ v'' = 0.1946\,m^3/kg$

$$v' < v = 0.18\,m^3/kg < v''$$

فالبخار هو بخار مشبع رطب وبما أن كل من v', v'' معلومة يبقى المجهول χ نستطيع حسابه من العلاقة (8-14):

$$\chi = \frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{0.18 - 0.0011273}{0.1946 - 0.0011273} = 0.92$$

وبالتالي يمكننا بدلالة قيمة χ أن نقوم بتحديد بقية بارامترات هذا البخار مستخدمين علاقات البخار في منطقة البخار المشبع الرطب (8-11) و (8-12) و (8-13).

ملاحظة 4: عند حساب قيمة كسر الجفاف χ لحالة معينة للبخار بالاستعانة بالعلاقات (أو قرائنه من مخطط (i,s) أو (T,s) كما سنرى ذلك لاحقا) يجب أن نأخذ رقمين بعد الفاصلة دون إجراء أي تقريب، على سبيل المثال لا يجوز تقريب χ في مثالنا بأن نكتب $\chi = 0.9$ أو $\chi = 1$ لأن ذلك يؤدي إلى اختلاف بقيم بارامترات البخار بالمقارنة مع $\chi = 0.92$.

مثال 8-2

يحتوي خزان سعته $1.5m^3$ على $5kg$ من الماء و $8kg$ من البخار المشبع الجاف. كم هو الضغط في الخزان؟

الحل:

$$v_{\chi} = \frac{V}{M} = \frac{1.5}{5+8} = 0.01154\, m^3/kg$$

أما كسر الجفاف فيتحدد من تعريف χ (8-1):

$$\chi = \frac{8}{13} = 0.615$$

ومن ثم فإن الحجم النوعي لهذا الخليط بعد إهمال قيمة v' لصغرها نكتبه بالشكل:

$$v_{\chi} = v' + \chi(v'' - v') \approx \chi v''$$

$$v'' = \frac{v_{\chi}}{\chi} = \frac{0.1154}{0.615} = 0.1876\, m^3/kg$$

من جداول بخار الماء (الملحق -1-) وبدلالة القيمة v'' الناتجة نلاحظ أن قيمة الضغط أكبر من $10\,bar$، ومن الجدول نفسه نلاحظ أنه عند:

$$p = 10\,bar \Rightarrow v' = 0.0011273\,m^3/kg \;,\; v'' = 0.1946\,m^3/kg$$

مثال 8-3

أوجد بدلالة جداول بخار الماء بارامترات البخار المشبع الرطب t, v, i, s ذي الضغط $p_1 = 15\,bar$ وكسر جفافه $\chi = 0.3$.

الحل:

$$p = 15\,bar \Rightarrow \begin{cases} v' = 0.0011539\,m^3/kg \;,\; v'' = 0.1317\,m^3/kg \\ i' = 844.6\,kJ/kg \;,\; i'' = 2,792\,kJ/kg \\ r = 1,947\,kJ/kg \\ s' = 2.314\,kJ/kg\,K \;,\; s'' = 6.445\,kJ/kg\,K \\ t = 198.28°C \end{cases}$$

بتطبيق العلاقات من (8-11) وحتى (8-13) نحصل على قيم البارامترات المطلوبة:

$$i_\chi = \chi(i'' - i') + i' \Rightarrow i_\chi = 1,428.7\,kJ/kg$$
$$v_\chi = \chi(v'' - v') + v' \Rightarrow v_\chi = 0.04\,m^3/kg$$
$$s_\chi = \chi(s'' - s') + s' \Rightarrow s_\chi = 3.553\,kJ/kg\,K$$

مثال 8-4

كم هي درجة حرارة بخار الماء في مرجل إذا علمت أن الضغط الزائد المطبق على جدرانه هو $p_M = 35\,bar$ ؟

الحل:

الضغط المطلق لبخار الماء ضمن المرجل على اعتبار أن الضغط الجوي يساوي $1\,bar$:

$$p_A = p_B + p_M = 1 + 35 = 36\,bar$$

بدلالة هذه القيمة للضغط ومن جداول البخار (الملحق -1-) نجد أن:

$$t = 244.16°C$$

مثال 8-5

يسخن الماء ذو درجة الحرارة $0°C$ والضغط $10\,bar$ إيزوبارياً. حدد حالة بخار الماء الناتج إذا علمت أن كمية الحرارة التي أعطيت له خلال عملية التسخين $q = 2{,}680\,kJ/kg$.

الحل:

$$q_p = i - i_{0\,°C,10\,bar}$$

$$i = q_p + i_{0\,°C,10\,bar}$$

من جداول الماء نجد: $i_{0\,°C,10\,bar} = 2{,}680\,kJ/kg$

من جداول البخار المشبع وعند $p = 10\,bar$ نجد قيم i' و i'' حيث: $r = 2{,}015.3\,kJ/kg$

$$i' = 762.4\,kJ/kg < i = 2{,}680\,kJ/kg < i'' = 2{,}777.8\,kJ/kg$$

فالبخار هو مشبع رطب ولتحديد كسر جفافه لدينا:

$$i_\chi = i' + \chi r \Rightarrow \chi = \frac{i_\chi - i'}{r}$$

$$\chi = \frac{2{,}680 - 762.4}{2{,}015.3} = 0.95$$

مثال 8-6

يوجد في خزان مغلق مزيج من $0.3\,kg$ ماء و $0.7\,kg$ بخار مشبع جاف وذلك عند ضغط $p = 14\,bar$ والمطلوب تحديد كسر الجفاف والإنتالبي والطاقة الداخلية والإنتروبي لهذا المزيج.

الحل:

بدلالة الضغط $p = 14\,bar$ ومن الملحق -1- نجد:

$$p = 14\,bar \rightarrow \begin{cases} v' = 0.0011489\,m^3/kg \;,\; v'' = 0.14072\,m^3/kg \\ i' = 830.1\,kJ/kg \;,\; i'' = 2{,}788\,kJ/kg \\ s' = 2.2836\,kJ/kg\,K \;,\; s'' = 6.4665\,kJ/kg\,K \end{cases}$$

$$\chi = \frac{0.7}{0.7+0.3} = 0.7$$

بالتبديل في علاقات البخار في منطقة البخار المشبع الرطب (8-11)، (8-12)، (8-13):

$$i_\chi = \chi(i'' - i') + i' \quad \Rightarrow \; i_\chi = 2,200.63 kJ/kg$$
$$v_\chi = \chi(v'' - v') + v' \Rightarrow \; v_\chi = 5.2116\, m^3/kg$$
$$s_\chi = \chi(s'' - s') + s' \Rightarrow \; s_\chi = 5.2116 kJ/kg\,K$$

8-4-3: مخططات بخار الماء

يتم إنشاء مخططات بخار الماء بوساطة المعطيات الجدولية كالتالي:

أ- تنشأ في المرحلة الأولى المنحنيات الحدية بوساطة جدول البخار المشبع. يعطي كل سطر من سطور الجدول بارامترات حالتين:

- الحالة الأولى تمثل بنقطة واقعة على المنحني الحدي الأدنى وبارامتراتها $\chi = 0, s', u', i', v', t_{sp}, p$.
- الحالة الثانية تمثل بنقطة واقعة على المنحني الحدي الأعلى وبارامتراتها $\chi = 1, s'', u'', i'', v'', t_{sp}, p$.

وتبعا لتسمية المحاور الإحداثية يتم اختيار زوج البارامترات المناسب لإنشاء نقاط المنحنيات الحدية:

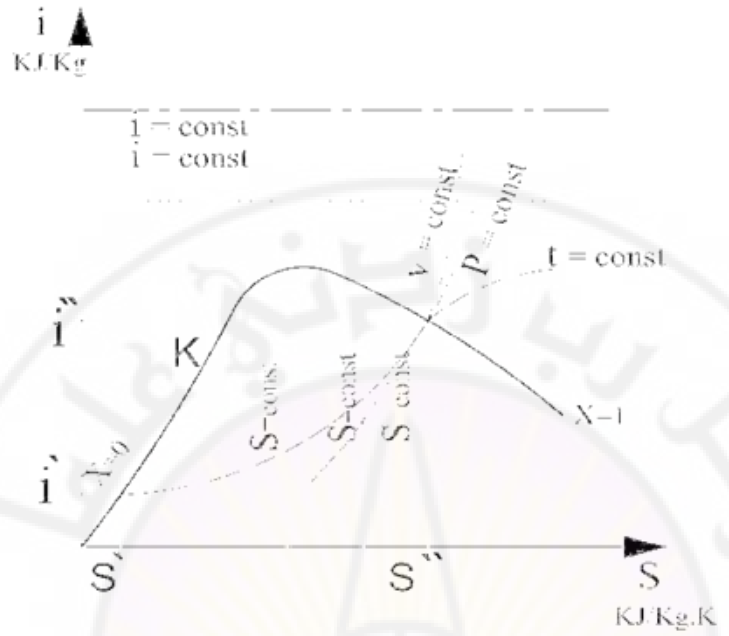
- في مخطط (p,v) تنشأ نقاط المنحني الحدي الأدنى بوساطة البارامترين (p,v') بينما تنشأ نقاط المنحني الحدي الأعلى بوساطة البارامترين (p,v'')، انظر الشكل (8-8).
- تنشأ في مخطط (T,s) نقاط المنحنى الحدي الأدنى بوساطة البارامترين (t,s') بينما تنشأ نقاط المنحني الحدي الأعلى بوساطة البارامترين (t,s''). انظر الشكل (8-9).
- تنشأ في مخطط (i,s) (وهو مخطط تمثل فيه قيم الإنتالبي على محور العينات وواحدته $[kJ/kg]$ بينما تمثل على محور السينات قيم الإنتروبي النوعي.

$[kJ/kg\,K]$) نقاط المنحني الحدي الأدنى بوساطة البارامترين (s',t') بينما تنشأ نقاط المنحني الحدي الأعلى بوساطة البارامترين (s'',t''). الشكل(8-10).



الشكل 8-8: مخطط (p,v) لبخار الماء

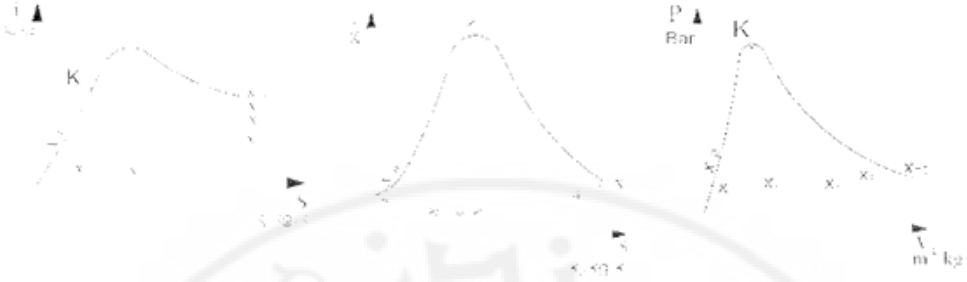
الشكل (8-9): مخطط (T,s) لبخار الماء



الشكل (8-10): مخطط (i,s) لبخار الماء

يتم إنشاء خطوط $\chi = const.$ المارة جميعها من النقطة الحرجة k والواقعة جميعها في منطقة البخار المشبع الرطب وذلك من أجل جميع المخططات، عن طريق حساب v_χ بالنسبة لمخطط (p,v) من العلاقة (8-11) وعند قيم مختلفة للضغط مع ثبات قيمة كسر الجفاف (على سبيل المثال $\chi = 0.5$). إذا حملنا النقاط الناتجة لقيم الحجم v_χ على مخطط (p,v) ووصلناها نحصل على خط ثبات كسر الجفاف الموافق لـ $\chi = 0.5$، وبصورة مشابهة يتم إنشاء خطوط كسر الجفاف الأخرى بقيم مختلفة كما هو موضح على الشكل (8-11-أ). يمكن بالطريقة نفسها إنشاء خطوط $\chi = const.$ على مخطط (T,s) ومخطط (i,s) وذلك بعد حساب s_χ عند ضغوط مختلفة ولكن عند قيم ثابتة لكسر الجفاف وهي تظهر على نفس الشكل (8-11-ب) و (8-11-ج).

ب- تنشأ في المرحلة الثانية خطوط ثبوت البارامترات المختلفة بالنقاط. في منطقة الماء تستخدم جداول الماء وفي منطقة البخار المشبع تستخدم جداول البخار المشبع بالإضافة إلى العلاقات (8-2) حتى (8-5) أما في منطقة البخار المحمص فتستخدم جداول البخار المحمص.



-ج- -ب- -أ-

الشكل (8-11): كيفية رسم خطوط $\chi = const.$ على المخططات المختلفة

- يمثل الإيزوبار في مخطط (p,v) كما في الشكل (8-8) وفي مخطط (T,s) كما في الشكل (8-10). هنا تجدر الإشارة إلى أن منطقة الماء في جميع المخططات هي إسفين ضيق محاذٍ للمنحني الحدي الأدنى وهذا ناتج عن ضعف قابلية الماء للانضغاط. لذا عند رسم المخططات تنطبق الإيزوبارات في منطقة الماء على المنحنى الحدي الأدنى[4].
- تنشأ خطوط ثبوت درجة الحرارة (الإيزوترمات) على المخططات بطريقة مشابهة لطريقة إنشاء الإيزوبات وتمثيلها على المخططات كما يلي:
  - مخطط (p,v): كما في الشكل (8-12)، وشكلها في منطقة الماء منحنيات شديدة الانحدار تكاد تكون مستقيمات شاقولية خاصة عند تمثيل منطقة الماء بالمقياس الصحيح غير المشوه بينما تنطبق على الإيزوبارات في منطقة البخار الرطب (تنكسر الإيزوترمات ضمن منطقة البخار الرطب من شكل منحني إلى مستقيمات أفقية منطبقة على الإيزوبار) ثم تصبح على شكل منحنيات من جديد في منطقة البخار المحمص.
  - تمثيلها على مخطط (T,s) مبين بالشكل (8-9) بمستقيمات أفقية.
  - مخطط (i,s): كما في الشكل (8-10) وهي في منطقة الماء تمثل بخط $i = const.$ أي بنقطة واقعة على المنحني الحدي الأدنى، أما في منطقة

[4] للضغوط ودرجات الحرارة العالية تزداد قابلية الماء للانضغاط وتبتعد الإيزوبارات قليلاً عن المنحنى الحدي الأدنى.

البخار المشبع فتمثل بمستقيمات ميلها مساو لدرجة الحرارة المطلقة، وهي تكون منطبقة على خطوط الإيزوبارات ضمن هذه المنطقة. في منطقة البخار المحمص يتناقص ميل الإيزوترمات تدريجياً إلى أن تنطبق على خطوط $i = const.$[2].



الشكل (8-12): شكل الإيزوترمات على مخطط (p,v)

- إن الإيزوخورات هي مستقيمات شاقولية في مخطط (p,v) (الشكل 8-8)، كما أنها في مخططي (T,s) و (i,s) أكثر صعوداً من الإيزوبارات (الشكلان 8-9 و 8-10).
- إن خطوط $i = const.$ في مخطط (i,s) هي مستقيمات أفقية (الشكل 8-10) أما في مخطط (T,s) (الشكل 8-9) فهي منحنيات ذات ميل سالب تتناقص قيمته المطلقة مع ازدياد الإنتروبي.
- خطوط $s = const.$ في مخططي (T,s) و (i,s) هي مستقيمات عمودية على المحور s.

---

[2] يعتبرون إنتروبي وإنتالبي الماء في النقطة الثلاثية مساويات للصفر، عندها تمثل هذه الحالة على مخطط (i,s) مبدأ الإحداثيات.

- خطوط $u = const.$ (وهي تبرز على مخطط (T,s) بصورة خاصة) تساير خطوط $i = const.$ (الشكل 8-13).



الشكل (8-13): خطوط $u = const.$ في مخطط (T,s)

نشير هنا إلى أن مخططات (i,s) المتداولة وبغية الحصول على دقة أكبر في الحسابات لا تشتمل إلا على جزء بسيط من منطقة البخار المشبع (انظر الشكل 8-14 الجزء الغامق).

إن مثل هذا المخطط مبين بالشكل (8-15)، أما مخطط (i,s) الفعلي لبخار الماء فهو مبين في الملحق -3-.

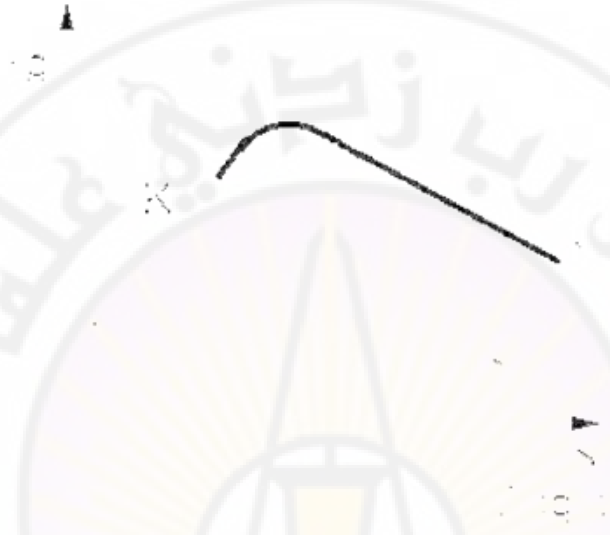
مثال 8-7:

حدد بمساعدة مخطط (i,s) درجة حرارة البخار المشبع الرطب الذي كسر جفافه $\chi = 0.4$ إذا علمت أن $p = 10\,bar$.

الحل:

لما كان البخار المعطى محدداً بقيمة $\chi = 0.4$ والضغط $p = 10\,bar$. فهو موجود في منطقة البخار المشبع الرطب التي ينطبق فيها الإيزوترم على الإيزوبار، وبما أنه معلوم لدينا قيمة الإيزوبار $p = 10\,bar$ ، فنتحرك على هذا الإيزوبار حتى يتقاطع مع

$\chi = 1$ حيث من نقطة التقاطع هذه نمرر الإيزوترم الأقرب ونقرأ قيمته وهي $180°C$. انظر الشكل (8-16). يمكن التحقق من هذه القيمة تحليليا من الملحق -1- وعند $p = 10\,bar$ فإن $t_s = 179.88°C$.



الشكل (8-14): الجزء المشمول المستخدم من مخطط (i,s) لبخار الماء

مثال 8-8:

حدد بالاستعانة بمخطط (i,s) بارامترات البخار المشبع الرطب (t,s,χ) الموجود عند ضغط $p_1 = 0.12\,bar$ والمعلوم له قيمة الإنتالبي $i = 2,400\,kJ/kg$.

الحل:

يتم تحديد موقع حالة البخار على مخطط (i,s) من تقاطع $i = 2,400\,kJ/kg$ مع منحني الإيزوبار $p_1 = 0.12\,bar$ وهي ظاهرة على مخطط (i,s) في منطقة البخار المشبع الرطب، بإسقاط نقطة التقاطع على محور s نقرأ قيمة الإنتروبي للبخار الذي لدينا $(s = 7.5\,kJ/kg\,K)$ وكسر الجفاف له $(\chi = 0.92)$ وبالطريقة نفسها المتبعة في المثال الأعلى يمكن أن نحدد درجة حرارة هذا البخار حيث نجد أن $t = 50°C$، الشكل (8-17).

الشكل (8-15): مخطط (i,s) لبخار الماء



الشكل (8-16): تابع للمثال (8-7)



الشكل (8-17) تابع للمثال 8-8

5-8: العمليات الترموديناميكية الأساسية على بخار الماء مع تمثيلها

إن حساب العمليات والدورات الترموديناميكية يستدعي القيام بما يلي:

١) تجزئة الدورة أو العملية المعقدة إلى مجموعة من العمليات الخاصة (البسيطة).

٢) تحديد الحالات الواصفة للنقاط المميزة (نقاط بداية العمليات الخاصة ونهايتها بتعريف كل حالة ببارامترين مستقلين)

٣) حساب العمل وكمية الحرارة وتغير الإنتالبي وتغير الطاقة الداخلية.

وما يميز حساب الغاز الحقيقي عن حساب الغاز المثالي هو كيفية إيجاد البارامترات المتبقية لحالة ما بمعرفة بارامترين مستقلين لها. ففي معظم الحالات تتوافر علاقات حسابية بسيطة لإيجاد البارامترات المتبقية لحالة الغاز المثالي بمعرفة بارامترين مستقلين له.

أما العلاقات الحسابية التي تسمح بإيجاد البارامترات المتبقية لحالة الغاز الحقيقي بمعرفة بارامترين مستقلين له فهي –إن وجدت– معقدة جدا وغير صالحة للاستخدام اليومي لذا فإن إيجاد البارامترات المتبقية للغاز الحقيقي يتم بوساطة الجداول أو المخططات كما يتم أحيانا بوساطة الجداول والمخططات معا والجدير بالذكر أن استخدام المخططات والجداول لا يعفي من استخدام تعريف الإنتالبي $i = u + pv$ لإيجاد البارامتر u غير المدرج فيها.

بإجراء مقارنة مقتضبة بين الحساب بوساطة الجداول والحساب بوساطة المخططات نجد:

- الحساب بوساطة الجداول أكثر شمولية فهو يشمل الماء والبخار المشبع والبخار المحمص.
- الحساب بوساطة الجداول ذو دقة عالية لا تتوافر في الحساب بوساطة المخططات.

- الزمن اللازم للحساب بوساطة الجداول أكبر بكثير من الزمن اللازم للحساب بوساطة المخططات لأنه يتطلب:
  - تحديد الحالة الاستقطابية لكل حالة من حالات البخار المراد إيجاد بارامتراتها المتبقية بوساطة جدول البخار المشبع وذلك بهدف تحديد الجدول الواجب استخدامها في إيجاد البارامترات المطلوبة.
  - عندما تكون الحالة الاستقطابية بخاراً مشبعاً رطباً فإن إيجاد البارامترات المتبقية بوساطة جدول البخار المشبع لا يكون مباشراً بل يحتاج لاستخدام العلاقات (8-11) وحتى (8-14).

علماً بأن: الحساب بوساطة مخطط (T,s) أكثر دقة وأقل شمولية من الحساب بوساطة مخطط (T,s) وذلك بسبب المقياس الأكبر لمخطط (T,s).

- في الحسابات الهندسية تقبل دقة الحساب بوساطة المخططات ذات المقياس $50\times 70\,cm$ فما فوق.
- مع أن منطقة الماء ومنطقة البخار المشبع الرطب ذات الحجوم النوعية المتدنية $v<0.01\,m^3/kg$ مبينة على مخطط (T,s) فإن دقة الحساب في هذه المنطقة متدنية ويفضل عدم الاعتماد عليها في بعض الحسابات (مثل حساب الحجم النوعي).

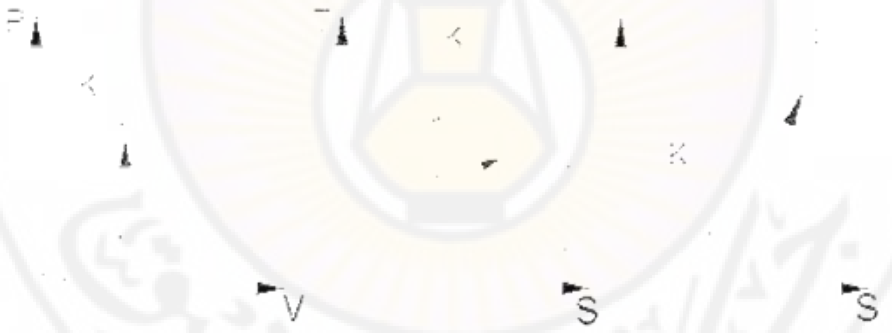
سبق وأدرجنا علاقات حسابية لحساب العمل وكمية الحرارة وتغير الأنتالبي وتغير الطاقة الداخلية في العمليات الخاصة. بعض هذه العلاقات صالح لجميع الغازات (الحقيقية والمثالية) وبعضها الآخر صالح للغازات المثالية فقط وفي جميع الأحوال فإن هذه العلاقات تربط بين البارامترات البدائية والنهائية في العملية الخاصة بالإضافة إلى العمل أو كمية الحرارة أو كليهما معاً. من بين العلاقات الحسابية المدروسة سابقاً والصالحة للغاز الحقيقي (بخار الماء) العلاقات رقم (3-8)، (3-11)، (3-14)، (3-18)، (4-2)، (4-3)، (4-9)، (4-13)، (4-31) (من الجزء الأول) وسنورد فيما يلي هذه العلاقات وسنعطيها ترقيماً جديداً.

8-5-1: العملية الإيزوخورية $(v = const.)$

إن شكل العمليات الأيزوخورية $(v = const.)$ على مخططات (p,v) و (T,s) و (i,s) مبين على الشكل (8-18) فالعملية (1←2) تمثل عملية تسخين إيزوخورية ينتقل البخار بواسطتها من حالة البخار المشبع الرطب (1) إلى حالة البخار المحمص (2) (الحالة المعاكسة تمثل عملية تبريد إيزوخورية) أما المنحنيان (a) و (b) فيمثلان عمليتين إيزوخوريتين ولكن لهما وضع خاص فالمنحني (a) يمثل عملية إيزوخورية تقع بكاملها في منطقة البخار المشبع الرطب بينما المنحني (b) يمثل عملية إيزوخورية تقع بكاملها في منطقة البخار المحمص.

على الشكل (8-19) تظهر عملية تسخين إيزوخورية في مخططات (p,v) و (T,s) و (i,s).

لنحدد $w, \Delta u, q$ خلال هذه العملية:



الشكل (8-18): تمثيل احتمالات العمليات الايزوخورية المختلفة على المخططات المختلفة



الشكل (8-19): عملية تسخين إيزوخورية في مخططات (p,v) و (T,s) و (i,s).

أ- يساوي العمل خلال العملية الإيزوخورية الصفر (انظر العلاقة 4-2 من الجزء الأول):

$$w_{1,2} = 0 \qquad (19\text{-}8)$$

ب- تتحدد كمية الحرارة المعطاة للبخار من معادلة قانون الترموديناميك الأول للعملية الإيزوخورية (انظر العلاقة 4-3 من الجزء الأول):

$$q_{1,2} = u_2 - u_1 \qquad (20\text{-}8)$$

ولما كانت العملية (1←2) المبينة على الشكل (8-19) في مخطط (T,s) موجهة نحو ازدياد الإنتروبي فإن البخار خلال العملية السابقة يكتسب كمية من الحرارة تقاس بالمساحة (122'1') الواقعة تحت العملية (1←2) (لهذه الحالة $u_2 > u_1$).

مثال 8-9

يوجد $1kg$ بخار ماء في وعاء سعته ثابتة عند ضغط $p_1 = 30bar$ ودرجة حرارة $t_1 = 600°C$ يتم طرح $400kJ$ على شكل حرارة من البخار. إلى أية قيمة سينخفض ضغط البخار ودرجة حرارته داخل الوعاء وذلك باستخدام مخطط (i,s)

الحل:

تتحدد الحالة البدائية للبخار ضمن الوعاء من تقاطع $p_1 = 30bar$ مع $t_1 = 600°C$ (وهي تقع في منطقة البخار المحمص) - الشكل (8-20).

$$u_1 = i_1 - 10^3 (p_1 v_1) = 3,684 - 10^3 (30 \times 0.13) = 3,294\,kJ/kg$$

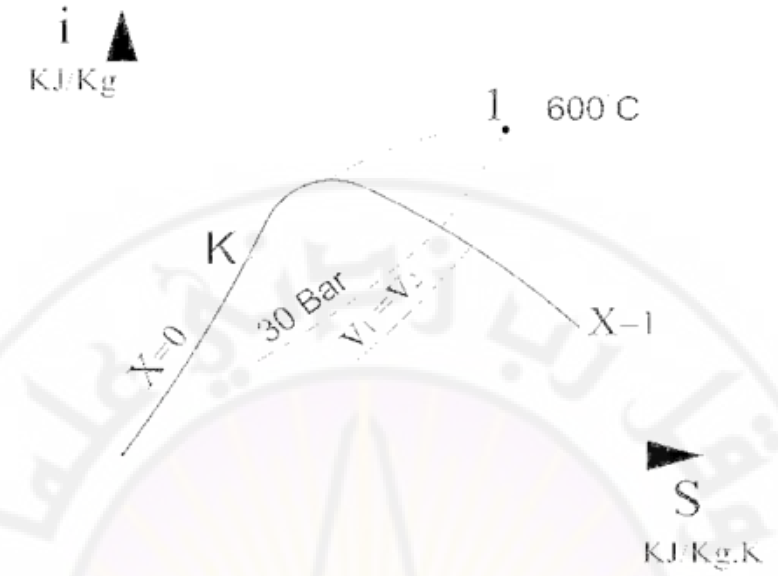
بما أن سعة الوعاء ثابتة فالحجم ثابت والعملية تتم بثبوت الحجم وبالتالي فالتبادل الحراري للعملية السابقة مرتبط بتغير الطاقة الداخلية (العلاقة 8-20):

$$q_{1,2} = u_2 - u_1 \Rightarrow u_2 = q_{1,2} + u_1$$

لكن $q_{1,2}$ مطروحة، إذا:

$$u_2 = u_1 - q_{1,2} = 3,294 - 400 = 2,894\,kJ/kg$$

نأخذ على الإيزوخور المرسوم (1←2) (الشكل 8-20) وفق قيمتين اختياريتين للضغط لا على التعيين $p_3 = 20bar$ و $p_4 = 26bar$ ونحسب ليما قيمة الطاقة الداخلية.



الشكل (8-20): تابع للمثال 8-9

عند $p_3 = 20\,bar$: $u_3 = 3{,}064 - 10^{-2}(20 \times 0.13) = 2{,}804\,kJ/kg$

عند $p_4 = 26\,bar$: $u_4 = 3{,}064 - 10^{-2}(26 \times 0.13) = 3{,}078\,kJ/kg$

وبالتالي الضغط في نهاية عملية التبريد الإيزوخوري نحصل عليها نتيجة التقريب الداخلي:

$$p_2 = 20 + \frac{(26-20)(2{,}894-2{,}804)}{3{,}078-2{,}804} = 22\,bar$$

أما درجة حرارة البخار النهائية فنحصل عليها من مخطط (i,s) وهي:

$t_2 = 370°C$

مثال 8-10

لدينا $10\,kg$ من بخار ماء ذي البارامترات $p_1 = 30\,bar$ و $t_1 = 350°C$. بعد التبريد الإيزوخوري أصبح ضغط البخار $p_2 = 20\,bar$. حدد كمية الحرارة الضائعة خلال العملية السابقة والبارامترات النهائية والعمل المنجز وذلك بمساعدة مخطط (i,s).

الحل:

بدلالة البارامترات البدائية نحدد الحالة البدائية لبخار الماء المعروفة فيها $p_1 = 30\,bar$ و $t_1 = 350°C$ وذلك على مخطط (i,s) وذلك بمقاطعة الإيزوبار $p_1 = 30\,bar$ مع الإيزوترم $t_1 = 350°C$ (النقطة 1). لهذه النقطة نجد:

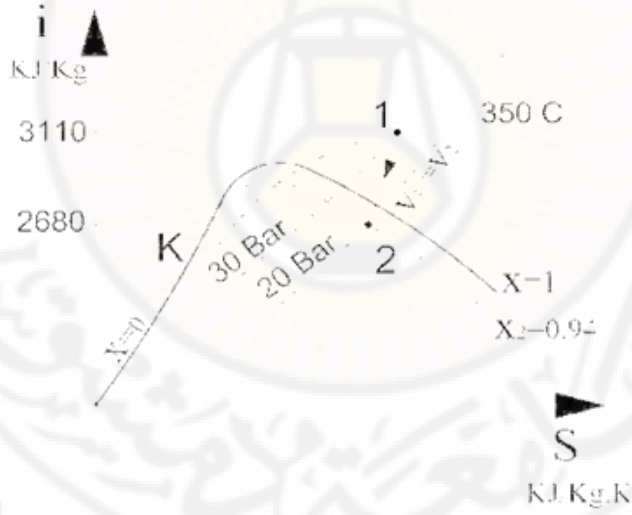
$$i_1 = 3{,}110\,kJ/kg$$

$$v_1 = 0.09\,m^3/kg$$

$$u_1 = i_1 - p_1 v_1 = (3{,}110\times10^3) - (30\times10^5\times0.09) = 2.48\times10^6\,J/kg$$

نجد النقطة (2) الواصفة للحالة النهائية للبخار وذلك بمقاطعة الإيزوخور $v_2 = v_1 = 0.09\,m^3/kg$ مع الإيزوبار $p_2 = 20\,bar$ (انظر الشكل 8-21). ولهذه النقطة نجد فيها: $i_2 = 2{,}680\,kJ/kg$ ، $\chi_2 = 0.94$

أي أن البخار في الحالة النهائية يقع في منطقة البخار المشبع الرطب.



الشكل (8-21): تابع للمثال 8-10

$$u_2 = i_2 - p_2 v_2 = (2{,}680\times10^3) - (20\times10^5\times0.09) = 2.5\times10^6\,J/kg$$

كمية الحرارة الضائعة: $q = -(u_2 - u_1)$

$$q = -(2.5 - 2.84) = +0.34\,MJ/kg$$

ولكن لدينا $10\,kg$ بخار، إذاً:

$$Q = m\,q = 10 \times 0.34 = 3.4\ MJ$$

العمل خلال العملية السابقة يساوي الصفر (العملية إيزوخورية).

2-5-8: العملية الإيزوبارية $(p = const.)$

إن شكل العملية الإيزوبارية على مخططات (p,v) و (T,s) و (i,s) مبين على الشكل (8-22) فالمنحني (1←2) يمثل عملية تسخين إيزوبارية ينتقل البخار بواسطتها من حالة البخار المشبع الرطب (1) إلى حالة البخار المحمص (2) (الحالة المعاكسة تمثل عملية تبريد إيزوبارية)، أما القطع (a) و (b) فتمثل شكل العملية الإيزوبارية في حالات خاصة كأن تكون بداية العملية ونهايتها واقعتين في منطقة البخار المحمص (b) أو بداية العملية ونهايتها واقعتين في منطقة البخار المشبع الرطب (a). يوضح الشكل(8-23) عملية تسخين إيزوبارية على مخططات (p,v) و (T,s) و (i,s) فإذا كانت الحالة البدائية ممثلة بالنقطة (1) والحالة النهائية ممثلة بالنقطة (2) فإن:

أ- العمل خلال هذه العملية (انظر العلاقة 4-9):

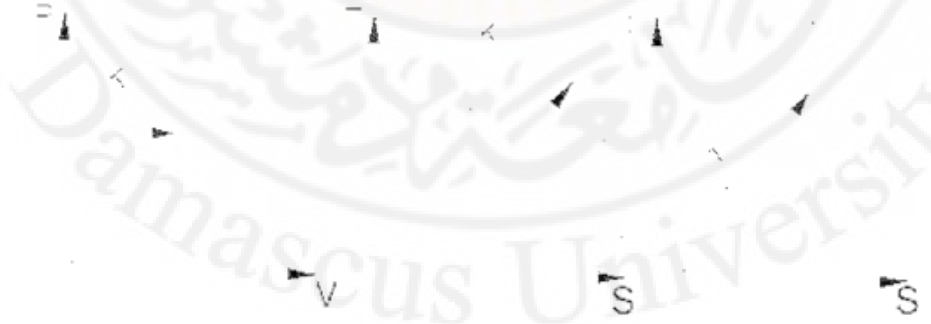
$$w_{1\,2} = p\,(v_2 - v_1) \tag{21-8}$$

ب- كمية الحرارة المكتسبة (انظر العلاقة 4-13):

$$q_p = i_2 - i_1 \tag{22-8}$$

ت- تغير الطاقة الداخلية:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (i_2 - p_2\,v_2) - (i_1 - p_1\,v_1)$$



الشكل (8-22): تمثيل احتمالات العمليات الايزوبارية المختلفة على المخططات المختلفة



الشكل (8-23): عملية تسخين ايزوبارية على مخططات (p,v) و (T,s) و (i,s)

ولكن $p = p_1 = p_2$ ، ومنه:

$$\Delta u = (i_2 - i_1) - p(v_2 - v_1) \qquad (23\text{-}8)$$

يمكن الحصول على النتيجة نفسها من تطبيق قانون الترموديناميك الأول (11-3):

$$\Delta u = q - w \qquad (24\text{-}8)$$

ملاحظة:

إن قيمة كمية الحرارة المعطاة (أو المفقودة) خلال العملية الإيزوبارية (1←2) بيانياً تساوي على مخطط (T,s) المساحة المهشرة، أما على مخطط (i,s) فهي تساوي لطول القطعة المستقيمة $i_2 - i_1$ المبين على محور التراتيب.

مثال 8-11

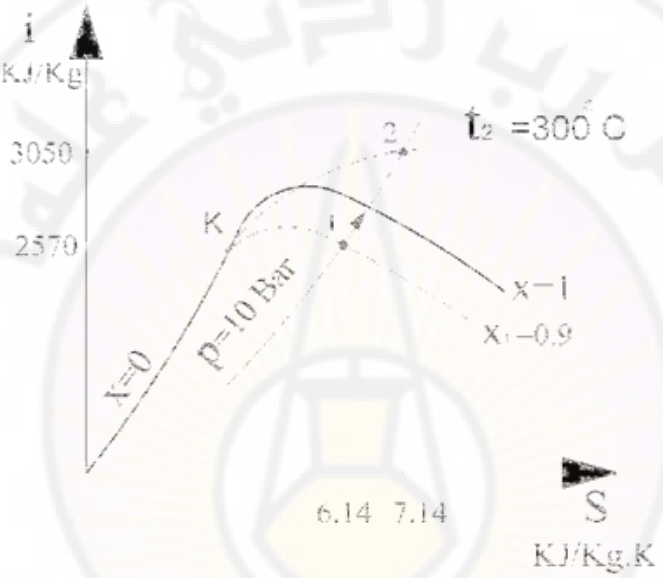
يسخن $10kg$ من بخار الماء كسر جفافه $(\chi = 0.9)$ عند $p = 10bar = const.$ حتى $300°C$. حدد البارامترات البدائية والنهائية لهذا البخار، كمية الحرارة المعطاة خلال العملية والعمل المنجز وتغير الطاقة الداخلية. حل المسألة باستخدام مخطط (i,s).

الحل:

نحدد النقطة (1) الممثلة للحالة البدائية للبخار المعطى على مخطط (i,s) وذلك من تقاطع الإيزوبار $(p_1 = 10bar)$ مع خط كسر الجفاف $\chi_1 = 0.9$ فنجد:

$$i_1 = 2{,}570\,kJ/kg$$
$$s_1 = 6.14\,kJ/kgK$$
$$v_1 = 0.18\,m^3/kg$$

نحصل على النقطة (2) من تقاطع الإيزوبار $p = 10\,bar$ مع الإيزوترم $t_2 = 300°C$، الشكل (8-24)، ومنها نجد:



الشكل (8-24): تابع للمثال 8-11

$$i_2 = 3{,}050\,kJ/kg$$
$$s_2 = 7.14\,kJ/kgK$$
$$v_2 = 0.27\,m^3/kg$$

كمية الحرارة المكتسبة:

$$Q_{1,2} = m\,q_{1,2} = m(i_2 - i_1)$$
$$Q_{1,2} = 10 \times (3{,}050 \quad 2{,}570) = 4{,}800\,kJ = 4.8\,MJ$$

العمل الذي أنجزه البخار :

$$W_{1,2} = m\,w_{1,2} = m\,p(v_2 - v_1)$$

$$W_{1,2} = 10 \times 10 \times 10^5 (0.27 - 0.18) \times 10^{-6} = 0.9\ MJ$$

$$\Delta U = m\,\Delta u = m\left[(i_2 - i_1) - p(v_2 - v_1)\right]$$

$$\Delta U = 10 \times \left[(3{,}050 - 2{,}570) - \frac{10 \times 10^5}{10^3}(0.27 - 0.18)\right] = 3.9\ MJ$$

مثال 8-12

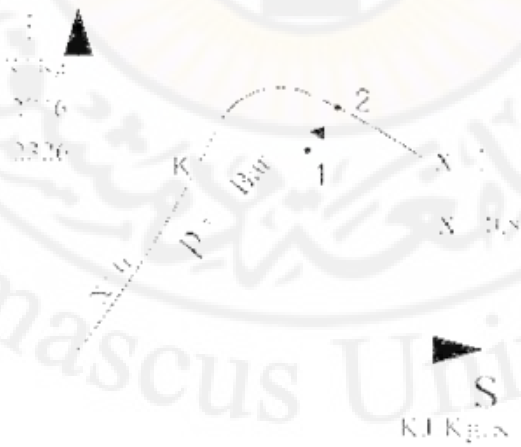
أوجد مستعينا بمخطط (i,s) الحرارة الكامنة لتشكيل البخار عند الضغط $p_1 = 5\,bar$.

الحل:

بمساعدة الإيزوبار $p = 5\,bar$ وأي خط من خطوط كسر الجفاف χ (على سبيل المثال $\chi = 0.8$) نحصل على نقطة تقاطع (1) (لاحظ الشكل 8-25)، وبدراسة عملية التسخين الإيزوبارية (1←2) (2: بخار مشبع جاف)، يمكن أن نكتب العلاقة (22-8):

$$q_{1,2} = i_2 - i_1 = r(1 - \chi)$$

$$r = \frac{i_2 - i_1}{1 - \chi} = \frac{2{,}746 - 2{,}326}{1 - 0.8} = 2{,}100\ kJ/kg$$

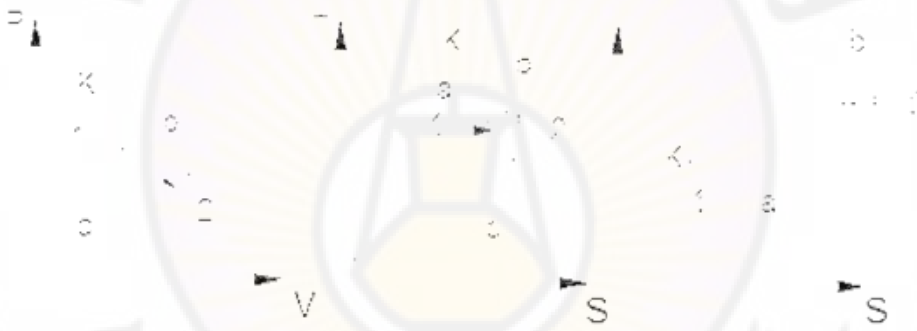


الشكل (8-25): تابع للمثال 12-8

3-5-8: العملية الإيزوترمية $(t = const.)$

شكل العملية الإيزوترمية $(t = const.)$ على مخططات (p,v) و (T,s) و (i,s) مبين على الشكل (8-26) فالمنحني (1←2) يمثل عملية إعطاء حرارة إيزوترمي لبخار الماء، خلالها ينتقل البخار من حالة البخار المشبع الرطب (1) إلى حالة البخار المحمص (2) (الحالة المعاكسة تمثل عملية فقد حرارة إيزوترمي)، أما القطع (a) و (b) فتمثل شكل العملية إما أن تقع بكاملها في منطقة البخار المشبع الرطب (a) وإما تقع بكاملها في منطقة البخار المحمص (b).

مبين بالشكل (8-27) عملية إعطاء البخار كمية حرارة إيزوترمية على المخططات (p,v) و (T,s) و (i,s).



الشكل (8-26): تمثيل احتمالات العمليات الايزوترمية المختلفة على المخططات المختلفة



الشكل (8-27): عملية اعطاء حرارة ايزوترمية على المخططات (p,v) و (T,s) و (i,s)

العلاقات الأساسية لهذه العملية:

أ- كمية الحرارة المعطاة لجسم التشغيل (انظر العلاقة 3-18 مع اعتبار $t = const.$):

$$q_{1-2} = T(s_2 - s_1) \qquad (25\text{-}8)$$

ب- العمل الذي ينجزه البخار يحسب من قانون الترموديناميك الأول (العلاقة 11-3):

$$w = q - \Delta u \qquad (26\text{-}8)$$

يصرف جزء من كمية الحرارة المعطاة للبخار في عملية تمدد إيزوترمية على تغير طاقته الداخلية، وهنا الاختلاف مع ما يجري خلال هذه العملية على الغاز المثالي حيث $\Delta u = 0$.

مثال 8-13

يتمدد $1kg$ من بخار الماء ذي درجة الحرارة $t_1 = 200°C$ إيزوترميا من الضغط $p_1 = 5bar$ وحتى الضغط $p_2 = 1bar$. حدد كمية الحرارة المعطاة، تغير الطاقة الداخلية وعمل التمدد.

الحل:

في البداية تحدد النقطة (1) الممثلة للحالة البدائية من تقاطع الإيزوبار $p_1 = 5bar$ والإيزوترم $t_1 = 200°C$ ومنها نجد:

$$i_1 = 2,850kJ/kg \;,\; v_1 = 0.43m^3/kg \;,\; s_1 = 7.05kJ/kgK$$

أما النقطة (2) فنحصل عليها من تقاطع الإيزوترم $t_1 = 200°C$ مع الإيزوبار $p_2 = 1bar$ (انظر الشكل 8-28)، وبالتالي بارامترات الحالة النهائية (2) هي:

$$i_2 = 2,875kJ/kg \;,\; v_1 = 2.2m^3/kg \;,\; s_1 = 7.84kJ/kgK$$

$$u_1 = i_1 - p_1 v_1 = 285 \times 10^3 - 5 \times 10^5 \times 0.43 \times 10^{-3} = 2,635kJ/kg$$

$$u_2 = i_2 - p_2 v_2 = 2,655kJ/kg$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 2,655 - 2,635 = 20kJ/kg$$

كمية الحرارة المكتسبة (العلاقة 8-25):

$$q_{1\,2} = T_s(s_2 \quad s_1)$$
$$= 473(7.84 - 7.05) = 373.8\,kJ/kg$$

عمل التمدد الذي قام به البخار (العلاقة 8-26):

$$w_{1\,2} = q_{1\,2} - (u_2 - u_1) = 373.8 - 20 = 353.8\,kJ/kg$$

8-5-4: العملية الأديباتية $(dq = 0 = const.)$

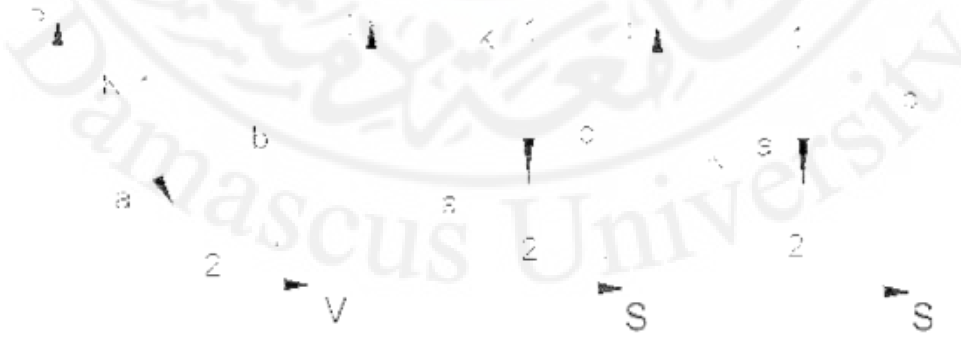
إن شكل العملية الأديباتية $(dq = 0 = const.)$ على مخططي (T,s) و (i,s) هو مستقيم مواز لمحور درجات الحرارة (حيث $s_1 = s_2$ وذلك من أجل عملية التمدد الأديباتية 1←2)، الشكل (8-29)، أما القطع (a) و (b) على هذين المخططين فهي منسوبة لحالات خاصة لجريان العملية فالقطعة (a) واقعة بكاملها في منطقة البخار المشبع الرطب أما القطعة (b) فتقع بالكامل في منطقة البخار المحمص.

تمثل عملية التمدد الأديباتي (1←2) على المخططات (p,v) و (T,s) و (i,s) كما هو مبين على الشكل (8-30) حيث تمثل النقطة (1) الحالة البدائية للبخار أما النقطة (2) فتمثل الحالة النهائية.

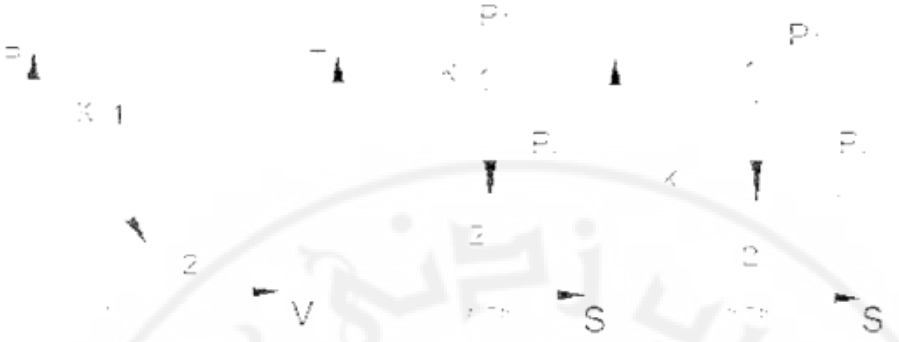
كمية الحرارة المعطاة لجسم التشغيل (انظر العلاقة 4-31):

$$q_{1\,2} = 0 \qquad (27\text{-}8)$$

العمل الذي ينجزه البخار يحسب من قانون الترموديناميك الأول (انظر العلاقة 4-37):



الشكل (8-29): تمثيل احتمالات العمليات الأديباتية المختلفة على المخططات المختلفة



الشكل (8-30): عملية التمدد الاديباتي على المخططات (p,v) و (T,s) و (i,s)

$$w_{1,2} = -\Delta u = u_1 - u_2 \qquad (28\text{-}8)$$

مثال 8-14

يتمدد $1kg$ من البخار أديباتياً من الضغط $p_1 = 5bar$ ودرجة حرارة $t_1 = 250°C$ حتى الضغط $p_2 = 0,5bar$. حدد بمساعدة مخطط (i,s) بارامترات البخار للحالتين البدائية والنهائية، عمل التمدد، تغير الطاقة الداخلية.

الحل:

نحدد في البداية حالة البخار البدائية (النقطة 1)، الشكل (8-31) وذلك من تقاطع الإيزوبار $p_1 = 5bar$ والإيزوترم $t_1 = 250°C$، ونجد بارامترات الحالة (1)، وهي:

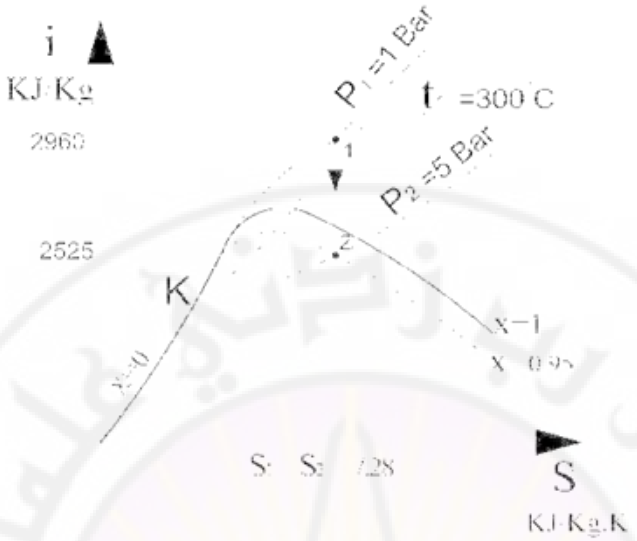
$$i_1 = 2,960kJ/kg \ , \ v_1 = 0,48m^3/kg \ , \ s_1 = 7,28kJ/kgK$$

ولما كانت العملية (1←2) أديباتية، إذا:

$$s_2 = s_1 = 7,28kJ/kgK$$

من ثم لكي نحصل على النقطة (2) نقاطع الإيزوبار $p_2 = 0,5bar$ مع $s_2 = 7,28kJ/kgK$، وبالتالي:

$$i_2 = 2,525kJ/kg \ , \ v_2 = 3,5m^3/kg \ , \ \chi = 0,95$$



الشكل (8-31)، تابع للمثال (8-14)

تغير الطاقة الداخلية للعملية السابقة:

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

$$u_1 = i_1 \quad p_1 v_1 = 2{,}960 \quad \left(5\times10^5 \times 0.48\times10^{-3}\right) = 2{,}720\,kJ/kg$$

$$u_2 = i_2 - p_2 v_2 = 2{,}525 - \left(0.5\times10^5 \times 3.5\times10^{-3}\right) = 2{,}350\,kJ/kg$$

$$\Delta u = -370\,kJ/kg$$

وبالتالي عمل التمدد خلال العملية الأديباتية (1←2):

$$w = -\Delta u = +370\,kJ/kg$$

يمكن تلخيص العلاقات المستخدمة في حسابات بخار الماء والتي سبق واستخرجناها ووضعها في جدول كما هو مبين في الجدول (8-2).

العلاقات الموجودة في الجدول (8-2) موضوعة من أجل $1kg$ بخار ماء، وفي حال شارك $m\,kg$ من بخار الماء في عملية لا على التعيين ما علينا سوى ضرب علاقات $q, w, \Delta u$ بالقيمة M بحيث نكتب:

$$Q = m\,q$$

$$W = m\,w$$

$$\Delta U = m\,\Delta u$$

الجدول (8-2): العلاقات الأساسية المستخدمة في حساب العمليات الترموديناميكية الجارية على بخار الماء

العلاقة اسم العملية	كمية الحرارة النوعية q	العمل النوعي w	تغير الطاقة الداخلية النوعية $\Delta u = u_2 - u_1$
الإيزوبارية $(p = const.)$	$q = i_2 - i_1$	$w = p(v_2 - v_1)$	$\Delta u = u_2 - u_1$ $u_2 = i_2 - p_2 v_2$ $u_1 = i_1 - p_1 v_1$
الإيزوترمية $(T = const.)$	$q = T(s_2 - s_1)$	$w = q - \Delta u$	
الأديباتية $(\Delta s = 0)$	$q = 0$	$w = -\Delta u$	
الإيزوخورية $(v = const.)$	$q = \Delta u$	$w = 0$	

مسائل غير محلولة

1-8

حدد مستعيناً بجداول بخار الماء البارامترات المتبقية للبخار المشبع الجاف ذي الضغط $p = 10\,bar$.

الجواب: $t_s = 179.88°C, v'' = 0.1946\,m^3/kg$
$i'' = 2,777.8\,kJ/kg, s'' = 6.5867\,kJ/kgK$

2-8

حدد الحالة الاستقطابية لبخار الماء ذي البارامترات:

أ) درجة الحرارة $t = 300°C$ والضغط $p = 60\,bar$.

ب) الضغط $p = 45\,bar$ وحجم نوعي $v = 0.0707\,m^3/kg$.

ت) الضغط $p = 20\,bar$ ودرجة حرارة $t = 263.37°C$.

الجواب: البخار في جميع الحالات محمص

3-8

أوجد قيم الإنتالبي والطاقة الداخلية والحجم النوعي لبخار الماء ذي الضغط $p = 90\,bar$ وكسر جفافه 80% .

الجواب: $i_x = 2,466.3\,kJ/kg$
$v_x = 0.016645\,m^3/kg$
$u_x = 2,317\,kJ/kg$

4-8

أوجد بدقة (باستخدام جداول بخار الماء): الحجم النوعي – الإنتالبي – الإنتروبي – الطاقة الداخلية لبخار الماء المشبع الرطب ذي الضغط $p = 5\,bar$ وكسر الجفاف 85% .

الجواب: $v_x = 0.3187\,m^3/kg, i_x = 2,432\,kJ/kg$
$u_x = 2,273\,kJ/kg, s_x = 6.079\,kJ/kgK$

5-8

حدد بمساعدة مخطط (i,s) بقية بارامترات البخار إذا علمت:

أ) الضغط $140\,bar$ ودرجة الحرارة $817\,K$.

ب) درجة الحرارة $100°C$ والحجم النوعي $v=1.4\,m^3/kg$.

ت) الضغط $2\,bar$ ودرجة الحرارة $250°C$.

الجواب: أ) $i=3,432.5\,kJ/kg, v=0.0243\,m^3/kg,$
$v=6.5304\,kJ/kgK$

ب) بخار مشبع رطب $\chi=0.85$

ت) بخار محمص $v=1.2\,m^3/kg$

6-8

يشغل $2\,kg$ من بخار الماء المحمص حجماً وقدره $1\,m^3$. أوجد ضغط البخار إذا علمت أن درجة حرارته تساوي $490°C$. استخدم مخطط (i,s).

الجواب: $p=7\,bar$

7-8

يشغل $16\,kg$ من بخار الماء المشبع الجاف حجماً وقدره $4\,m^3$. أوجد درجة الحرارة وضغط الإشباع لهذا البخار.

الجواب: $p=8\,bar, t=170°C$

8-8

حدد كتلة وإنتالبي $0.6\,m^3$ من بخار الماء إذا علمت أن كسر جفافه $\chi=0.2$ وضغطه $p=12\,bar$.

الجواب: $I_\chi=2,843.1\,kJ, m=1.24\,kg$

9-8

يحتوي خزان فولاذي كروي الشكل بخاراً رطباً ضغطه $p_1=55\,bar$ وكسر جفافه $\chi=80\%$. القطر الداخلي للخزان $800\,mm$. كم سيصبح الضغط داخل الخزان إذا

قدمنا له كمية من الحرارة قدرها $Q = 6{,}000\,kJ$؟ ماذا سيحدث للماء الموجود في الخزان عندئذ؟ أهمل الضياعات الحرارية إلى الوسط المحيط.

الجواب: $p_2 = 102.9\,bar$

10-8

يوجد في النصف العلوي لوعاء كروي الشكل بخار ماء مشبع جاف وفي النصف السفلي ماء مشبع. بكم مرة تكبر كتلة الماء كتلة البخار إذا علمت أن الضغط داخله $p = 20\,bar$.

الجواب: تكبر بـ 84.7 مرة

11-8

حدد كمية الحرارة الواجب إعطاؤها لـ $1\,kg$ من بخار الماء ذي البارامترات البدائية $p_1 = 980\,kPa$ و $\chi_1 = 0.7$ في تحول بثبوت الحجم كي تزداد درجة حرارته حتى $573\,K$.

الجواب: $q = 1{,}058\,kJ/kg$

12-8

كم يجب صرف حرارة على بخار ماء مشبع جاف يشغل حجماً مقداره $v = 0.5\,m^3/kg$ حتى يسخن عند حجم ثابت إلى درجة الحرارة $t = 650°C$، وعندها بكم مرة يزداد ضغط البخار؟

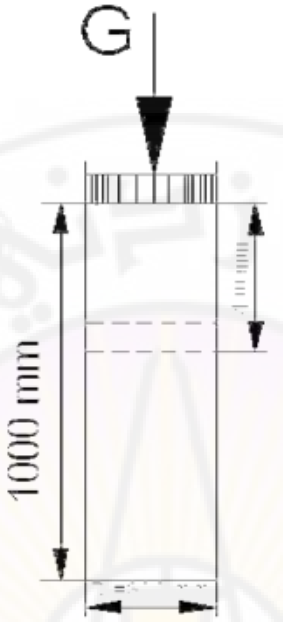
الجواب: $q = 755\,kJ/kg$، يزداد الضغط بـ 2.2 مرة

13-8

يوجد بخار محمص في أسطوانة مزودة بمكبس (الشكل 8-32) ضغطه البدائي $p_1 = 23\,bar$ ودرجة حرارته $t = 300°C$. يتوضع المكبس في الحالة البدائية على ارتفاع $1{,}000\,mm$ من قاع الأسطوانة. ينضغط البخار المحمص تحت تأثير حمل خارجي موجود على المكبس الذي يتحرك من جراء ذلك مسافة $400\,mm$.

حدد العمل المصروف على الانضغاط وكمية الحرارة المطروحة.

الجواب: $W = 65kJ$ ، $Q = 447kJ$



الشكل (8-32): تابع للمسألة (8-13)

14-8

يسخن $1kg$ من بخار الماء ذي البارامترات البدائية $p_1 = 12bar$ و $\chi_1 = 80\%$ تارة عند ثبوت الضغط وتارة عند ثبوت الحجم فينتج في كلتا الحالتين بخار محمص درجة حرارته النهائية $250°C$. في أية حالة تكون كمية الحرارة أكبر وبكم مرة؟

الجواب: عند $p = const.$ وبـ 1,100 مرة

15-8

يتمدد $1kg$ من بخار الماء المشبع الجاف إيزوترميا من الضغط $p_1 = 40bar$ وحتى $p_2 = 10bar$. كم سيكون العمل المنجز .

الجواب: $w = 339kJ/kg$

16-8

ينضغط $1kg$ بخار ماء محمص إيزوترمياً من الحالة البدائية الموصوفة بالبارامترات $p_1 = 1bar$ و $t = 250°C$ حتى يصبح كسر جفافه $\chi_2 = 0.85$. أوجد كمية الحرارة المفقودة، تغير الطاقة الداخلية والعمل المصروف على الانضغاط.

الجواب: $w = -923kJ/kg, \Delta u = -362kJ/kg, q = -1,285kJ/kg$

17-8

يتمدد $1kg$ من بخار الماء المشبع الرطب إيزوترمياً من الحالة البدائية $p_1 = 20bar$ و $\chi_1 = 0.8$ حتى يتحول إلى بخار مشبع جاف. أوجد كمية الحرارة المتبادلة مع الوسط الخارجي وتغير طاقته الداخلية بالقيمة والإشارة.

الجواب: $q = 380kJ/kg, \Delta u = 340kJ/kg$

18-8

يتمدد $1kg$ من بخار الماء المشبع الجاف ذي الضغط البدائي $p_1 = 25bar$. كم سيكون الحجم النوعي للبخار في نهاية عملية التمدد إذا علمت أن هذا البخار يكتسب خلال العملية السابقة كمية من الحرارة وقدرها $650kJ/kg$.

الجواب: $v_2 = 1.053m^3/kg$

19-8

ينضغط $1kg$ من بخار الماء إيزوترمياً من الحالة البدائية الموصوفة بالبارامترات $p_1 = 1.6bar$ و $t_1 = 350°C$ فيفقد من جراء ذلك كمية من الحرارة وقدرها $1,315kJ/kg$. أوجد ضغط البخار في نهاية عملية الانضغاط، تغير طاقته الداخلية وعمل العملية.

الجواب: $p_2 = 90bar, \Delta u = -154kJ/kg, w = -1,469kJ/kg$

20-8

يخضع $1kg$ من بخار الماء إلى العمليات التالية: في البداية يتمدد إيزوترمياً من الحالة (1) ذات البارامترات $p_1 = 50bar$ و $\chi_1 = 0.85$ إلى الحالة النهائية $p_2 = 5bar$ (النقطة 2) وبعدها يتم تبريده عند ثبوت الضغط حتى القيمة الأولية لكسر

الجفاف (النقطة 3). أوجد تغير الطاقة الداخلية والعمل خلال العملية المركبة السابقة بالقيمة والإشارة.

الجواب: $\Delta u = -99\,kJ/kg, w = 519\,kJ/kg$

مخططات العمليات الجارية على بخار الماء على (p,v) و (T,s) و (i,s) موضحة في الشكل (8-33).



الشكل (8-33): تابع للمسألة (8-20)

21-8

البارامترات البدائية لبخار الماء المحمص هي $p_1 = 20\,bar$ و $t_1 = 400°C$. يخضع البخار للعمليات التالية: في البداية يتمدد أديباتيا حتى الحصول على بخار مشبع جاف (النقطة 3) ومن ثم يبرد عند ثبوت الحجم إلى درجة الحرارة $115°C$ (النقطة 2). المطلوب: أوجد العمل خلال العملية المركبة 1←2.

الجواب: $w = 414\,kJ/kg$

22-8

يسخن $1kg$ من بخار الماء المشبع الجاف إيزوباريا من الحالة (1) حيث $p_1 = 110\,bar$ حتى الحالة (3) حيث درجة الحرارة $t_2 = 510°C$. بعد ذلك يتمدد أديباتيا حتى يصبح بخارا مشبعا جافا الحالة (2). أوجد درجة حرارة التسخين (مقدار التحميص)، تغير الطاقة الداخلية وتغير الإنتالبي في العملية المركبة 1←2.

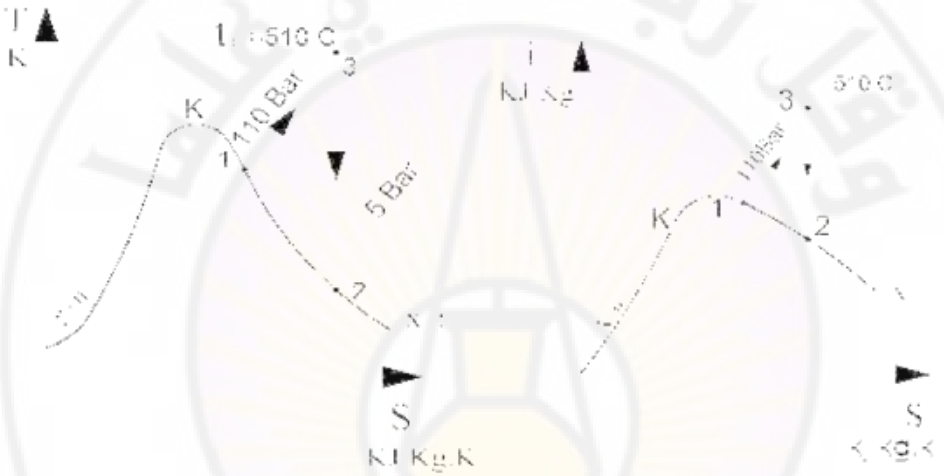
الجواب: $q_{1\,2} = 884\,kJ/kg, \Delta u_{1\,2} = 58.25\,kJ/kg, \Delta i_{1\,2} = 76\,kJ/kg$

أما تمثيل العملية 1←2 فهي مبينة على الشكل (8-34).

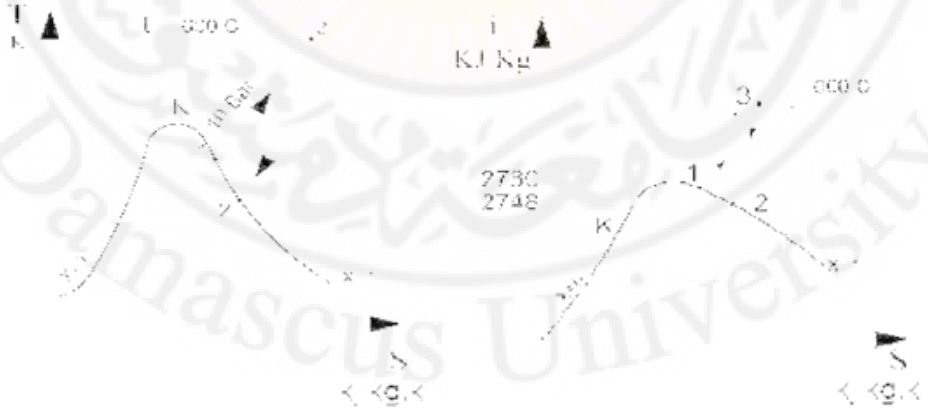
23-8

يسخن $1kg$ من بخار الماء المشبع الجاف إيزوبارياً من الحالة (1) حيث $p_1 = 10\,bar$ حتى الحالة (3) حيث $t_3 = 600°C$، ومن ثم يبرد عند ثبات الحجم حتى يصبح من جديد بخاراً مشبعاً جافاً (الحالة 2). الشكل (8-35). أوجد تغير الإنتالبي والإنتروبي والطاقة الداخلية خلال العملية المركبة السابقة.

الجواب: $\Delta s = 0.25\,kJ/kgK$ ، $\Delta u = -26\,kJ/kg$ ، $\Delta i = -32\,kJ/kg$



الشكل (8-34): تابع للمسألة (8-22)



الشكل (8-35): تابع للمسألة (8-23)

24-8

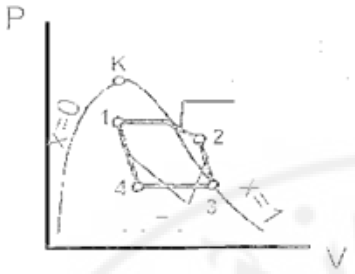
يحقق $1kg$ من بخار الماء دورات حرارية مباشرة، المعطيات الأساسية الضرورية للحل مبينة على مخطط كل دورة ممثلة على مخطط (p,v) (الدورات مرسومة دون الأخذ بعين الاعتبار لمقياس الرسم). حل الدورات الأنفة الذكر بمساعدة مخطط (i,s) لبخار الماء محددا:

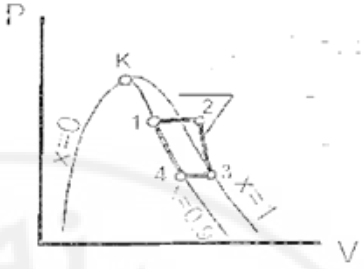
١- تمثيل الدورات السابقة على مخططي (T,s) و (i,s).

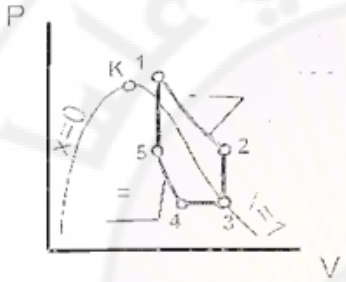
٢- تحديد البارامترات p,T,v,i,s,u في النقاط المميزة لكل دورة.

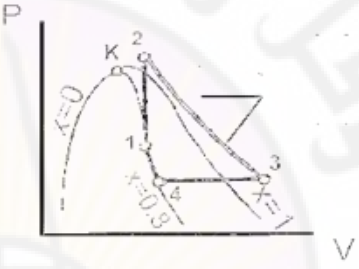
٣- كميات الحرارة q وتغير الطاقة الداخلية Δu والعمل w لكل عملية على حدة، ثم رتب النتائج في جدول.

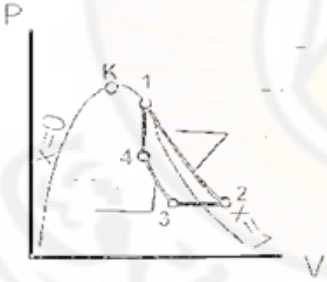
٤- كميات الحرارة المعطاة q_1 والمفقودة q_2 وعمل الدورة (العمل المفيد w_t)، ومن ثم أوجد المردود الحراري η_t.

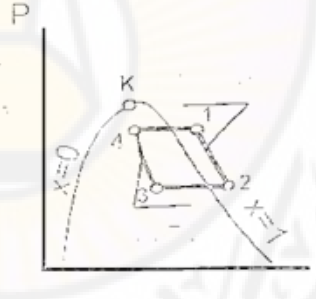

P
K
x=0
1
2
4
3
x=1
V

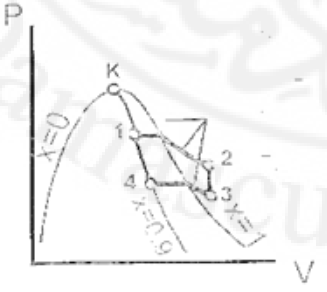

P
K
x=0
1
2
4
3
x=0,9
x=1
V

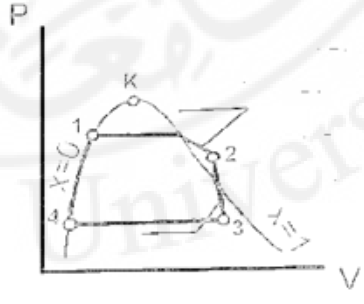

P
K
1
x=0
5
2
4
3
x=1
V

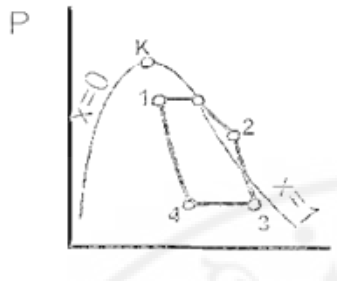

P
K
2
x=0
1
3
4
x=0,9
x=1
V

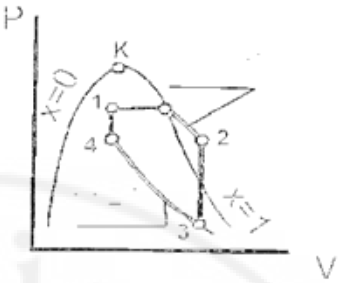

P
K
1
x=0
4
2
3
x=1
V

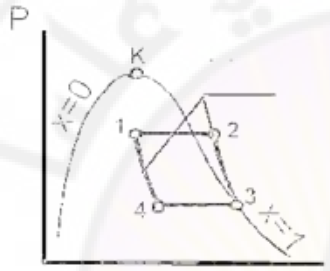

P
K
1
4
x=0
2
3
x=1
V

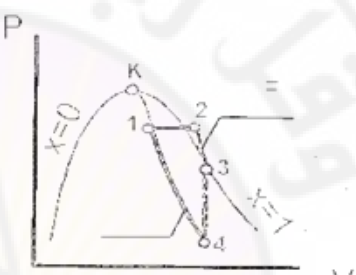

P
K
x=0
1
2
4
3
x=0,9
x=1
V

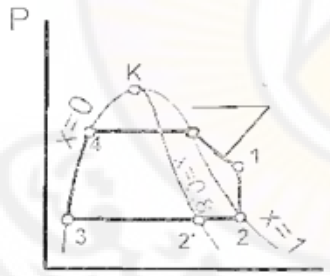

P
K
x=0
1
2
4
3
x=1
V

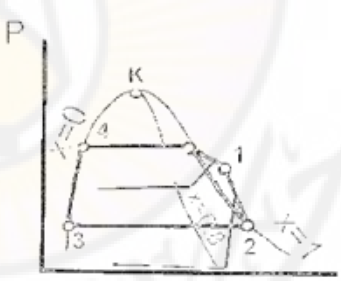

P
K
x=0
1
2
4
3
x=1
V

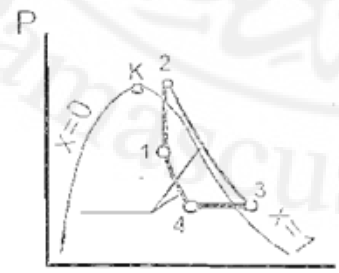

P
K
x=0
1
4
2
3
x=1
V

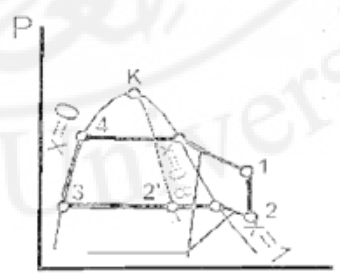

P
K
x=0
1
2
4
3
x=1
V

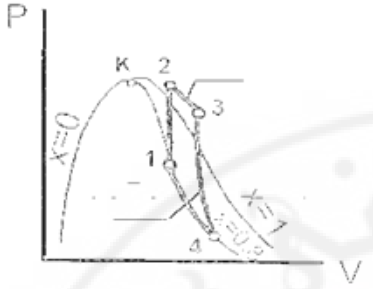

P
K
x=0
1
2
3
4
x=1
V

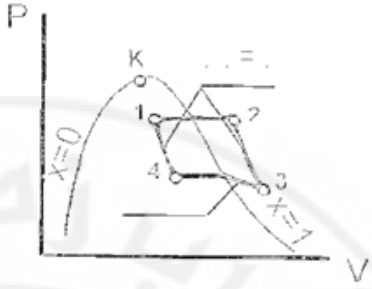

P
K
x=0
4
1
3
2'
2
x=1
V

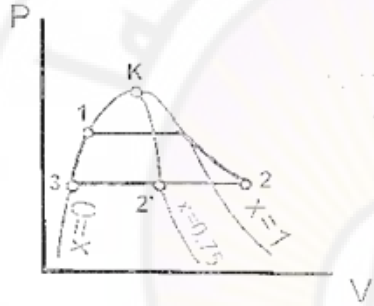

P
K
x=0
4
1
3
2
x=1
V

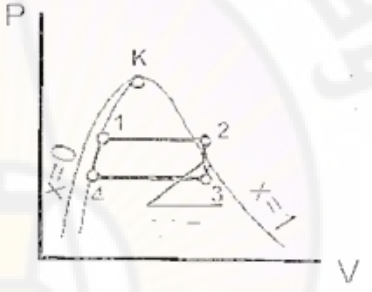

P
K
2
x=0
1
3
4
x=1
V

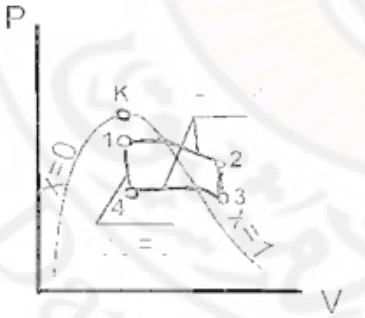

P
K
x=0
4
1
3
2'
2
x=1
V

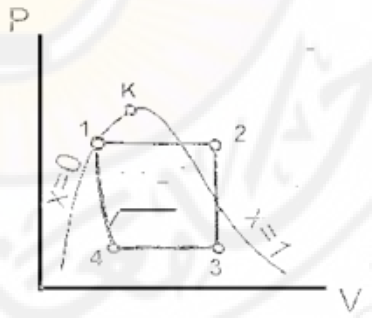

P
K
2
3
1
4
x=0
x=1
V

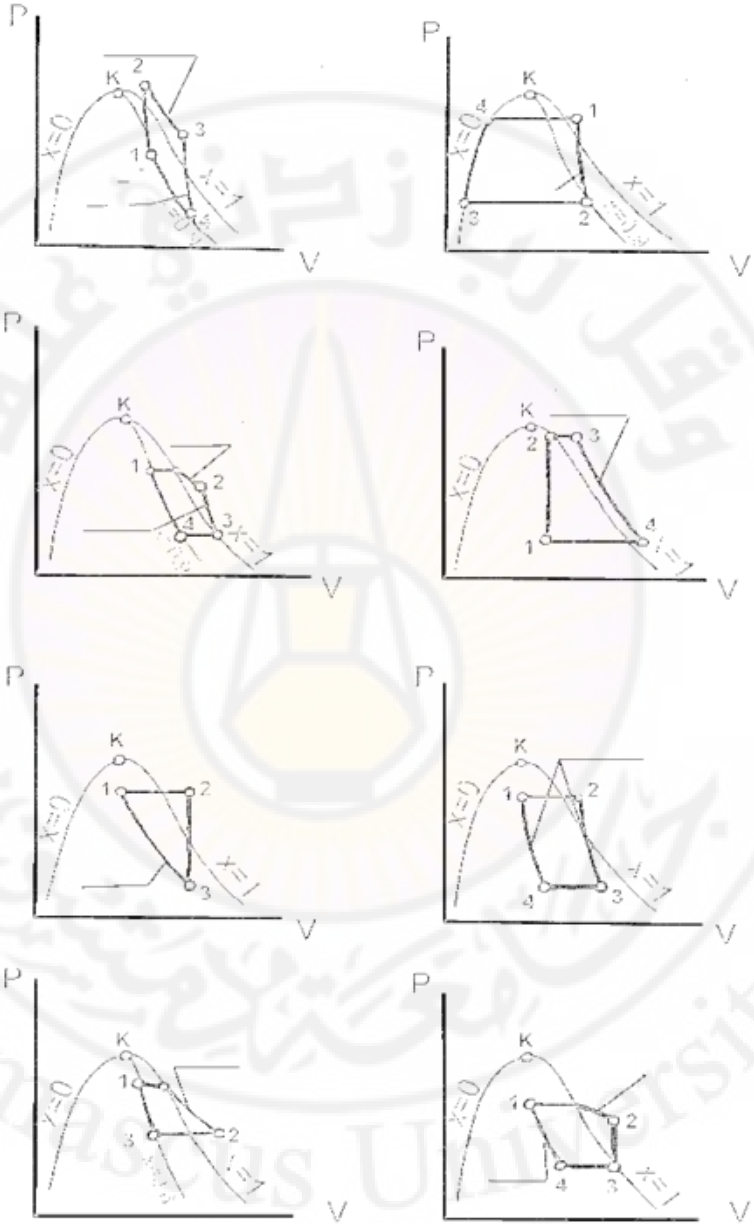

P
K
1
2
4
3
x=0
x=1
V


P
K
1
3
2
2'
x=0
x=0.75
x=1
V


P
K
1
2
4
3
x=0
x=1
V


P
K
1
2
4
3
x=0
x=1
V


P
K
1
2
4
3
x=0
x=1
V


P
V
K
x=0
x=1
1
2
3
4

الفصل التاسع

الهواء الرطب

- مقدمة
- تعاريف ومفاهيم أساسية
  - الهواء الجاف
  - الهواء الرطب
  - الهواء الرطب المشبع
  - الهواء الرطب غير المشبع
- الخواص الفيزيائية للهواء الرطب
  - مضمون الرطوبة
  - الرطوبة المطلقة للهواء
  - الرطوبة النسبية للهواء
  - درجة إشباع الهواء
  - كثافة الهواء الرطب
  - الحجم النوعي
  - الحرارة النوعية الكتلية للهواء الرطب
  - إنتالبي الهواء الرطب
  - الثابت النوعي للهواء الرطب
- درجة حرارة نقطة الندى
- مخطط (h,d) للهواء الرطب
- العمليات الترموديناميكية على الهواء الرطب مع تمثيلها على مخطط (h,d)
  - عملية تسخين الهواء
  - عملية تبريد الهواء
  - عملية مزج كتل هوائية
- التأثير المشترك بين الماء والهواء عند تلامسهما، ترطيب الهواء الأدياباتي

- المخطط السايكومتري
- راحة الانسان والتكييف
- عمليات التكييف مع تمثيلها على المخطط السايكومتري
- مسائل غير محلولة

الفصل التاسع

الهواء الرطب

مقدمة

تعود أهمية بحث الهواء الرطب في الهندسة الحرارية إلى إمكانية استخدامه جسم تشغيل بصورة واسعة في بعض فروع الصناعة وخاصة الغذائية ومواد البناء أو في مجال تكييف الهواء صيفاً وشتاء. فإذا كنا ندرس مستودعات التبريد اللازمة لتخزين المواد الغذائية بغية الحفاظ عليها لفترات طويلة كالخضار والفواكه بأنواعها (تفاح، برتقال، عنب...) أو اللحوم بأنواعها المختلفة (لحوم أبقار ، أغنام، طيور ، أسماك...) فإنه يلزمنا تحديد مواصفات محددة للهواء داخل المستودع من درجة حرارة ورطوبة (على سبيل المثال فإن الشروط المثلى لحفظ التفاح هي: درجة الحرارة $t = 0°C$ في حين أن الرطوبة النسبية المطلوبة $\varphi = 90\%$) حيث يؤدي عدم المحافظة على بارامترات الهواء السابقة داخل مستودع التبريد إلى الإساءة لشروط تخزين المادة وكذلك يؤدي إلى خسارة في وزنها، أما إذا كنا ندرس تكييف مكان (مطعم، مشفى، فندق...) فإنه يلزمنا أيضا تأمين درجة حرارة ورطوبة محددتين للهواء ضمن فراغاته المختلفة (درجة حرارة $24°C$ ورطوبة نسبية $\varphi = 50\%$ في صالات المطاعم أو في المدرجات التدريسية،...) صيفا وشتاء، وإذا لم تتحقق الشروط السابقة فإن الموجودين سيشعرون بالضيق وعدم الارتياح.

عند دراسة تجفيف المواد وخاصة الغذائية (كالبقول...) فانه يلزمنا في هذه الحالة سحب الرطوبة منها (عملية معاكسة لما يحصل في مستودعات التبريد) لكي لا تتلف عند تخزينها لفترات طويلة.

حصل الانتشار الأوسع لعمليات التجفيف وذلك بطرائق المعالجة الحرارية وخاصة في صناعة مواد البناء فتجفيف المواد الداخلة في تركيبها كالرمل والطين ضروري من أجل الحصول على مركبات برطوبة بدائية محددة. إن تجفيف المنتجات السيراميكية قبل الإحماء يزيد من متانتها بحدود مرتين أو أكثر ، كما يسهل عملية نقلها إلى الفرن دون أن تتحطم. تجفيف الطين والحجر الجبسي والفحم قبل طحنها يخفض من نفقات الطاقة الكهربائية.

يجب عند التجفيف اختيار سرعة هذه عملية بصورة منطقية، فالسرعة الكبيرة تؤدي إلى سرعة تبخر الرطوبة من المنتج وبالتالي إلى تحطمه عند تجفيفه، في حين أن السرعة البطيئة تؤدي إلى إطالة مدة التجفيف وبالتالي يؤدي إلى انخفاض إنتاجية المنشأة وإلى ارتفاع حاد بسعر المنتج، لهذا فإن عمليات التجفيف التكنولوجية يجب أن تقوم على أسس عملية معتمدة على نظرية التجفيف.

أكثر المجففات انتشاراً في الواقع هي تلك المجففات التي تعتمد كوسيط تجفيف حامل الحرارة والرطوبة (الهواء الساخن أو خليط الهواء مع غازات العادم) حيث يقوم عند تماسه المباشر مع المادة المراد تجفيفها بسحب الرطوبة منها.

في جميع المجالات المذكورة أعلاه وغيرها نستخدم الهواء الجوي كجسم تشغيل والذي سبق وعده خليطا من الغازات. قيمة الضغط النظامي للهواء الجوي على سطح البحر وسطيا يساوي $760mmHg = 1.01325bar$ ويتغير في حدود من $720mmHg$ حتى $800mmHg$ أي من $96\times10^3\ N/m^2$ وحتى $106.8\times10^3\ N/m^2$. جميع العلاقات المستخرجة لخلائط الغازات المثالية (انظر الفصل الثاني من كتاب الترموديناميك – الجزء الأول) يمكن أن تكون بدرجة كافية من الدقة، صالحة للهواء الرطب لأن البخار فيه يكون في معظم الحالات زائد التسخين (محمصا) وموجوداً تحت ضغوط صغيرة، في مثل هذه الحالات ينطبق عليه مفهوم الغاز المثالي. يعد الهواء الجوي دوماً في الشروط الطبيعية هواء رطبا، لذلك قبل الخوض في طرائق معالجة الهواء الرطب دعونا نقوم ببعض التعاريف والمفاهيم الأساسية:

9-1: تعاريف ومفاهيم أساسية

9-1-1: الهواء الجاف

هو الهواء الجوي الذي لا يحتوي على بخار الماء، عنصراه الأساسيان هما الآزوت والأوكسجين بالإضافة إلى غازات أخرى ويبين الجدول (9-1) تركيب الهواء الجاف بحسب التركيب النسبي الحجمي والكتلي %.

بالرغم من أن الهواء الجاف عبارة عن خليط غازي لكننا نتعامل معه كوحدة متكاملة، حيث أنه في مجال درجات الحرارة من $-50°C$ وحتى $100°C$ (المجال العملي للاهتمام) فإن تركيبه وخواصه لا تتغير .

الجدول (9-1): تركيب الهواء الجاف بحسب التركيب النسبي الحجمي والكتلي %

الغاز	بالنسبة للحجم %	بالنسبة للكتلة %
آزوت N_2	78.08	75.54
أوكسجين O_2	20.95	23.14
أرغون Ar	0.93	1.27
ثاني أوكسيد الكربون CO_2	0.03	0.05

9-1-2: الهواء الرطب

يعد غلاف الهواء الجوي المحيط بسطح الكرة الأرضية، خليطا متجانسا لبعض الغازات حيث يتألف من الهواء الجاف مع أية نسبة من بخار الماء والذي ندعوه بالهواء الرطب، ولما كانت المسطحات المائية على سطح الكرة الأرضية (المحيطات والبحار والبحيرات والأنهار) هي المصادر الأساسية لبخار الماء لذا فإن نسبة بخار الماء بجوارها لها قيم عالية مقارنة بالمناطق الصحراوية.

يوجد بخار الماء في الهواء الجوي (الرطب) بإحدى حالتين:

أ- حالة بخار الماء في الطور الغازي: إما بخار محمص أو بخار مشبع جاف.

ب- حالة الهواء الحاوي على قطرات ماء عالقة فيه (بخار مشبع رطب - الضباب).

إن الخواص الترموديناميكية للهواء الجاف وبخار الماء مختلفة، لهذا فإن خواص الهواء الرطب تتعلق بنسبة كميتيهما.

يمكن الحكم على درجة رطوبة الهواء بمعرفة كتلة البخار الموجود في $1m^3$ من الهواء الرطب. هذه الكمية، المسماة الرطوبة المطلقة للهواء: هي كثافة البخار عند

ضغطه الجزئي ودرجة حرارة الهواء الرطب. ذلك لأن كل عنصر من عناصر الخليط يشغل كامل حجم الخليط ويقع تحت ضغطه الجزئي وله درجة حرارة الخليط نفسها. لنرمز لهذه الكمية بالرمز ρ'_v حيث الرمز (') يدل على أن الكثافة مأخوذة عند الضغط الجزئي للبخار. سنرمز لأكبر كمية من البخار يمكن أن توجد عند الضغط ودرجة الحرارة المعطيين في $1m^3$ من الهواء أي لكمية البخار في الهواء المشبع بالرمز ρ'_{vs}، إذا رمزنا بـ p_v للضغط الجزئي لبخار الماء وبـ p_a للضغط الجزئي للهواء الجاف فحسب قانون دالتون (2-21 من الجزء الأول) يكون ضغط الهواء الرطب عند عده غازا مثاليا هو:

$$p = p_a + p_v \qquad (1\text{-}9)$$

في هندسة التجفيف وعند دراسة مشكلة التهوية يدرس الهواء عادة في شروط الضغط الجوي وفي هذه الحالة يكون:

$$p_b = p_a + p_v \qquad (2\text{-}9)$$

حيث p_b الضغط الجوي.

9-1-3: الهواء الرطب المشبع

هو الهواء الجوي الذي تكون فيه كمية بخار الماء عند ضغط محدد ودرجة حرارة محددة أعظم ما يمكن. تتكاثف الرطوبة الزائدة في الهواء الرطب المشبع على شكل قطرات ماء ناعمة محملة بالهواء (ضباب). وتتجمد هذه القطرات عند درجات حرارة سالبة.

9-1-4: الهواء الرطب غير المشبع

تكون حالة بخار الماء فيه محمصة.

يتعلق الضغط الجزئي لبخار الماء المشبع p_{vs} بدرجة الحرارة فقط، وتتحدد قيمته بالطرائق التجريبية وتدرج في جداول خاصة. غير أنه توجد بعض العلاقات التقريبية في حساب p_{vs} بدلالة درجة الحرارة، ينصح باستخدام العلاقة التالية وذلك عند العمل في مجال درجات الحرارة الموجبة:

$$p_{vs} = 479 + (11.5 + 1.62t)^2$$

لندرس الهواء الرطب عند ضغط ما p ودرجات حرارة متنوعة. سنمثل حالة البخار في الهواء على مخطط (p,v) للهواء الرطب، الشكل (9-1) (وهو نفسه مخطط (p,v) لبخار الماء بعد رسم إيزوبار ضغط الهواء الرطب) حيث تمثل القيم العكسية لأطوال القطع المأخوذة على محور السينات كثافة البخار وبالنسبة للهواء الرطب – رطوبته المطلقة.



الشكل (9-1): مخطط (p,v) للهواء الرطب

من النقطة (1) نرسم الإيزوترم t_{sp} الموافق لدرجة حرارة الإشباع عند الضغط p_0 الذي اخترناه للهواء الرطب.

لندرس أولاً الهواء الرطب عند درجة الحرارة $t_3 > t_{sp}$. على الشكل(9-1) نرى أن الهواء الرطب عند درجة الحرارة المعطاة سيكون مشبعاً عندما يكون البخار في الهواء مشبعاً (النقطة 3) ذلك لأن القيمة الأعظمية الممكنة للرطوبة المطلقة عند درجة الحرارة هذه توافق هذا التركيب للهواء. وهذا ينتج من أن أية قيمة للحجم النوعي على المنحني $t_3 = const.$ تكون أكبر من v في النقطة (3) وعليه فإن قيمة ρ في النقطة (3) أكبر

من أية قيمة أخرى لها على المنحني $t_s = const.$ (حالات الهواء المقترنة بظهور الضباب أي عند تكاثف البخار في الهواء لا تدرس هنا). على مخطط (p,v) أيضاً نرى أن الهواء المشبع عند درجات حرارة أقل من t_{vp} هو مزيج من البخار المشبع والهواء لأنه لمثل هذه الحالات يكون:

$$p = p_{vs} + p_a$$

حيث p_{vs} الضغط الجزئي للبخار في الهواء المشبع.

p_a الضغط الجزئي للهواء الجاف.

الهواء الرطب عند الضغط p ودرجة الحرارة t_{sp} سيكون مشبعاً عندما يتصف البخار فيه بالنقطة (1) أي عندما يكون فيه البخار مشبعاً أيضاً. ولكن في هذه الحالة يكون الهواء المشبع مؤلفاً من بخار مشبع فقط لأن الضغط الجزئي للبخار في هذه الحالة يساوي لضغط الهواء الرطب أي:

$$p = p_{vs} \text{ و } p_a = 0$$

أخيراً إذا أخذنا الهواء الرطب عند الضغط p ودرجة الحرارة $t_s < t_{sp}$ فإن الهواء سيكون مشبعاً عندما يتصف البخار فيه بالنقطة (5) أي عندما يكون بخار الماء فيه محمصاً. ويتألف الهواء المشبع في هذه الحالة من بخار محمص فقط ضغطه $p_{vs} = p$ ويكون في هذه الحالة $p_a = 0$.

إذا نسبنا ما قيل أعلاه للهواء عند الضغط البارومتري $(p = p_b = 760\,mmHg)$ فإن الهواء المشبع في هذه الحالة سيكون خليطاً من الهواء الجاف والبخار المشبع إذا كانت درجة حرارته أقل من $100°C$، عند $100°C$ يتألف الهواء المشبع من بخار مشبع فقط وعند $t_{air} > 100°C$ يتألف الهواء المشبع من بخار محمص فقط.

يبين مخطط (p,v) أن كثافة البخار المحمص أقل من كثافة البخار المشبع الذي له درجة الحرارة نفسها، وعليه فإن الرطوبة المطلقة لخليط الهواء الجاف مع البخار المحمص أقل من الرطوبة المطلقة لخليط الهواء غير المشبع عند البارامترات (t,p) نفسها للخليطين. من هنا ينتج أن الهواء غير المشبع هو خليط الهواء الجاف والبخار المحمص.

2-9: الخواص الفيزيائية للهواء الرطب

نستعرض فيما يلي الخواص الفيزيائية التي تصف الهواء الرطب وهي: مضمون الرطوبة d، الرطوبة المطلقة ρ'_v، الرطوبة النسبية φ، درجة الإشباع ψ، الكثافة ρ أو الحجم النوعي v، الحرارة النوعية c، الانتالبي النوعي i، الثابت النوعي للهواء الرطب، درجة الحرارة الجافة وفق ميزان الحرارة الجاف t_a، درجة الحرارة الرطبة وفق ميزان الحرارة الرطب t_w، الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء p_v، الضغط الجزئي للهواء الجاف p_a

1-2-9: مضمون الرطوبة

هي نسبة كتلة بخار الماء الموجود في الهواء الرطب إلى كتلة الهواء الجاف ونرمز لها بـ d:

$$d = \frac{m_v}{m_a} \ [g/kg_{da}] \qquad (3\text{-}9)$$

ملاحظة:

تبقى كمية الهواء الجاف الموجودة في الهواء الرطب من دون تغير عند تغير حالة الاخير، بينما قد تزداد كمية بخار الماء في الهواء الرطب عند تكاثفه أو تنقص عند تبخره. لهذا فإنه من المناسب أن تجرى الحسابات من أجل $1kg$ هواء جاف.

لنجد العلاقة التي تربط بين مضمون الرطوبة d والضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء الجوي p_v. من أجل ذلك نستخدم معادلة الحالة (معادلة كلابيرون 2-15) لكل من عنصري الهواء الرطب: الهواء الجاف وبخار الماء:

لبخار الماء $p_v V = m_v R_v T$ (4-9)

للهواء الجاف $p_a V = m_a R_a T$ (5-9)

بتقسيم المعادلتين على بعضهما والأخذ بعين الاعتبار أن درجة حرارة كل من البخار والهواء الجاف واحدة ومساوية لدرجة حرارة الهواء الرطب، وكذلك أن البخار والهواء الجاف يشغلان الحجم نفسه، نجد حسب معادلة كلابيرون (الجزء الأول من الكتاب 2-16):

$$\frac{p_v V}{p_a V} = \frac{m_v R_v T}{m_a R_a T} \Rightarrow \frac{p_v}{p_a} = \frac{m_v R_v}{m_a R_a} \Rightarrow$$

$$\frac{p_v}{p_a} = d \frac{\mu_v}{\mu_a} = d \frac{8314}{8314} \frac{29}{18} \rightarrow d = \frac{18}{29} \frac{p_v}{p_a} = 0.622 \frac{p_v}{p_a}$$

$$d = 0.662 \frac{p_v}{p_b - p_v} \left[kg / kg_{da}\right] \tag{6-9}$$

$$d = 662 \frac{p_v}{p_b - p_v} \left[g / kg_{da}\right] \tag{7-9}$$

وعندها فإن علاقة الضغط الجزئي لبخار الماء p_v بدلالة مضمون الرطوبة d:

$$p_v = \frac{d}{622 + d} p_b \tag{8-9}$$

نستنتج من العلاقتين (7-9) و(8-9):

١- أنه عند الضغط الجوي p_b نفسه فإن d للهواء تتعلق بـ p_v وتزداد بتزايده.

٢- عندما $d = 0$ (حالة الهواء الجاف)، يكون الضغط الجزئي لبخار الماء $p_v = 0$.

٣- عندما $d \to \infty$ (من أجل بخار ماء نقي)، يكون الضغط الجزئي لبخار الماء مساويا للضغط الجوي.

٤- إذا وصل مضمون البخار في الهواء الرطب إلى قيمة عظمى (حالة الإشباع) $\left(d = d_{max} = d_{st}\right)$، فإن الضغط الجزئي لبخار الماء عند درجة الحرارة هذه سيكون أعظميا p_{vst} ومساويا لـ:

$$p_{vst} = \frac{d_{st}}{622 + d_{st}} p_b \tag{9-9}$$

وعندها كمية بخار الماء العظمى التي يمكن أن يحتويها الهواء المشبع تحدد بالعلاقة:

$$d_{st} = 622 \frac{p_{vst}}{p_b - p_{vst}} \left[g / kg_{da}\right] \tag{10-9}$$

9-2-2: الرطوبة المطلقة للهواء

هي كتلة بخار الماء الموجود في واحدة حجوم الهواء الرطب ونرمز لها بـ ρ'_v :

$$\rho'_v = \frac{m_v}{V'} \quad [g/m^3] \tag{11-9}$$

حيث ρ'_v الرطوبة المطلقة للهواء.

m_v كتلة بخار الماء في الهواء.

V' حجم الهواء الرطب.

ولما كان بخار الماء في الهواء الرطب (الخليط) يشغل حجم الهواء الرطب نفسه وله درجة حرارته نفسها، إذا فإن الرطوبة المطلقة للهواء هي كثافة بخار الماء في الهواء الرطب عند ضغطه الجزئي.

نرمز لمضمون رطوبة الهواء الرطب المشبع بـ ρ'_{v_s} .

9-2-3: الرطوبة النسبية للهواء

تعد واحدة من المواصفات الأساسية للهواء الرطب، وهي نسبة الرطوبة المطلقة للهواء ρ'_v إلى أعظم رطوبة مطلقة له ρ'_{v_s} عند البارامترات نفسها (p,t)، ونرمز لها بـ φ :

$$\varphi = \frac{\rho'_v}{\rho'_{v_s}} \tag{12-9}$$

وتؤخذ كنسبة مئوية %.

لحالة الهواء الرطب المشبع تكون قيمة $\varphi = 100\%$، ولحالة الهواء الرطب غير المشبع $\varphi < 1$، وتكون $\varphi = 0$ لحالة الهواء الجاف (بما أن الضغط الجزئي لبخار الماء صغير في الهواء المشبع عند الضغط الجوي، لذا يمكن اعتبار مثل هذا البخار غازا مثاليا).

بكتابة معادلة كلابيرون (2-15) من أجل البخار المحمص في الهواء الرطب غير المشبع:

$$p_v = \rho_v R_v T \tag{أ}$$

ولحالة البخار في حالة الإشباع في الهواء المشبع:

$$p_{vsl} = \rho_{vsl} R_v T \qquad (ب)$$

بقسمة المعادلتين الأخيرتين نحصل على:

$$\varphi \approx \frac{p_v}{p_{vsl}} \approx \frac{\rho'_v}{\rho'_{vs}} \qquad (13\text{-}9)$$

(لا يخضع الهواء الجاف ولا بخار الماء لمعادلة كلابيرون ولكن بخطأ صغير يمكن أن نعتبرها صحيحة). إن نسبة الخطأ نتيجة هذه الفرضية لا يزيد عن 2% ، أما إذا أردنا الحساب بدقة متناهية عندها نستخدم المعادلة (9-12).

نستنتج من المعادلتين (9-8) و (9-13):

١- لحالة الهواء الجاف $(d = 0)$ فإن $p_v = 0$ و $\varphi = 0$.

٢- لحالة الهواء المشبع $(d = d_s)$، عندها فإن $p_v = p_{vsl}$ و $\varphi = 1$.

٣- بما أن الضغط الجزئي لبخار الماء يتغير في المجال $0 \le p_v \le p_{vsl}$، فإن الرطوبة النسبية للهواء تتغير في المجال $0 \le \varphi \le 100\%$.

4-2-9: درجة إشباع الهواء

هي نسبة مضمون الرطوبة للهواء غير المشبع d إلى مضمون الرطوبة للهواء المشبع d_{sl} عند درجة الحرارة نفسها، ونرمز لها بـ ψ:

$$\psi = \frac{d}{d_{sl}} \qquad (14\text{-}9)$$

من العلاقتين (9-7) و (9-9) نحصل على:

$$\psi = \frac{d}{d_{sl}} = \frac{p_b - p_{vsl}}{p_b - p_v} \frac{p_v}{p_{vsl}} = \varphi \frac{p_b - p_{vsl}}{p_b - p_v} \qquad (15\text{-}9)$$

وبالأخذ بعين الاعتبار العلاقتين (9-8) و (9-9) نجد:

$$\psi = \varphi \frac{622 + d}{622 + d_{sl}} \qquad (16\text{-}9)$$

نجد من تحليل العلاقة الأخيرة:

١- من أجل الهواء الجاف عندما $d = 0$ فإن $\psi = \varphi = 0$.

٢- من أجل الهواء المشبع عندما $d = d_s$ فإن $\psi = \varphi = 1$.

٣- بصورة عامة فإن $\psi \neq \varphi$، وأن قيمة $\psi < \varphi$ ما دام $d < d_s$.

٤- إن قيمة ψ تتغير في مجال تغير φ نفسه، أي $0 \leq \psi \leq 100\%$، ولكن قلما نستخدم ψ في الحسابات الحرارية.

يمكن اعتبار $\psi = \varphi$ عند قيم ليست عالية لدرجات حرارة الهواء الرطب، حتى $15-20°C$.

9-2-5: كثافة الهواء الرطب

هي عبارة عن نسبة كتلة الهواء الرطب m إلى حجمه، ونرمز لها بـ ρ.

ولما كانت كتلة الهواء الرطب تتألف من كتلة الهواء الجاف m_a وكتلة بخار الماء m_v، عندها فإن كثافة الهواء الرطب هي مجموع كثافتي بخار الماء ρ'_v والهواء الجاف ρ_a:

$$\rho = \rho'_v + \rho_a \qquad (17\text{-}9)$$

وبالتوافق مع معادلة الحالة لعنصري الهواء الرطب: بخار الماء والهواء الجاف، نستطيع كتابة:

للهواء الجاف: $$\rho_a = \frac{p_a}{T R_a} = \frac{p_b - p_v}{T R_a}$$

لبخار الماء: $$\rho'_v = \frac{p_v}{T R_v}$$

بتبديل ρ_a و ρ'_v في العلاقة (17-9) بعد الأخذ بعين الاعتبار أن:

$$R_v = 461.5 J/kgK \quad \text{و} \quad R_a = 287.1 J/kgK$$

نحصل على:

$$\rho = \frac{p_b}{T R_a} - \frac{0.0013\, p_v}{T} = \rho_a - \frac{0.0013\, p_v}{T} \qquad (18\text{-}9)$$

يمثل الحد الأول من العلاقة (18-9) كثافة الهواء الجاف عند الضغط الجوي.

عند الشروط الطبيعية (الضغط $1.01325\,bar$)، فإن كثافة الهواء الجاف يمكن تحديدها:

$$\rho_a = \frac{1.01325 \times 29 \times 10^5}{8314\,T} \approx \frac{353}{T}$$

وعند درجة الحرارة $20°C$ تكون كثافة الهواء الجاف $\rho_a = 1.2\,kg/m^3$.

يمكن أن نجد كثافة الهواء الجاف عند قيم أخرى للضغط الجوي ودرجات الحرارة بالعلاقة:

$$\rho_a = 1.2 \frac{293}{T} \frac{p_b}{101.3} \approx 0.35 \times 10^{-2} \frac{p_b}{T}$$

نستنتج من العلاقة (9-18) التالي:

١- بما أن $\mu_a > \mu_{H_2O}$، فإن كثافة بخار الماء أقل من كثافة الهواء الجاف $(\rho_v < \rho_a)$، وبالتالي الهواء الرطب دوما أخف من الهواء الجاف عند الضغط نفسه ودرجة الحرارة نفسها.

٢- تتناقص كثافة الهواء الرطب مع زيادة الضغط الجزئي لبخار الماء (أي مع زيادة مضمون الرطوبة d) وذلك عند الحفاظ على درجة الحرارة دون تغير.

ملاحظة:

يمكن اعتبار كثافة الهواء الرطب مساوية لكثافة الهواء الجاف وذلك في مجال درجات الحرارة المستخدمة في تكييف الهواء.

6-2-9: الحجم النوعي

هو حجم واحدة الكتل من الهواء الرطب ونرمز له بـ v، تتناسب قيمته عكسا مع كثافة الهواء الرطب، بمعنى آخر:

$$v = \frac{V}{m} \qquad (19\text{-}9)$$

حيث V حجم الهواء الرطب $[m^3]$.

m كتلة الهواء الرطب $[kg]$.

يمكن تحديد الحجم النوعي للهواء الرطب من معرفة كثافته المحددة بالعلاقة (9-18) وذلك بعد أخذ مقلوبها:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{T}{0.00348\, p_a - 0.0013\, p_v}$$

9-2-7: الحرارة النوعية الكتلية للهواء الرطب

هي كمية الحرارة اللازمة لرفع أو خفض درجة حرارة الهواء بمقدار درجة مئوية واحدة وذلك عند ثبات مضمون الرطوبة وواحدتها تنسب إلى $1kg$ من الهواء الجاف كما هو الحال في واحدة مضمون الرطوبة وتتحدد بالعلاقة:

$$c = c_{p_a} + c_{p_v}\, d \times 10^{-3} = 1 + 1.89\, d \times 10^{-3} \qquad (9\text{-}20)$$

حيث $c_{p_a} = 1.005 \approx 1 kJ/kgK$ الحرارة النوعية الكتلية للهواء الجاف بثبوت الضغط (وفي مجال درجات الحرارة من $0°C$ وحتى $100°C$ تؤخذ مساوية لـ $0.24\, kcal/kg\,\deg$).

$c_{p_v} = 1.89 kJ/kgK$ الحرارة النوعية الكتلية لبخار الماء بثبوت الضغط.

d مضمون الرطوبة للهواء.

9-2-8: إنتالبي الهواء الرطب

يمثل كمية الحرارة المحتواة ضمنه منسوبة إلى $1kg$ هواء جاف. الإنتالبي النوعي لهواء رطب كتلته $(1+d)kg$ عبارة عن مجموع إنتالبيي $1kg$ هواء جاف و $d\,kg$ بخار ماء الموجود في الهواء الرطب، ونرمز له بـ i:

$$i = i_a + i_v\, d \times 10^{-3} \qquad (9\text{-}21)$$

حيث i_a الإنتالبي النوعي لـ $1kg$ هواء جاف.

i_v الإنتالبي النوعي لبخار الماء.

بما أننا اعتبرنا بخار الماء والهواء الجاف غازات مثالية، أي أن الإنتالبي لكليهما لا يتعلق بالضغط، لذلك فإنه وفي مجال درجات الحرارة المدروس الصغير فإن قيم c_{p_a} و c_{p_v} ثابتة.

عندها فإن الإنتالبي النوعي للهواء الجاف:

$$i_a = c_{p_a}(t - t_o) \Rightarrow i_a = 1.005t \approx 1.0t \quad (\text{أ})$$

أما الإنتالبي النوعي لبخار الماء مع الأخذ بعين الاعتبار الحرارة الكامنة لتشكيل البخار $r_o = 2{,}501 kJ/kg$ وذلك عند $t_o = 0°C$:

$$i_v = 2{,}501 + 1.89t \quad (\text{ب})$$

بتبديل (أ) و (ب) في (9-21) نجد:

$$i = 1.0t + (2{,}501 + 1.89t)d \times 10^{-3} \quad (9\text{-}22)$$

أو تكتب بالشكل:

$$i = (1.0 + 1.89d \times 10^{-3})t + 2{,}501d \times 10^{-3} \quad (9\text{-}23)$$

إذا أخذنا بعين الاعتبار العلاقة (9-20) فإن العلاقة (9-21) نكتبها بالشكل:

$$i = ct + 2{,}501d \times 10^{-3} \quad (9\text{-}24)$$

يظهر من تحليل العلاقة (9-24) أن إنتالبي الهواء الجوي يتألف من مركبتين: الأولى تتعلق بدرجة الحرارة وندعوها بالحرارة المحسوسة، المركبة الأخرى تتعلق بمضمون الرطوبة وندعوها بالحرارة الكامنة للهواء الرطب.

يتضمن إنتالبي بخار الماء كمية الحرارة اللازمة من أجل تحويل الماء إلى بخار عند درجة الحرارة $0°C$ وكمية الحرارة المصروفة على تسخين البخار الناتج حتى درجة الحرارة t.

9-2-9: الثابت النوعي للهواء الرطب

يتحدد الثابت النوعي للهواء الرطب R من العلاقة:

$$R = \frac{8314}{\mu_{mix}}$$

حيث μ_{mix} الوزن الجزيئي للهواء الرطب، الذي يتحدد اعتمادا على المعادلة (9-34-2) – الجزء الأول:

$$\mu_{mix} = \mu_a r_a + \mu_v r_v$$

نستبدل في العلاقة السابقة قيمة كل من الوزن الجزيئي للهواء الجاف μ_a والوزن الجزيئي لبخار الماء μ_v:

$$\mu = 28.95 r_a + 18.016 r_v$$

نعوض الحصص الحجمية r_a و r_v وفق العلاقة $p_i = r_i\, p_{mix}$ (2-40 – الجزء الأول):

$$\mu = 28.95 \frac{p_a}{p_b} + 18.016 \frac{p_v}{p_b}$$

بإصلاح هذه العلاقة مع الأخذ بعين الاعتبار قيم r_a و r_v من خلال φ و p_{vst} نحصل على العلاقة:

$$\mu = 28.95 - 10.934\, \varphi \frac{p_{vst}}{p_b} \qquad (25\text{-}9)$$

قيم p_{vst} نختارها من جداول بخار الماء عند درجة الحرارة t.

φ حسب معطيات البسايكرومتر (مقياس رطوبة الجو).

p_b قراءة مقياس البارومتر.

9-3: درجة حرارة نقطة الندى

إذا كنت تعيش في منطقة رطبة ما وعندما تستيقظ صباحاً في الصيف، تجد العشب رطباً، على الرغم من أنها لم تمطر في الليلة السابقة، فكيف تفسر هذه الظاهرة؟

حسناً، الرطوبة الزائدة في الهواء تتكاثف على السطوح الباردة مشكلة ما يدعى بالندى، في الصيف، كمية لا بأس بها من الماء تتبخر على مر اليوم ودرجة الحرارة تنخفض خلال الليل.

غالباً ما نلاحظ أنه عندما نشتري شراباً بارداً من آلة بيع في يوم حار ورطب تتشكل قطرات من الندى على العلبة. تشكل الندى على العلبة يظهر أن درجة حرارة الشراب أقل من درجة حرارة نقطة الندى للهواء المحيط. درجة حرارة نقطة الندى لغرفة ما يمكن تحديدها ببساطة عن طريق تبريد بعض الماء في فنجان معدني بإضافة كميات قليلة من الجليد والتحريك. درجة حرارة السطح الخارجي للفنجان عندما يبدأ الندى بالتشكل عليه هي درجة حرارة نقطة الندى لهواء الغرفة.

إذا وبتبريد الهواء (ونتيجة لذلك البخار الموجود فيه) عند ضغط ثابت $p = const.$ من الشكل (9-2) (الضغط الجزئي للبخار في هذه الحالة يبقى أيضا ثابتا) يمكن أن نصل بالبخار إلى حالة الإشباع.



الشكل (9-2) تحديد درجة حرارة نقطة الندى على مخطط (T,s)

في هذه الحالة يصبح الهواء الرطب مشبعاً، ويتم هذا عندما تصبح درجة حرارة الهواء مساوية لدرجة حرارة إشباع البخار عند ضغطه الجزئي. تسمى درجة الحرارة هذه درجة حرارة نقطة الندى (dew point) ويرمز لها بـ t_{dp}.

إذا جعلنا درجة حرارة الهواء أخفض من درجة حرارة نقطة الندى (الضغط الجزئي في هذه الحالة سيتناقص أيضا) يبدأ تكاثف بخار الماء (يظهر الضباب).

يمكن إيجاد الضغط الجزئي للبخار في الهواء بمعرفة درجة حرارة نقطة الندى. وهذه الأخيرة تحدد بسهولة بوساطة جهاز يسمى الهيدرومتر (Hydrometer) ويعتمد الجهاز في عمله على تبريد الهواء المحيط بكرة زجاجية محتوية على الاثير . يستمر التبريد حتى الوصول إلى حالة الإشباع التي يتعرفون عليها بتعرق السطح المفضض للكرة في هذه اللحظة تقاس درجة الحرارة بميزان الحرارة الموجود في الهيدرومتر هذه الدرجة هي درجة حرارة نقطة الندى.

4-9: مخطط (I,d) للهواء الرطب

تحليل عمليات تغير حالة الهواء الرطب وكذلك الحسابات الهندسية المرتبطة بتحديد بارامتراته بمساعدة المعادلات المدرجة أعلاه للغاز المثالي مع الجداول البسايكرومترية معقدة بصورة كبيرة.

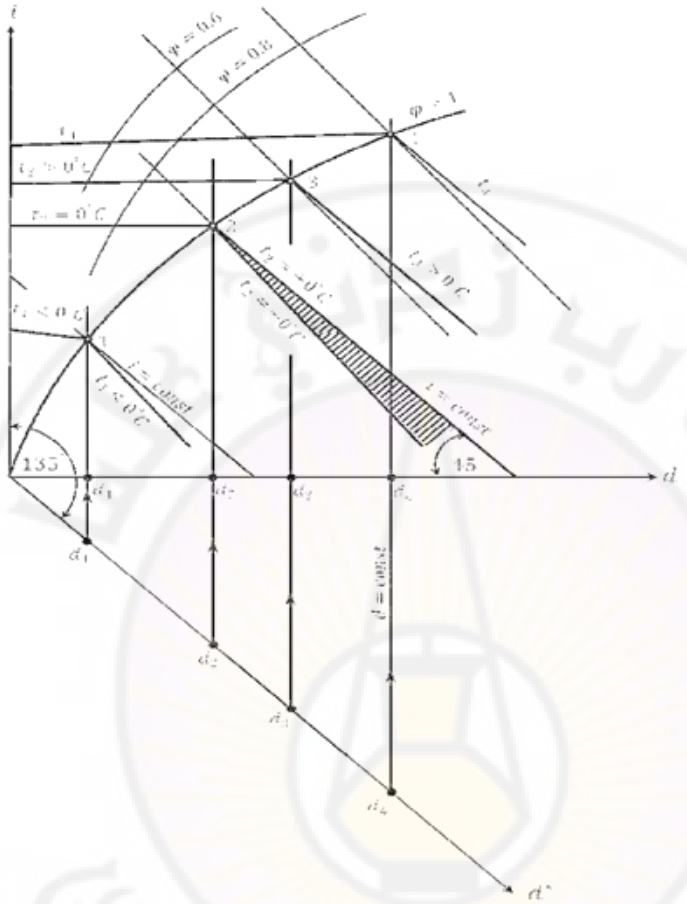
أظهر استخدام الطريقة البيانية بساطة وارتياحا أكثر وذلك باستخدام مخطط (I,d) للهواء الرطب الذي أقترحه العالم الروسي رامزين عام 1918.

يمثل مخطط (I,d) تفسيرا بيانيا للمعادلة (9-24) من أجل إنتالبي الهواء الرطب، منشأ في جملة إحداثيات مائلة لـ (الإنتالبي–مضمون الرطوبة).

المخطط مرسوم (موضوع) من أجل $1kg$ هواء جاف كجزء من الهواء الرطب وعند ضغط جوي محدد، ويشير بوضوح إلى الارتباط التداخلي لبارامترات الهواء الرطب الأساسية (p_b, t, φ, d, i). يسمح هذا المخطط بسهولة وبمعلومية أي بارامترين اثنين من تحديد بقية البارامترات للهواء الرطب كذلك يسمح بسهولة ووضوح تمثيل وتحليل عمليات تغير حالته ويختصر إلى الحد الأدنى من استخدام الحسابات التحليلية المرتبطة بحل المسائل العملية.

تمثل منطقة الهواء الرطب غير المشبع على جملة الإحداثيات الديكارتية (I,d) بمستو ضيق حيث تتوضع خطوط $\varphi = const$ قريبة بعضها من بعض، وتتقاطع مع خطوط $t = const$ تحت زوايا حادة، الأمر الذي يعقد استخدامها عند إنشاء وحساب وتحليل عمليات تغير حالات الهواء الرطب. بهدف توسيع منطقة الهواء الرطب الغير مشبع، يبنى المخطط في جملة إحداثيات مائلة وأكثرها راحة تلك المائلة بزاوية $135°$، الشكل (9-3) والتي يأخذ فيها الإيزوترم الصفري في منطقة الهواء الرطب غير المشبع وضعا أفقيا.

تثبت على محور العينات قيم الانتالبي i بينما تتوضع قيم مضمون الرطوبة للهواء الرطب على محور السينات الذي يصنع مع المحور الشاقولي زاوية $135°$. كما تم شرحه أعلاه فإن الجزء السفلي من المخطط لا نعطيه أية أهمية (اهتمام عملي) لهذا ومن أجل تقليص الأبعاد والاستعمال المريح لمحور السينات d فإننا لا نمثله بل نستبدله بمخطط مساعد أفقي يمر من مبدأ الإحداثيات ويكون بمثابة محور d. يتم نقل قيم $d_1, d_2, d_3, \ldots$ وفق المقياس من المحور القديم d' إلى الجديد d.



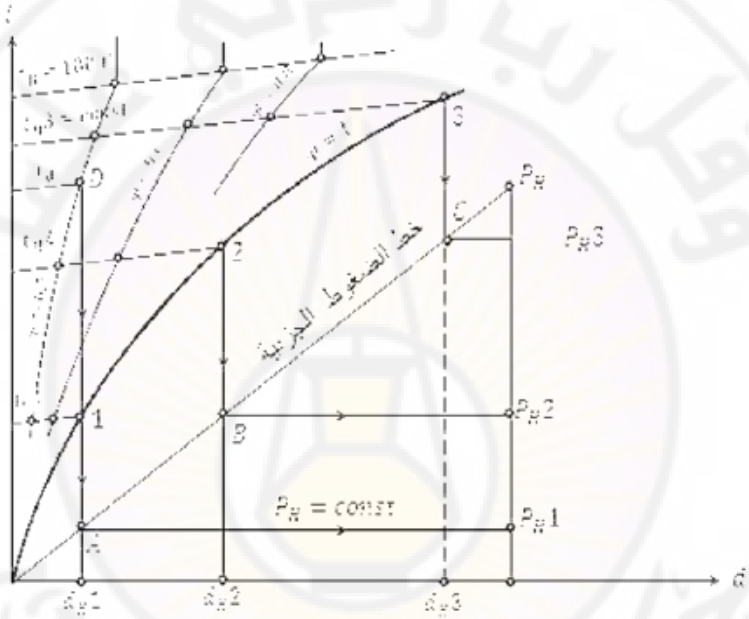
الشكل (9-3): مخطط (I,d) للهواء الرطب

تنشأ خطوط الإيزوترم $t = const$ في منطقة الهواء الرطب غير المشبع تحت وجود زاوية مع الأفق وذلك باستعمال المعادلة (9-19) (والتي تأخذ شكل مستقيم عند $t = const$). وبالتالي فإن الإيزوترمات على هذا المخطط تأخذ شكل مستقيمات ولكنها ليست متوازية فيما بينها وذلك لأن زاوية ميلانها مع الأفق متغيرة.

زاوية ميلان المستقيمات $t = const$ تساوي 1.89 والذي يزداد بازدياد درجة حرارة الهواء، ويظهر جليا عدم التوازي بخطوط $t = const$ عند درجات الحرارة القريبة من الـ 100°C) وتصبح تقريبا متوازية عند قيم ليست كبيرة لدرجة الحرارة.

يكون ظل زاوية الميلان سالباً في منطقة درجات الحرارة الأخفض من $0°C$ وعندها يكون ميلان خطوط الإيزوترم نحو الأسفل، تزداد شدة ميلانها بانخفاض درجة الحرارة.

يتحدد منحني الهواء الرطب المشبع $(\varphi = 100\%)$ على مخطط (I,d) على أنه المحل الهندسي لنقاط تقاطع خطوط الإيزوترم $t_v = const.$ مع خطوط $d_v = const.$ (النقاط 1,2,3)، الشكل(9-4).



الشكل (9-4): منطقتي الهواء الرطب المشبع والغير مشبع على مخطط (I,d)

تحسب مضامين الرطوبة العظمى $(d_{M1}, d_{M2}, d_{M3}, ...)$ بالعلاقة (9-6) وذلك من أجل كل درجة حرارة إشباع $(t_{M1}, t_{M2}, t_{M3}, ...)$ وذلك عند الضغط الجوي p_b وبطريقة مشابهة نرسم بقية منحنيات الرطوبة النسبية للهواء الرطب الغير مشبع $(\varphi = 10, 20, 30, 40\%, ...)$.

يقسم منحني الإشباع $(\varphi = 100\%)$ مخطط الهواء الرطب إلى جزأين، جزء يتوضع فوقه يمثل منطقة الهواء الرطب غير المشبع والذي يتواجد بخار الماء فيه محمصاً، وجزء يتوضع أسفله يمثل الهواء الرطب المشبع أو ضباب. تتوضع تدريجات قيم الضغط الجزئي

لبخار الماء (p_v) على القسم السفلي من المحور الشاقولي اليميني لمخطط (I,d)، الشكل (4-9).

خط الضغوط الجزئية لبخار الماء عبارة عن المحل الهندسي لنقاط تقاطع مستقيمات شاقولية النازلة من نقاط تقاطع الإيزوترم ومنحني $\varphi = 1$ مع مستقيمات أفقية تمثل $p_v = const.$. يظهر على الشكل (4-9) إنشاء النقاط (A,B,C) المتوضعة على خط الضغط الجزئي للبخار .

من أجل تحديد الضغط الجزئي لبخار الماء الموجود في الهواء الرطب غير المشبع والذي تمثل حالته النقطة (D) ننزل من هذه النقطة عمود حتى يتقاطع مع خط الضغط الجزئي (النقطة A) ومن ثم ننقلها أفقياً باتجاه تدريجة قيم الضغط الجزئي p_v ونقرأ ما يقابلها لتكون هذه هي قيمة الضغط الجزئي المجهول لبخار الماء في الهواء الرطب (المطلوب تحديده) وبالطريقة نفسها يحدد الضغط الجزئي للهواء الرطب المشبع الذي تمثله الحالة (2) (التحديد تم وفق اتجاه الأسهم المبين على الشكل(4-9)).

تجري عادة عمليات تغير حالة الهواء الرطب بصورة متلازمة بتغير حالته الحرارية ومضمون رطوبته. الخاصية المميزة (الهامة) لهذه العمليات هي النسبة ε وهي نسبة مقدار تغير انتالبي الهواء Δi إلى مقدار تغير مضمون رطوبته Δd :

$$\varepsilon = \frac{i_2 - i_1}{(d_2 - d_1)\times 10^{-3}} \quad [kJ/kg] \qquad (26\text{-}9)$$

تصف العلاقة الأخيرة عملية انتقال الهواء الرطب من حالة أولى إلى حالة أخرى.

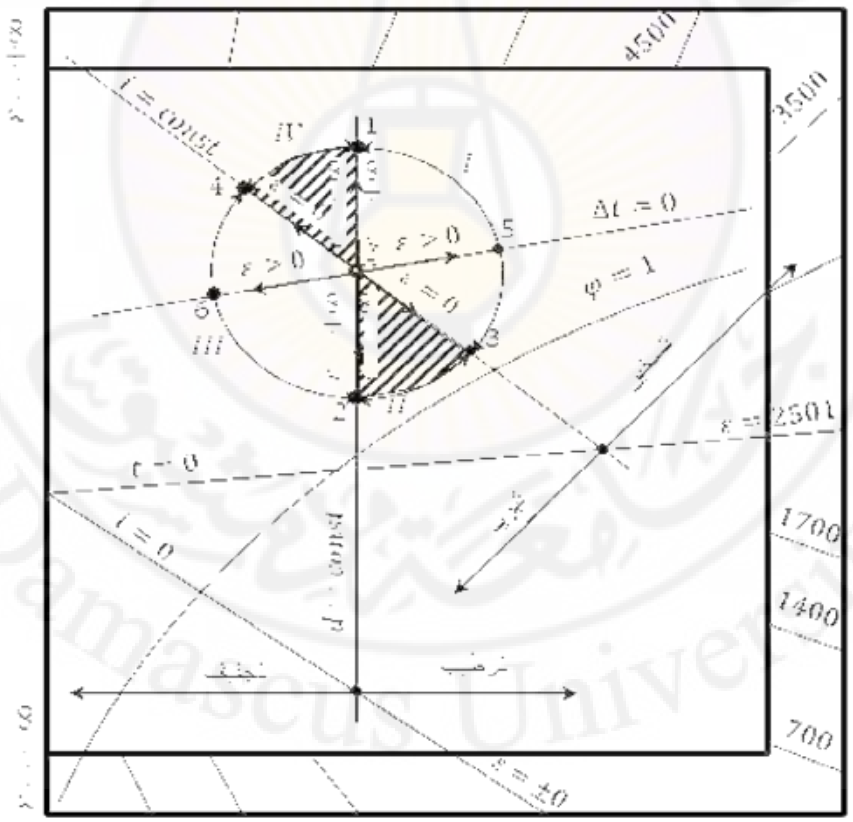
تسمى هذه النسبة بـ: نسبة الرطوبة الحرارية لعملية تغير حالة الهواء، أضف إلى أن هذه النسبة لها قيمة جبرية قد تكون موجبة أو سالبة أو مساوية للصفر أو تسعى إلى اللانهاية.

إذا ترافق إجراء العملية بزيادة في الحرارة والرطوبة (تكون الإشارة موجبة) أو ترافقت بانخفاضهما (الإشارة سالبة)، أما إذا جرت العملية من دون تغير في الانتالبي $(\Delta i = 0)$ (عندها تأخذ $\varepsilon = 0$) ،بينما تصبح $\varepsilon \to \infty$ إذا انعدم تغير مضمون الرطوبة $(\Delta d = 0)$.

توافق قيم ε الكبيرة للعمليات الجارية مع ميزة تغير كبير بالمحتوى الحراري للهواء وتأخذ قيم صغيرة للعمليات التي تتميز بتغير كبير بمضمون رطوبته.

تمثل عادة عمليات تغير حالات الهواء على مخطط (I,d) بخطوط مستقيمة (أشعة) واصلة بين النقاط الموافقة لحالة الهواء البدائية والنهائية، وتصفها القيمة $\varepsilon = \frac{\Delta i}{\Delta d}$ التي ندعوها أيضاً بالمعامل الزاوي لخط العملية في جملة الإحداثيات المائلة.

يظهر على الشكل (9-5) النقطة (A) الممثلة لحالة الهواء الرطب البدائية على مخطط (I,d) التي يمكن أن تغير من موقعها نتيجة تغير كمي ونوعي بالحرارة والرطوبة. لنمثل على هذا الشكل جميع الاحتمالات الممكنة لتغير حالة الهواء، وبمعنى آخر التغيرات الممكن حصولها في قيمة ε.



الشكل (9-5): عمليات تغير حالات الهواء

- يقسم المستقيم الشاقولي $d = const.$ المار من النقطة A، احتمالات العمليات الجارية على الهواء الرطب إلى عمليات تترافق مع ازدياد بمضمون الرطوبة (عمليات ترطيب)، وعمليات تترافق بانخفاض في مضمون الرطوبة (عمليات تجفيف).
- يقسم المستقيم المائل $i = const.$ $(\Delta i = 0)$ المار بالنقطة (A) احتمالات العمليات الجارية على الهواء الرطب إلى عمليات تترافق مع انخفاض بالإنتالبي (عمليات تبريد) وعمليات تترافق بازدياد الإنتالبي (عمليات تسخين).

يمكن أن تترافق عمليات تسخين الهواء الرطب في القطاع (3,5,A) بانخفاض درجة حرارة الخليط عند ازدياد الإنتالبي، يمكن تفسير ذلك من جراء ازدياد مضمون رطوبة الهواء.

لندرس العمليات المميزة لتغير حالة الهواء الرطب مع تمثيلها على مخطط (I,d)

١) العملية A←1: تمثل عملية تسخين الهواء بدون تغير في مضمون رطوبته $(d_a = d_1 = const.)$ وتترافق مع ازدياد الإنتالبي بمقدار $\Delta i_{A,1} = i_1 - i_A > 0$. شعاع العملية يجري بصورة عمودية نحو الأعلى وعندها معامل الرطوبة الحراري:

$$\varepsilon_{A,1} = \frac{i_1 - i_A}{(d_1 - d_A)\times 10^{-3}} \to \infty$$

٢) العملية A←2: تمثل تبريد الهواء بدون إعطاء أو سحب رطوبة $(d_A = d_2 = const.)$. في هذه العملية يتناقص الإنتالبي $(\Delta i_{A,2} = i_2 - i_A < 0)$، شعاع العملية ينطلق من النقطة (A) عموديا نحو الأسفل، وفي هذه العملية $\Delta d = 0$ وقيمة المعامل ε:

$$\varepsilon_{A,2} = \frac{i_2 - i_A}{(d_2 - d_A)\times 10^{-3}} \to -\infty$$

٣) العملية A←3: تمثل امتصاص الهواء للرطوبة $(d_3 > d_A)$، وذلك مع ثبات المحتوى الحراري خلال العملية $(i_A = i_3 = const.)$. تسمى هذه العملية ترطيب الهواء أديبانتيا.

المعامل الزاوي لها عند $\Delta i_{A,3} = i_3 - i_A = 0$ هو:

$$\varepsilon_{1,3} = \frac{i_3 - i_1}{(d_3 - d_1)\times 10^{3}} = 0$$

٤) العملية A←4: تمثل تجفيف الهواء $(d_4 < d_1)$ عند ثبوت الإنتالبي $(i_1 = i_4 = const.)$ (تسمى هذه العملية تجفيف الهواء أديباتيا)، ينطلق شعاع العملية من النقطة (A) باتجاه اليسار وفق خط $i = const.$ والمعامل الزاوي لهذه العملية:

$$\varepsilon_{1,4} = \frac{i_4 - i_1}{(d_4 - d_1)\times 10^{3}} = 0$$

٥) العملية A←5: تمثل تسخين الهواء $(\Delta i_{1,5} = i_5 - i_1 > 0)$، وفي الوقت نفسه تترافق مع ازدياد في مضمون رطوبته $(d_5 > d_1)$، وعندها يكون Δi موجباً وكذلك Δd . ينطلق شعاع هذه العملية باتجاه اليمين ونحو الأعلى. تتحدد قيمة ε وفق العلاقة:

$$\varepsilon_{1,5} = \frac{i_5 - i_1}{(d_5 - d_1)\times 10^{3}} > 0$$

يجب أن نشير إلى أن جميع العمليات الواقعة في القطاع (I) المحدود بالشعاعين (A←1) و (A←3) تكون قيمة المعامل الزاوي $\varepsilon \geq 1$، والذي تتغير قيمته في المجال $+\infty \geq \varepsilon \geq 0$.

٦) العملية A←6: تمثل تبريد الهواء $(i_6 < i_1)$ ومترافقة في الوقت نفسه بانخفاض رطوبته $(d_6 < d_1)$، يكون ميل خط العملية عند $\Delta i_{1,6} = i_6 - i_1 < 0$ و $\Delta d_{1,6} < 0$ قيمة المعامل الزاوي:

$$\varepsilon_{1,6} = \frac{i_6 - i_1}{(d_6 - d_1)\times 10^{3}} > 0$$

قيمة المعامل الزاوي ε لجميع العمليات الجارية ضمن القطاع (III) المحدود بالشعاعين (A←2) و (A←4) تكون موجبة وتقع في المجال $+\infty \geq \varepsilon \geq 0$ من الأهمية بمكان أن نشير إلى أنه عند تبريد الهواء الرطب الموجود ضمن القطاع (6,A,4) فإن يترافق بارتفاع في درجة حرارة الخليط الشيء الذي يمكن تفسيره من جراء تخفيض مضمون رطوبة الهواء، أي من جراء الحرارة الكامنة توافقا مع العلاقة (9-24).

٧) تمثل العمليات الجارية في القطاع (II) المحدود بالشعاعين (A←2) و (A←3) عمليات تبريد الهواء ($\Delta i < 0$) المترافقة في الوقت نفسه مع ازدياد رطوبته ($\Delta d > 0$)، عندها فإن قيمة المعامل الزاوي تتراوح في المجال: $0 \geq \varepsilon \geq -\infty$:

$$\varepsilon_{II} = \frac{-\Delta i}{\Delta d \times 10^{3}} < 0$$

٨) العمليات المحصورة في القطاع (IV) المحدود بالشعاعين (A←1) و (A←4) تترافق بتسخين الهواء الرطب ($\Delta i > 0$) مع تجفيفه ($\Delta d < 0$) وقيمة المعامل الزاوي تقع في المجال $0 \geq \varepsilon \geq -\infty$:

$$\varepsilon_{II} = \frac{+\Delta i}{-\Delta d \times 10^{3}} < 0$$

وبالتالي العمليات التي لها قيمة ε موجبة تتوضع في القطاعين (I) و (III)، أما العمليات التي لها قيمة ε سالبة فهي موجودة في القطاعين (II) و (IV).

ملاحظة:

ينزاح خط الإشباع $\varphi = 100\%$ نحو الأعلى عند رفع الضغط الجوي، بينما ينزاح نحو الأسفل عند انخفاضه. غير أنه إذا كان التغير في الضغط الجوي في حدود $\pm 10 mmHg$ فإن هذا التغير ليس بكبير ويمكن إهماله.

مثال 9-1

حدد كثافة الهواء الرطب المعلوم فيه $t = 320°C$ و $p = 0.3 MPa$.

الحل:

نوجد في البداية الثابت المميز للهواء الرطب:

$$R = g_a R_a + g_v R_v$$

حيث الدليل v يخص البخار.

a يخص الهواء الجاف.

$$R = \frac{1}{1+d}R_a + \frac{d}{1+d}R_v = \frac{1}{1+0.03}\frac{8314}{28.96} + \frac{0.03}{1+0.03}\frac{8314}{18.016}$$
$$= 292.1 J/kgK$$

تتحدد كثافة الهواء الرطب من معادلة كلابيرون (2-15):

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{0.3\times10^6}{292.1\times593.15} = 1.733 kg/m^3$$

مثال 9-2

درجة حرارة الهواء الرطب في إحدى الحالات $t = 80°C$ وفي الحالة الثانية $t = 120°C$، $p_b = 745 mmHg$ ، احسب φ إذا كان $p_v = 120 mmHg$.

الحل

بالنسبة للحالة الأولى $t = 80°C < t_s = 99.4°C$، لذا فإن:

$$p_{vs} = p_s = 0.483 at = 355 mmHg$$

إذا:
$$\varphi = \frac{p_v}{p_{vs}} = \frac{125}{355} = 0.34$$

أما بالنسبة للحالة الثانية $t = 120°C > t_s = 99.4°C$، لذا فإن:

$$p_{vs} = p_b = 745 mmHg$$

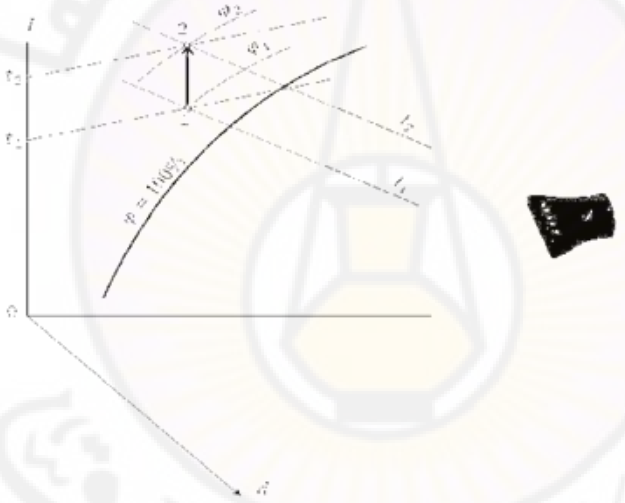
إذا:
$$\varphi = \frac{125}{745} = 0.17$$

9-5: العمليات الترموديناميكية على الهواء الرطب مع تمثيلها على مخطط (I,d)

هناك فروع في الصناعة أو على مستوى راحة الإنسان (تكييف الهواء) تعتمد على الهواء الجوي كجسم تشغيل، عندها يتم إخضاع الهواء لمجموعة من العمليات التي تساعد في تحضيره لتحقيق الغاية المرجوة من استخدامه. فيما يلي أمثلة عن بعض تلك العمليات مع تمثيلها على مخطط (I,d).

1-5-9: عملية تسخين الهواء

يجري تسخين الهواء دون تغير بمضمون رطوبته ($d = const.$)، تمثل هذه العملية على مخطط (I,d) بمستقيم موازي لمحور I. تتم هذه العملية في أجهزة ندعوها بالكالوريفير (أو مسخنات الهواء، وكمثال عليها السيشوار أو مجفف الشعر) تكون مصنعة من أنابيب ملساء أو من أنابيب حلزونية مريشة وقد تكون صفائحية. إذا كانت حالة الهواء الرطب البدائية تمثلها النقطة (1) (المعلوم فيها t_1, φ_1) وقمنا بتسخينه في الكالوريفير فإن العملية تمثل بمستقيم مواز لمحور I ومتجه نحو الأعلى حتى النقطة (2) (المعلوم فيها t_2, φ_2)، الشكل (9-6).



الشكل (9-6): تمثيل عملية تسخين الهواء على مخطط (I,d)

تتحدد كمية الحرارة اللازمة من أجل تسخين $m\,kg/s$ هواء من الحالة (1) وحتى الحالة (2) بالعلاقة:

$$Q = m(i_2 - i_1) \qquad (27\text{-}9)$$

حيث i_1, i_2 انتالبيي الهواء في النقطتين (1) و (2) على التوالي. نحددهما من مخطط (I,d).

m تدفق الهواء المار في الكالوريفير.

أما تحليليا فيتم حساب كمية الحرارة بالعلاقة:

$$Q = \dot{m}(1.005 + 1.89\,d)(t_2 - t_1) \qquad (28\text{-}9)$$

حيث $(1.005 + 1.89\,d)$ السعة الحرارية الكتلية للهواء الرطب.

t_1, t_2 درجتا حرارة الهواء الرطب في النقطتين (1) و (2) على التوالي.

d مضمون الرطوبة للهواء.

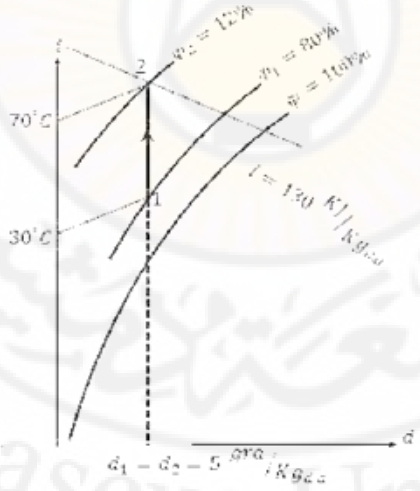
عند قيم ليست كبيرة لمضمون الرطوبة $(d < 0.01\,kg/kg_{d.a})$، فإن مصروف الحرارة المطلوب لتسخين بخار الماء الموجود في الهواء الرطب يمكن إهماله، وعندها:

$$Q = \dot{m} \times 1.005\,(t_2 - t_1)$$

مثال 9-3

يسخن الهواء ذو البارامترات $t_1 = 30°C$ و $\varphi_1 = 80\%$ في الكالوريفير حتى درجة الحرارة $t_2 = 70°C$. حدد بارامترات حالة الهواء النهائية وذلك مستعينا بمخطط (I,d).

الحل:



الشكل (9-7): تابع للمثال (9-3)

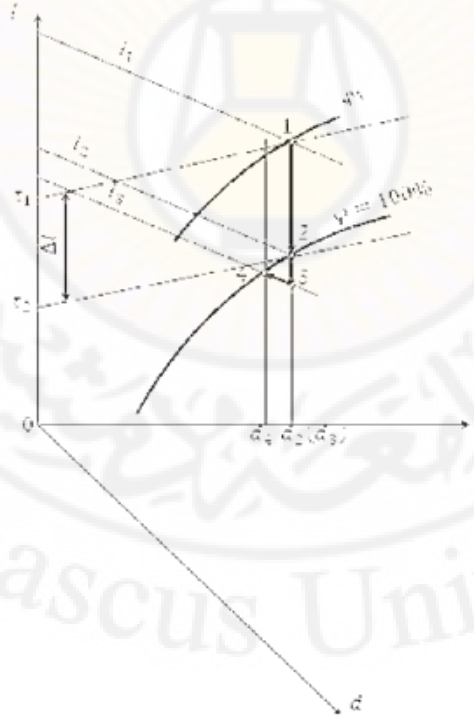
نحدد على مخطط (I,d) حالة الهواء البدائية من تقاطع $t_1 = 30°C$ مع $\varphi_1 = 80\%$، ثم نرسم من نقطة التقاطع (1) مستقيم شاقولي باتجاه الأعلى (عملية

تسخين) حتى يقطع الإيزوترم $t_2 = 70°C$، الشكل (9-7). نقطة التقاطع (2) هي حالة الهواء النهائية بعد تسخينه في الكالوريفير، ومن المخطط يمكن قراءة:

$$i_2 = 130\,kJ/kg_{da} \quad ، \quad \varphi_2 = 12\% \quad ، \quad d_2 = d_1 = 5\,g/kg_{da}$$

9-5-2: عملية تبريد الهواء

تجري هذه العملية عند $d = const.$، وتمثل على مخطط (I,d) بمستقيم شاقولي موازي لمحور I ولكنه متجه من الأعلى ونحو الأسفل، الشكل(9-8). تتم العملية في أجهزة ندعوها بمبردات الهواء تكون مصنعة من أنابيب ملساء أو من أنابيب حلزونية مريشة وقد تكون صفائحية وفيها تنخفض درجة حرارة الهواء وانتالبيه من جراء انخفاض الحرارة المحسوسة بدون تغير في مضمون الرطوبة، تصنع عادة من أنابيب نحاسية أو خلائط معدنية بمواصفات معينة. وفق عملية التبريد المحسوس هذه تزداد الرطوبة النسبية للهواء وتصل إلى $\varphi = 100\%$ في النقطة (2).



الشكل (9-8): تمثيل عملية التبريد على مخطط (I,d)

إذا تبين أن حالة الهواء في نهاية عملية التبريد واقعة أسفل منحني الإشباع ($\varphi = 100\%$) أو أخفض من درجة حرارة نقطة الندى (درجة الحرارة في النقطة 3 أخفض مما هي عليه في النقطة 2)، يمكن أن تبدأ عملية تكاثف أبخرة الماء الموجود في الهواء الرطب، أي أنه بالإضافة لعملية التبريد التي يتعرض لها الهواء سوف يجري تجفيفه. تخفيض درجة الحرارة من t_1 وحتى t_2 يترافق بتبادل حراري محسوس بين الهواء ومبرد الهواء.

تمثيل عملية تبريد الهواء تتم وفق المستقيم $d = const.$ حتى تقاطعه مع المنحني $\varphi = 100\%$ وذلك نتيجة تماسه مع سطح أكثر برودة، حيث درجة حرارته ليست أقل من درجة حرارة نقطة الندى للهواء المبرد، الرطوبة النسبية للهواء المبرد عند ذلك تصل إلى 100%.

تشير الملاحظة إلى أن حالة الهواء في النقطة (3) تعد غير مستقرة وتنتقل إلى الأكثر استقراراً على منحني الإشباع في النقطة (4).

عند استمرار انخفاض درجة حرارة الهواء تبدأ عملية سقوط قطرات الرطوبة من الهواء بكمية ($d_3 - d_4$) الأمر الذي يترافق بفقدان الهواء لكمية من الحرارة (من جراء الفرق $d_3 - d_4$) كمية الحرارة هذه ليست كبيرة لهذا يمكن اعتبار أن الانتقال من النقطة (3) إلى النقطة (4) يجري عند ثبات المحتوى الحراري (الإنتالبي i_3).

ملاحظة: غالبا ما يستخدم مخطط (I,d) من أجل حساب تكييف الهواء. من المناسب إجراء الحساب تحليلياً، لكن في بعض الحالات يقود هذا الطريق إلى صعوبة مقارنة مع الحل البياني، لكن يتطلب استخدام الحساب البياني أن يتم تنفيذه بدقة عالية بغية حل المسألة المطروحة والحصول على نتائج موثقة.

3-5-9: عملية مزج كتل هوائية

غالبا ما تواجهنا عند دراسة الهواء الرطب عملية مزج تيارين هوائيين بتدفقين مختلفين (على سبيل المثال عملية مزج هواء الوسط الخارجي الحار صيفاً مع الهواء الداخلي الخارج من المكان المكيف بدرجة حرارة أدنى، حيث تتم عملية المزج ضمن غرفة المزج الموجودة ضمن أجزاء وحدة معالجة الهواء الشكل 9-9-أ). يسمح مخطط (I,d)

للهواء الرطب حساب عمليات مزج تيارين هوائيين بيانياً وبفرض أنه أثناء عملية المزج أهملنا التبادل الحراري مع الوسط المحيط واعتبرنا أن الضغط ثابت لا يتغير والعمل ضد القوى الخارجية لا ينجز ، فإنه عند مزج كتلتين m_1 و m_2 من الهواء الرطب ببارامترات النقطتين (1) المعلوم فيها (I_1, d_1) والنقطة (2) المعلوم فيها (I_2, d_2)، الشكل(9-9-ب):



(أ): الشكل التوضيحي (ب): التمثيل على مخطط (I, d)

الشكل (9-9): تمثيل عملية مزج تيارين هوائيين على مخطط (I, d)

نكتب معادلة موازنة الرطوبة:

$$m_1 d_1 + m_2 d_2 = m_3 d_3 \qquad (29\text{-}9)$$

حيث m_3 و d_3 كتلة ومضمون رطوبة الخليط المتشكل.

معادلة التوازن الكتلي: $m_1 + m_2 = m_3$

معادلة الموازنة الحرارية لحالة الهواء قبل وبعد المزج:

$$m_1 i_1 + m_2 i_2 = m_3 i_3 \qquad (30\text{-}9)$$

تتحدد بارامترات حالة الخليط الهوائي الناتج بعد المزج من المعادلات التالية:

$$i_3 = \frac{m_1 i_1 + m_2 i_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 i_1 + m_2 i_2}{m_3} \qquad (31\text{-}9)$$

$$d_3 = \frac{m_1 d_1 + m_2 d_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 d_1 + m_2 d_2}{m_3} \qquad (32\text{-}9)$$

$$t_3 = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_3} \qquad (33\text{-}9)$$

إذا رمزنا لنسبة الكتل بـ n $\left(n = \frac{m_1}{m_2} \right)$، عندها نستطيع كتابة العلاقة السابقة بعد قسمة البسط والمقام على m_2 والإصلاح نجد:

$$d_3 = \frac{n d_1 + d_2}{n + 1}$$

بحل المعادلة الأخيرة من أجل n نجد:

$$n = \frac{d_2 - d_3}{d_3 - d_1} \qquad (34\text{-}9)$$

وبالمثل يمكن أن نكتب:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{i_2 - i_3}{i_3 - i_1} = \frac{d_2 - d_3}{d_3 - d_1} = n \qquad (35\text{-}9)$$

ولكن الأبسط تحديد بارامترات الخليط بيانيا حيث تمثل العلاقة (35-9) معادلة مستقيم يمر من النقاط (1)، (2)، (3) ذات البارامترات (I_1, d_1)، (I_2, d_2)، (I_3, d_3). أي أن نقطة المزج (3) في الشكل (9-9-ب) تقع على هذا المستقيم وتقسمه داخليا بالنسبة العكسية لكتلتي الهواء m_1 و m_2. إذا:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\overline{(1)-(3)}}{\overline{(3)-(2)}} = n$$

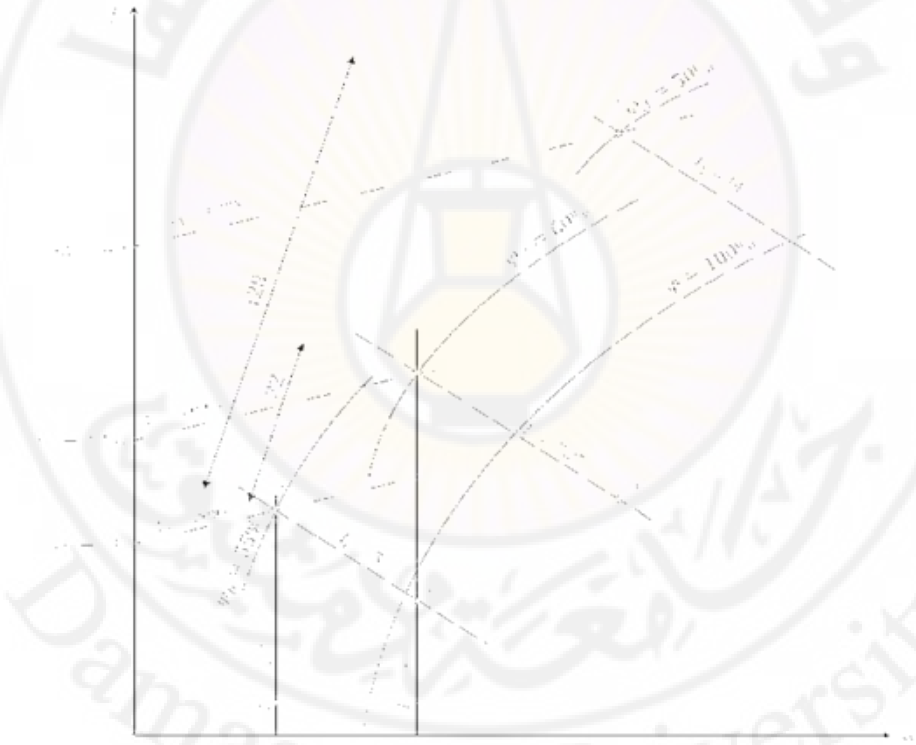
بيانيا يمكن تحديد موقع النقطة (3) الواصفة لحالة المزيج على القطعة المستقيمة (2)-(1) وذلك بالاستعانة بمخطط (I,d) بعد تقسيم طول القطعة (2)-(1) على $n+1$، وانطلاقا من النقطة (1) نأخذ طولا مساويا لحاصل القسمة لنصل لنقطة المزج (3)، وبالتالي نقرأ جميع بارامتراتها (p_v, φ, d).

مثال 9-4

حدد بارامترات مزيج الهواء الذي ينتج عن مزج $1.000\,kg/h$ من هواء بارامتراته $t_a = 28°C, \varphi_a = 50\%$ مع $3.000\,kg/h$ هواء بارامتراته $\varphi_b = 55\%$ $t_b = 10°C$.

الحل:

بمساعدة مخطط (I,d) نحدد موقع النقطتين (a)، (b) الموافقتين لحالتي الهوائين الممتزجين الداخلين في الخليط، الشكل (9-10). من المخطط نجد أن بارامترات الهواء للحالة (a) هي $i_a = 14\,kcal/kg, d_a = 12\,g/kg_{da}$، وللحالة (b) هي $i_b = 5\,kcal/kg, d_b = 4.33\,g/kg_{da}$.



الشكل (9-10): تابع للمثال (9-4)

بوصل النقطتين (a) و (b) نحصل على مستقيم نقيس طوله وهو يساوي $128\,mm$، وبحسب القاعدة:

$$\frac{m_m}{\overline{ab}} = \frac{m_a}{\overline{bc}}$$

وبالتبديل بالقيم المعلومة وبالحل نجد:

$$\overline{bc} = \frac{m_a}{m_m}\overline{ab} = \frac{1{,}000}{4{,}000} \times 128 = 32\,mm$$

بوضع هذا القياس على المستقيم (ab) اعتبارا من النقطة (b) نحصل على النقطة (c) التي تعتبر بارامتراتها مجهولة، ومن المخطط نجد:

$$t_c = 14.6°C,\ \varphi_c = 60\%,\ i_c = 7.25\,kcal/kg_{da},\ d_c = 6.25\,g/kg_{da}$$

يمكن التحقق من النتيجة التي حصلنا عليها بالطريقة التحليلية وذلك اعتمادا على العلاقتين:

$$I_c = \frac{I_a + n I_b}{1+n}$$

$$\frac{d_c}{1{,}000} = \frac{d_a + n d_b}{(1+n)\times 1{,}000}$$

$$n = \frac{m_b}{m_a} = \frac{3{,}000}{1{,}000} = 3$$

$$I_c = \frac{14 + 3.5}{1+3} = 7.25\,kcal/kg_{da}$$

$$d_c = \frac{12 + (3 \times 4.33)}{1+3} = 6.25\,g/kg_{da}$$

وبصورة مشابهة يمكن أن نحدد درجة حرارة الخليط t_c:

$$t_c = \frac{t_a + n t_b}{1+n} = \frac{28 + (3\times 10)}{1+3} = 14.5°C$$

وكما نلاحظ إن النتائج التي حصلنا عليها بيانيا قريبة بدرجة كافية لتلك الحاصلة من الحل التحليلي.

6-9: التأثير المشترك بين الماء والهواء عند تلامسهما، ترطيب الهواء الأدياباتي

للتأثير المشترك بين الهواء والماء عند تلامسهما أهمية كبرى في الهندسة الحرارية. في هذه الحالة يتم بين المائع والهواء تبادل كتلي وحراري. يمكن تفسير عملية التبادل الكتلي بأنه خلال عملية التبخر تظهر على سطح الماء على الحدود مع الهواء طبقة من الهواء المشبع المتشكل نتيجة تطاير جزيئات المائع التي تغلبت على قوى التوتر السطحي للمائع. بما أن الجزيئات المتطايرة لا تستطيع النفاذ إلى عمق الهواء نظرا لاصطدامها بجزيئاته فإن تركيز جزيئات المائع في الطبقة الرقيقة من الهواء المحاذية لسطح المائع كبير بحيث يمكن بدرجة كافية من الدقة اعتمادها مشبعة ببخار الماء ذي الضغط الجزئي p_{v_s} المساوي لضغط البخار المشبع عند درجة حرارة الطبقة السطحية للمائع في حين أن ضغط البخار في عمق الهواء هو p_v.

نتيجة لانتقال جزيئات الماء من الطبقة السطحية إلى الهواء وجزيئات البخار من الهواء إلى الطبقة السطحية يتم إما تبخر الماء –إذا كانت الجزيئات الأولى أكثر عددا من الثانية– أو تكاثف بخار الماء من الهواء على سطح الماء إذا كان الاتجاه الثاني هو السائد. تحدد نتيجة تبادل الجزيئات بالقيم p_v و p_{v_s}. عندما يكون $p_v = p_{v_s}$ لا يكون هناك تبادل كتلي ظاهر وعند $p_{v_s} > p_v$ يحصل التبخر أما عند $p_{v_s} < p_v$ فيتكاثف البخار من الهواء على سطح المائع.

يمكن استعمال مخطط (I,d) لتحديد فيما إذا كانت هناك عملية تبخر أم تكاثف. لهذا الغرض تؤخذ على المنحني $\varphi = 100\%$ نقطة موافقة لدرجة الحرارة على سطح المائع شكل(9-11 «النقطة 5») (وهو مخطط رامزين المستخدم في حل مسائل بحث الهواء الرطب والموضوع من أجل الضغط الجوي $745\,mmHg$، حيث واحدة قياس الانتالبي عليه $(kcal/kg_{as})$ وينشأ منها شاقول. تصف النقاط الواقعة على هذا الشاقول حالات الهواء غير المشبع التي لا يكون فيها تبخر ولا تكاثف ذلك لأن $p_v = p_{v_s}$. تصف النقاط الواقعة إلى اليمين من الشاقول حالات الهواء التي يحدث عندها التكاثف لأنه كما نرى من المخطط في هذه الحالات يكون $p_{v_s} < p_v$، في هذه الحالة يكون

مضمون الرطوبة ودرجة حرارة نقطة الندى للهواء أكبر من مضمون الرطوبة ودرجة الحرارة في طبقة الهواء المشبع الملامسة لسطح المائع، بالنسبة لحالات الهواء الموافقة للنقاط الواقعة على يسار الشاقول ($\rho_{v_1} > \rho_{v_2}$) يحدث تبخر المائع لأن مضمون الرطوبة ودرجة حرارة نقطة الندى للهواء أقل من مضمون الرطوبة ودرجة الحرارة في طبقة الهواء المشبع الملامسة لسطح المائع. عند انسياب الهواء على سطح الماء يحدث تبادل حراري وكتلي يؤثر في درجة حرارة الماء فتيار البخار المنتقل من المائع إلى الهواء (أو بالعكس) يقترن بتيار حراري متجه بالاتجاه نفسه لأن البخار يحمل حرارة تشكيله معه وهذا ما يفسر ظاهرة تبرد الموائع عند تبخرها في الهواء. بالإضافة إلى ذلك هناك تيار حراري مباشر بين الماء والهواء متجه من الجسم الأسخن إلى الجسم الأبرد.

عندما ينعدم مجموع التيارين الحراريين الناجمين عن تيار البخار وفرق درجات الحرارة تستقر درجتا حرارة الماء والهواء. وهذا ما يفسر اختلاف قراءتي ميزاني الحرارة الرطب (t_w) والجاف (t_d) في السايكرومتر. فقراءة الميزان الرطب (الذي أحيط مستودعه الزئبقي بقطعة قماشية خفيفة غمر طرفها في كأس مملوء بالماء الشكل (9-12) تكون عادة أقل من قراءة الميزان الجاف.

عادة يحمل أيضاً مقياس درجة الحرارة ذو الحبابة الجافة على نفس إطار الجهاز وبالتالي يمكن قراءة كل من درجة حرارة الحبابة الجافة والرطبة في آن معاً الشكل(9-13).

مع التقدم الحاصل في مجال الالكترونيات أصبح من الممكن قياس الرطوبة النسبية بشكل سريع وموثوق، يبدو أن مقياس الرطوبة المحمول ومقياس درجة الحرارة ذو الحبابة الرطبة أصبحا أمورا من الماضي، أما اليوم فتعتمد أجهزة قياس الرطوبة الالكترونية المحمولة على تغير السعة في طبقة رقيقة من فيلم البوليمير وبما أنها قادرة على امتصاص بخار الماء فهي تستطيع استشعار الرطوبة النسبية وعرضها رقميا خلال بضع ثوان.

الشكل (9-11): مخطط (I,d) للهواء الرطب

Damascus University



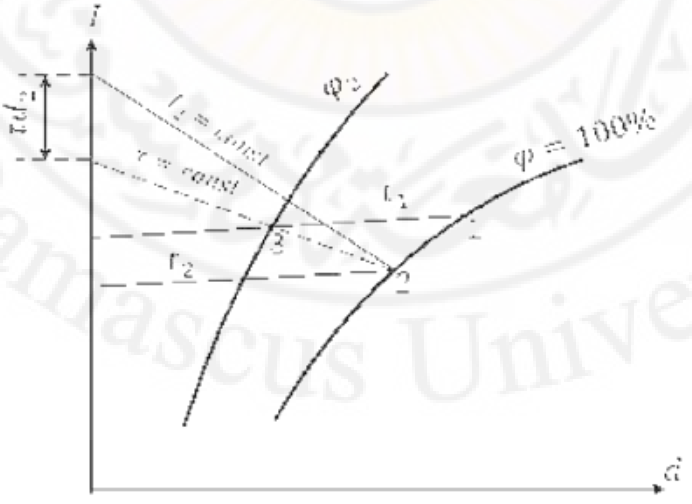
الشكل (9-12): ميزان درجة الحرارة الرطبة



الشكل (9-13) مقياس رطوبة الجو

بالنسبة لدرجات الحرارة العادية للهواء والماء فإن درجة حرارة الميزان الرطب قريبة جداً مما يسمى بدرجة حرارة الإشباع الأديباتي للهواء τ. ويفهم من الأخيرة (τ) درجة الحرارة النهائية الحاصلة من جراء إشباع كمية محدودة من الهواء المتلامس مع الماء إذا كان تبخر الماء يحصل فقط على حساب الحرارة المعطاة من الهواء. إن خطوط $\tau = const.$ ترسم على المخطط بخطوط متقطعة تتوازي تقريباً خطوط $I = const.$ الشكل (9-14) وهي تتقاطع مع خطوط $I = const.$ التي لها قيمة درجة الحرارة نفسها (درجة الحرارة الجافة عند خط $\varphi = 100\%$).

إن حل المسألة عن إيجاد اتجاه تغير درجة حرارة الماء عند التأثير المتبادل مع الهواء يتم بمعرفة كل من درجة حرارة الماء وحالة الهواء وهي تحل بسهولة بوساطة مخطط (I,d). إذا كانت النقطة الواصفة لحالة الهواء غير المشبع واقعة على يمين الخط $\tau = const.$ المأخوذ لدرجة حرارة الماء (بدقة أكبر لدرجة الحرارة على سطح الماء) مثلاً إلى اليمين من الخط 2-1 على الشكل (9-14) فسيحصل تسخين المائع ذلك لأن درجة حرارة الإشباع الأديباتي كما هو ظاهر من المخطط (I,d) للهواء غير المشبع أكبر من درجة حرارة المائع أما إذا كانت حالة الهواء غير المشبع تمثل بنقطة واقعة إلى اليسار من الخط $\tau = const.$ المأخوذ لدرجة حرارة الماء فسيحصل تبريد المائع وهذا يظهر بوضوح من المثال (9-8).



الشكل (9-14): توضع خطوط $\tau = const.$ على مخطط (I,d)

إن عملية تجفيف جسم ما في المجفف تنطوي على تبخير الرطوبة الموجودة فيه. وهذا يحدث بوساطة الهواء الحار الموجه إلى الجسم. يحضر الهواء الساخن في الكالوريفر. وتحدث هذه العملية عند $d = const.$ أما عملية التجفيف فهي عملية $I = const.$ (بشكل تقريبي يفترض أنه في المجفف النظري يكون إنتالبي الرطوبة المبخرة مساويا للصفر)، وينتج الشرط $I = const.$ من المعادلة (9-3) إذا افترضنا τ فيها مساوية للصفر وعليه فإن حل المسائل المتعلقة بتجفيف الأجسام في المجفف النظري يقتصر على دراسة عمليتين: الأولى $d = const.$ والثانية $I = const.$ وهما عمليتان تمثلان على مخطط (I,d) بسهولة على شكل خطين مستقيمين (انظر المثال 9-11).

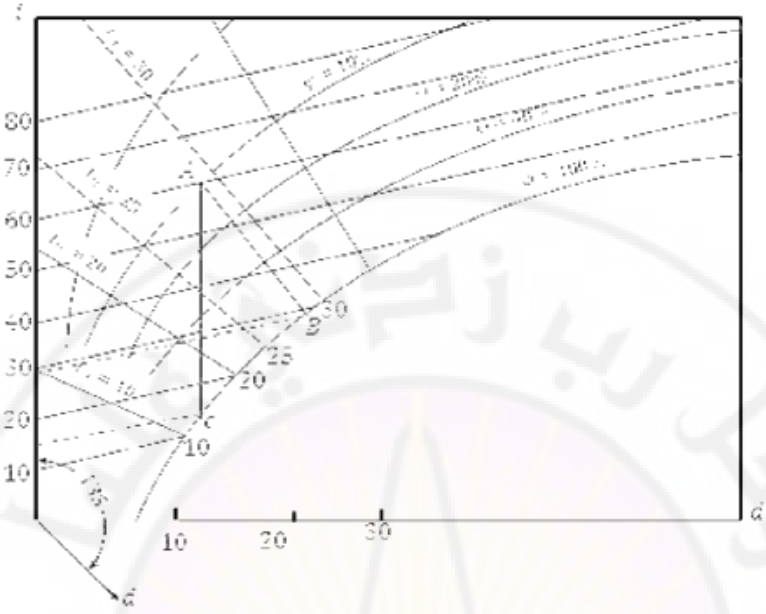
مثال 9-5

تتحدد حالة الهواء الرطب بالبارامترات $t = 60°C$ ، $\varphi = 10\%$ ، والمطلوب تحديد درجة الحرارة الرطبة ودرجة حرارة نقطة الندى.

الحل:

نقوم بداية بتحديد حالة الهواء البدائية على مخطط (I,d) وذلك من تقاطع $t = 60°C$ مع $\varphi = 10\%$ ، النقطة (A). بما أن قراءة ميزان الحرارة الرطب هي درجة حرارة الإشباع الأديباتي للهواء، وهذه العملية تتميز بثبات درجة حرارة السائل المتبخر $t_m = const.$ لذا نمرر من النقطة (A) مستقيم موازي لخطوط $t_m = const.$ حتى يقطع خط $\varphi = 100\%$ ، النقطة (B). الإيزوترم المار بهذه النقطة هو بمثابة درجة الحرارة المجهولة $(t_m = 29°C)$.

من أجل تحديد درجة حرارة نقطة الندى لا بد من تبريد الهواء الرطب إيزوباريا حتى حالة الإشباع الكامل (بما أن عملية $p = const.$ تتوافق مع $d = const.$ فإن نقطة الندى نحصل عليها من تقاطع العمود المنزل من (A) وتقاطعه مع $\varphi = 100\%$ ، النقطة (C). ومن المخطط نجد أن $t_{dc} = 18°C$ ، الشكل (9-15).



الشكل (9-15): تابع للمثال (9-5)

مثال 9-6:

قراءتا ميزاني حرارة السايكرومتر الجاف والرطب هما $t_{dr} = 45°C$ ، $t_w = 37°C$. حدد نوعية هذا الهواء وأوجد بارامتراته ($p_b = 745\,mmHg$) وذلك تحليلياً وبيانياً.

الحل التحليلي:

من المخطط في الشكل(9-11) نجد $\varphi = 0.6$ وعليه فالهواء الرطب المعطى غير مشبع.

حسب الملحق -1- لبخار الماء عند $t_{dr} = 45°C$:

$$p_{s45°C} = p_{vs} = 0.0977\,at = 72\,mmHg$$

حسب العلاقة (9-13) نجد:

$$p_v = \varphi\, p_{vs} = 0.6 \times 72 = 43\,mmHg$$

حسب الضغط الجزئي الذي أوجدناه، نجد من الملحق -1- أن درجة حرارة نقطة الندى $t_{dr} = 45°C > t_d = 36°C$، إذا البخار في الهواء محمص.

من العلاقة (9-7) نجد:

$$d = 622\frac{p_v}{p_b - p_v} = 622\frac{43}{702} = 38\,g/kg_{da}$$

وحسب العلاقة (9-21):

$$I = c_{p_m} t + d\,i_v = (0.24\times 45) + 0.038(595 + (0.47\times 45)) = 34\,kcal/kg$$

الحل التخطيطي:

على مخطط (I,d) من نقطة تقاطع الخط $t_{da} = 45°C$ مع $t_w = \tau = const. = 37°C$ نجد النقطة (4) ذات البارامتر $\varphi = 60\%$، الشكل (9-11). (إذا لم تكن هناك خطوط ثبوت τ أو t_w نجد نقطة تقاطع $t_w = 37°C$ مع الخط $\varphi = 100\%$ «وهي نفسها نقطة تقاطع خط $t_{da} = const.$ مع خط $\varphi = 100\%$» ومن النقطة التي أوجدناها نرسم خط ثبوت I وعند تقاطع الخط الأخير مع الخط $t_{da} = 45°C$ نجد النقطة (4)).

بإسقاط النقطة (4) على محور السينات نجد $d = 38\,g/kg_{da}$، أما إذا أسقطناها بزاوية 135° على محور العينات فنجد $I = 34\,kcal/kg_{da}$.

باستعمال الخط $p_v = f(d)$ نجد -إلى اليمين من المخطط- على المحور الموازي لمحور العينات $p_v = 43\,mmHg$ بإنشاء شاقول من النقطة (4) حتى التقاطع مع الخط $\varphi = 100\%$ نجد النقطة التي لها $t_d = 35°C$.

مثال 9– 7:

ينساب الهواء عند $t = 60°C$ و $\varphi = 50\%$ على سطح الماء عند $\tau = t_L = 42°C$. في الحالة الثانية بارامترات الهواء $t = 60°C$ و $\varphi - 30\%$. حدد ماذا سيحدث تبخر أم تكاثف.

الحل:

من مخطط (I,d)، الشكل (9-11) نجد أنه للحالتين $p_{vsL} = 60\,mmHg$ (النقطة 5).

بالنسبة للحالة الأولى $p_v - 73\,mmHg$، وبما أن $p_v > p_{vsL}$ فسيحدث تكاثف.

أما في الحالة الثانية فإن $p_v = 45\,mmHg$ ، بما أن $p_v < p_{vsL}$ فسيحدث تبخر .

مثال 9-8:

درجة حرارة الماء تساوي $t_l = 40°C$. بأي اتجاه ستتغير درجة الحرارة إذا كان للهواء الذي ينساب على سطحه: في الحالة الأولى البارامترات $t = 50°C$ و $\varphi = 40\%$ وفي الحالة الأخرى $t = 50°C$ و $\varphi = 70\%$.

الحل:

الحالة الأولى للهواء غير المشبع تقع إلى اليسار من الخط $\tau = const. = 40°C$ لذا فإن الماء في الحالة الأولى سيبرد، أما في الحالة الثانية للهواء غير المشبع فتقع إلى اليمين من $\tau = const. = 40°C$ لذا فإن الماء سيسخن، انظر الشكل (9-11).

9-7: المخطط السايكرومتري

يستخدم في الدول الغربية المخطط السايكرومتري عوضاً عن مخطط (I,d) وهو أيضا ينشأ لضغط جوي معين، المخطط السايكومتري عند الضغوط الأخرى (عند ارتفاعات أعلى بكثير من سطح البحر) أيضا متوفر .

تحدد حالة الهواء الجوي عند ضغط محدد ببارامترين مستقلين. باقي الخواص يمكن حسابها من العلاقات السابقة المذكورة أعلاه .يظهر في الشكل (9-16) مخطط سايكرومتري نموذجي.

المخطط المرسوم بالإحداثيات الديكارتية ومحاوره الإحداثية هي درجة الحرارة الجافة DB (المحور الأفقي). ودرجة حرارة نقطة الندى DP (المحور الشاقولي). وعليه خطوط ثبوت درجة الحرارة الجافة شاقولية بينما خطوط درجة حرارة نقطة الندى فأفقية أما بالنسبة لخطوط ثبوت درجة حرارة الميزان الرطب WB فهي مستقيمات ذات ميل سالب.

كذلك الأمر بالنسبة لخطوط ثبوت الحجم النوعي فهي أيضاً مستقيمات ذات ميل سالب ولكنها أكثر صعوداً من درجة حرارة الميزان الرطب. المنحنيات ذات الميل الموجب المتزايد هي خطوط الرطوبة النسبية RH . الحد المنحني للمخطط من الطرف الأعلى الأيسر هو خط الإشباع $(RH = 100\%)$.

الشكل (9-16): المخطط السايكرومتري

الشكل (9-17): تمثيل خطوط البارامترات المختلفة على المخطط السايكومتري

أما المنحني ذو الميل السالب في أسفل المخطط والميل الموجب في أعلاه فهو منحني انحراف الإنتالبي. (انحراف الإنتالبي هو الفرق بين الإنتالبي النوعي الحقيقي للهواء وإنتالبي الهواء المشبع الذي له قيمة درجة حرارة الميزان الرطب نفسها WB) الشكل (9-17).

قيم ثبوت درجة حرارة الميزان الجاف DB معينة على الحد الأدنى للمخطط (كتابة قائمة). قيم خطوط ثبوت الحجم النوعي مدرجة في أسفل المخطط (سطر سفلي).

الأرقام على منحني الإشباع (كتابة مائلة حسب ميل المنحني) هي قيم ثبوت درجة حرارة الميزان الرطب WB ودرجة حرارة الميزان الجاف DB ودرجة حرارة نقطة الندى DP (خط ثبوت درجة حرارة نقطة الندى ينطبق على خط ثبوت مضمون الرطوبة، ذلك لأن خطوط ثبوت درجة الحرارة DB و WB و DP التي لها القيمة نفسها تتلاقى على منحني الإشباع، الشكل (9-17). قيم خطوط ثبوت مضمون الرطوبة تقرأ على التدريج الواقع إلى اليمين من المخطط.

قيم الإنتالبي النوعي للهواء المشبع عند أية درجة حرارة رطبة WB يمكن إيجادها بمتابعة خط WB حتى الوصول إلى تدريج الإنتالبي فوق منحني الإشباع الشكل (9-18). (يرمز للإنتالبي على هذا المخطط بالرمز h).

الشكل (9-18)

مثال 9-9

تحوي غرفة على هواء عند الضغط ا جو ودرجة حرارة 35°C ورطوبة نسبية 40%. حدد باستخدام المخطط السايكومتري ما يلي: أ) الرطوبة المطلقة ، ب) الإنتالبي، ج) درجة حرارة الميزان الرطب، د) درجة حرارة نقطة الندى، هـ) حجم الهواء المحدد.

الحل:

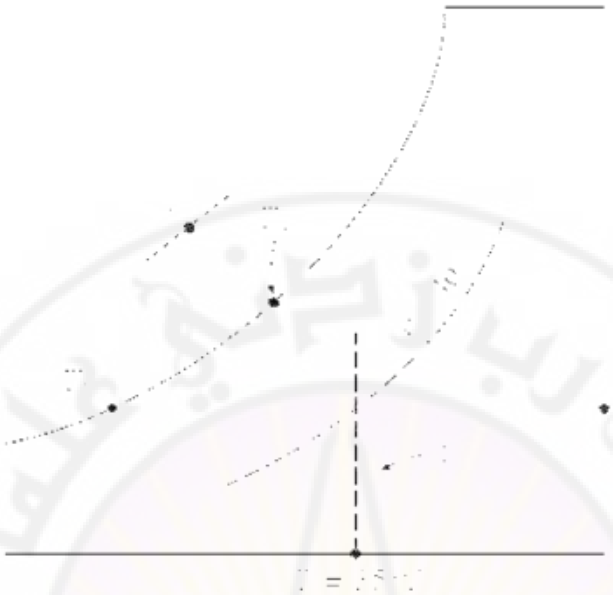
عند الضغط الكلي المعطى، تتحدد حالة الهواء الجوي بشكل كامل بواسطة بارامترين مستقلين هما درجة حرارة الميزان الرطب والرطوبة النسبية φ أما باقي البارامترات فيمكن تحديد قيمها مباشرة وذلك بقراءتها من المخطط السايكومتري مباشرة.

أ) مضمون الرطوبة للحالة المحددة تعين من إسقاط خط أفقي من حالة الهواء المعطاة إلى اليمين حتى تتقاطع مع محور ω كما هو موضح بالشكل(9-19) عند نقطة التقاطع نقرأ:

$$\omega = 0.0142\, kg_{H_2O} / kg_{dry\,air}$$

ب) إنتالبي الهواء يتعين برسم خط مواز لـ $h = const.$ من الحالة المحددة حتى تتقاطع مع قيم الإنتالبي المدرجة بصورة مائلة على محوري الإحداثيات، عند نقطة التقاطع نجد:

$$h = 71.5\, kJ / kg_{dry\,air}$$



الشكل (9-19): تابع للمثال (9-9)

ت) تتعين درجة حرارة الميزان الرطب برسم خط موازٍ لـ $T_{wb} = const.$ من الحالة المحددة حتى تتقاطع مع خط الإشباع، عند التقاطع نقرأ:

$$T_{wb} = 24°C$$

ث) تحدد درجة حرارة نقطة الندى من رسم خط أفقي من الحالة المحددة إلى اليسار حتى تتقاطع مع خط الإشباع، عند ذلك نجد:

$$T_{dp} = 19.4°C$$

ج) الحجم المحدد يتعين من ملاحظة المسافات بين الحالة المحددة و $v = const.$ بخطوط متوازية على طرفي النقطة، ويتحدد عن طريق الاستيفاء النظري ليكون:

$$v = 0.893 m^3 / kg_{dryair}$$

المخطط السايكومتري يقدم خدمة قيمة بعرضه عمليات تكييف الهواء. عملية تبريد أو تدفئة عادية، على سبيل المثال، ستظهر على شكل خط أفقي على المخطط إذا لم يكن هناك عملية ترطيب أو إزالة للرطوبة (و هذه الحالة هي $d = const.$) وأي انحراف

عن الخط الأفقي يظهر أن هناك رطوبة أضيفت أو تم إزالتها من الهواء أثناء العملية، التمثيل مبين على الشكل (9-19).

مثال 9-10

تحتوي غرفة أبعادها $5m \times 5m \times 3m$ كما هي موضحة بالشكل(9-20)، على هواء درجة حرارته $t = 25°C$ وضغطه $p = 100kPa$ ورطوبته النسبية 75% والمطلوب:

١- تحديد الضغط الجزئي للهواء الجاف.

٢- الرطوبة المطلقة.

٣- إنتالبي الهواء الجاف.



الشكل (9-20): تابع للمثال (9-10)

الحل:

يظهر في الشكل (9-20) مخطط توضيحي معطى للغرفة، يملأ كل من بخار الماء والهواء الجاف كامل الغرفة، وبالتالي فإن حجم كل غاز يساوي إلى حجم الغرفة كاملة. بما أن كلا من هواء الغرفة الجاف وبخار الماء هما غازات مثالية إذا:

١- الضغط الجزئي للهواء الجاف يمكن تحديده من العلاقة:

$$p_a = p_b - p_v$$

حيث أن:

$$p_v = \varphi p_g = \varphi p_{sat\,25°C} = 0.75 \times 3.169 = 2.38kPa$$

نعوض: $$p_a = 100 - 2.38 = 97.62kPa$$

٢- تتحدد الرطوبة المطلقة للهواء من العلاقة (9-7):

$$\omega = \frac{0.622\, p_v}{p - p_v} = \frac{0.622 \times 2.38}{100 - 2.38} = 0.0152\, kg_{H_2O} / kg_{dryair}$$

٣- إنتالبي الهواء الجاف في واحدة الكتل يحدد من العلاقة:

$$h = h_a + \omega h_v \cong c_p T + \omega h_g$$
$$-(1.005 \times 25) + (0.0152 \times 2{,}547.2)$$
$$= 63.8\, kJ / kg_{dryair}$$

وكذلك إنتالبي بخار الماء يمكن تحديده من التقريب المعطى بالعلاقة (9-24):

$$h_{v\,25^\circ C} \cong 2501.3 + (1.82 \times 25) = 2{,}546.8\, kJ / kg$$

بما أن كلا من بخار الماء والهواء الجاف يملان كامل حجم الغرفة، فحجم كل الغازين مساو لحجم الغرفة:

$$V_a = V_v = V_{room} = 5 \times 5 \times 3 = 75\, m^3$$

كتلة الهواء الجاف وبخار الماء تتحدد من علاقة كلابيرون للغاز المثالي مطبقة على كل غاز على حدة:

$$m_a = \frac{p_a V_a}{R_a T} = \frac{97.62 \times 75}{0.287 \times 298} = 85.61\, kg$$

$$m_v = \frac{p_v V_v}{R_v T} = \frac{2.38 \times 75}{0.4615 \times 298} = 1.3\, kg$$

كذلك يمكن تحديد كتلة بخار الماء من العلاقة (9-3):

$$m_v = \omega m_a = 0.0152 \times 85.61 = 1.3\, kg$$

9-8: راحة الإنسان والتكييف

يرغب البشر أينما كانوا أن يشعروا بالراحة الحرارية فهم يريدون الحياة في بيئة لا حارة ولا باردة، لا جافة ولا رطبة.

الراحة الحرارية للإنسان لا تأتي بسهولة، فرغباته الحرارية غالبا ما تكون غير متوافقة مع شروط الجو الخارجية. إن تحقيق الراحة الحرارية يتطلب كفاحا مستمرا ضد العوامل التي تسبب عدم الراحة كارتفاع أو انخفاض درجات الحرارة أو الرطوبة،

وكمهندسين، واجبنا مساعدة الناس للشعور بالراحة، لا يستغرق الأمر وقتاً طويلاً عند الناس ليقتنعوا أنهم غير قادرين على تغيير جو مفتوح لمنطقة ما، كل ما يستطيعون فعله هو تغييره في منطقة مغلقة كالمنزل أو مكان العمل أو في أماكن الاستجمام والمشافي و ... في الماضي، تم تحقيق ذلك جزئيا بواسطة النار وأنظمة تدفئة داخلية بسيطة. أما اليوم، فيتم تحقيق ذلك عن طريق أنظمة التكييف الحديثة التي يمكنها تدفئة، تبريد، ترطيب، إزالة الرطوبة، فلترة، وحتى تعطير الهواء. بمعنى اخر ، تكييف الهواء بحسب رغبات الإنسان، المكيفات صممت لتريح حاجات جسم الإنسان. لذلك، من الضروري قبل الشروع في دراسة العمليات الجارية على الهواء الرطب من أجل تأمين الشروط الحرارية الجيدة للهواء المحيط بالإنسان لا بد من أن نتفهم الجوانب الحرارية للجسم.

يمكن تصوير جسم الإنسان على أنه محرك حراري طاقته هي الغذاء. وكما في أي محرك حراري آخر، جسم الإنسان يولد طاقة ضائعة يتم طرحها إلى البيئة (الجو المحيط به) إذا استمر الجسم بالعمل. إن معدل توليد الجسم للحرارة يعتمد على مستوى النشاط، فهي تبلغ وسطيا $87W$ تقريبا عند النوم وذلك من أجل رجل بالغ، وتصبح $115W$ عند الجلوس أو القيام بأعمال مكتبية، و $230W$ عند لعب البولينغ، وتصل إلى $440W$ عند القيام بأعمال جسدية شاقة، وتكون الأعداد مماثلة بالنسبة لأنثى بالغة بنسبة اقل بـ 15% (الاختلاف عائد إلى حجم الجسم وليس إلى درجة حرارته، درجة الحرارة الداخلية للإنسان السليم ثابتة عند $37°C$).

سيشعر جسم الإنسان بالراحة في البيئات التي تستطيع أن تبدد هذه الحرارة الضائعة بشكل مريح، الانتقال الحراري يتناسب مع اختلاف درجة الحرارة، لذلك في البيئة الباردة، يخسر جسم الإنسان المزيد من الحرارة بالمقارنة مع ما يولده وسيشعر بالنتيجة بعدم الراحة.

يحاول الجسم التقليل من عجزه في الطاقة عن طريق خفض دوران الدم بالقرب من الجلد (مؤديا إلى شحوب في اللون) مخفضا درجة حرارة الجلد والتي تبلغ حوالي $34°C$ للإنسان. يسبب انخفاض درجة الحرارة عدم الارتياح، فدرجة حرارة الجلد المنخفضة (في اليدين على سبيل المثال) تكون مؤلمة عندما تبلغ $10°C$. يمكننا تخفيض نسبة فقدان الحرارة من الجسم إما بوضع حواجز (ملابس إضافية، بطانيات، الخ...) بطريق الحرارة

أو من خلال زيادة معدل إنتاج الجسم للحرارة عن طريق القيام بالتمارين. كمثال، مستوى راحة شخص مرتاح مرتد لملابس شتوية دافئة في غرفة درجة حرارتها 10°C يتساوى تقريبا بمستوى الراحة مع شخص مماثل يقوم بأعمال اعتيادية في غرفة درجة حرارتها 23°C –، أو يمكننا ضم أيدينا لبعضها ووضعها بين أقدامنا للتقليل من مساحة السطح التي تتدفق منها الحرارة.

في الجو الحار، لدينا المشكلة لكن معكوسة، لا يبدو أن أجسامنا تستطيع تثبيت الحرارة بما فيه الكفاية ونشعر وكأننا سنشتعل، نرتدي ثيابا أخف لتسهل عملية فقدان الحرارة ونقلل من مستوى النشاط للتقليل من معدل إنتاج الطاقة الضائعة في الجسم ونقوم بتشغيل المروحة بشكل مستمر لضمان تبديل طبقة الهواء الحارة المحيطة بجسمنا الناتجة عن حرارة جسمنا بهواء آخر أبرد من الأجزاء الأخرى من الغرفة.

عندما نقوم بأعمال خفيفة أو نسير ببطء، حوالي نصف حرارة الجسم المطروحة تتشتت عبر العرق **كحرارة كامنة**، بينما النصف الآخر من الحرارة تتشتت عبر الحمل الحراري والإشعاع **كحرارة محسوسة**، عند الجلوس أو القيام بأعمال مكتبية، معظم الحرارة (70% منها) تتشتت على شكل حرارة محسوسة، في حين عند القيام بأعمال جسدية شاقة فإن معظم الحرارة (60% منها) تتشتت على شكل حرارة كامنة ويساعد الجسم في ذلك ظاهرة التعرق، عندما يتبخر العرق، يتم طرح الحرارة الكامنة من الجسم ويبرده، العرق لا يساعد كثيرا إذا كانت الرطوبة النسبية للبيئة قريبة من 100%، التعرق المطول دون أخذ أي سوائل قد يسبب التجفاف ويقلل من العرق مما يؤدي إلى ارتفاع في درجة حرارة الجسم وحدوث صدمة حرارية.

عامل مهم آخر لراحة الإنسان هو نقل الحرارة بالإشعاع بين الجسم والسطوح المجاورة له كالجدران والنوافذ، أشعة الشمس تسافر بالإشعاع عبر الفضاء، يمكنك أن تتدفأ بنار أمامك حتى لو كان الهواء الذي يفصلك عنها باردا. بطريقة مماثلة، في غرفة دافئة، ستشعر بالبرودة إذا كانت سطوح السقف والجدران إلى حد بعيد عند درجة حرارة منخفضة، هذا يعتمد على نقل الحرارة المباشر بين الجسم والسطوح المجاورة بالإشعاع. الحرارة المشعة تستخدم في تدفئة الأماكن صعبة التدفئة كورش صيانة السيارات.

تعتمد راحة جسم الإنسان بشكل رئيسي على ثلاث عوامل: درجة حرارة الجافة، الرطوبة النسبية وحركة الهواء.

درجة حرارة الجو هي المؤشر الوحيد الأكثر أهمية على الراحة. معظم الناس يشعرون بالراحة في بيئة عند درجة حرارة $22 - 27°C$. تملك الرطوبة النسبية تأثيرا واضحا على الراحة على اعتبار أنها تؤثر على كمية حرارة التي يستطيع الجسم تشتيتها عبر التبخير.

الرطوبة النسبية هي مقياس لقدرة الهواء المحيط بالإنسان على امتصاص المزيد من الرطوبة، الرطوبة النسبية المرتفعة تبطئ عملية طرح الحرارة عن طريق التبخير بينما المنخفضة منها تسرع العملية، القيمة المثلى للرطوبة النسبية التي يفضلها معظم الناس تقع في المجال $40 - 60\%$.

حركة الهواء تلعب أيضا دورا هاما في راحة الإنسان، فهي تزيل الحرارة والرطوبة من الهواء المتشكلة حول الجسم وتبدلها بهواء نقي. لذلك، حركة الهواء تدعم طرح الحرارة بطريقتي الحمل الحراري والتبخير. يجدر بحركة الهواء أن تكون قوية كفاية حتى تبعد الحرارة والرطوبة من المنطقة المجاورة للجسم ولكنها يجب أن تكون لطيفة كفاية بحيث لا تلاحظ. معظم الناس يشعرون بالراحة عند سرعة رياح $15 m/\min$، حركة الهواء السريعة جدا تسبب عدم الشعور بالراحة. على سبيل المثال، عند درجة حرارة للجو $10°C$ وسرعة رياح $48 km/h$ يشعرك ببرودة أكثر مما لو كنت في جو عند درجة حرارة $7°C$ – وسرعة رياح $3 km/h$. العوامل الأخرى التي تؤثر على راحة الإنسان هي نظافة الهواء ورائحته، الضجيج، وتأثير الإشعاع.

9-9: عمليات التكييف مع تمثيلها على المخطط السايكومتري

يتطلب الحصول على فراغات بشروط حرارية معقولة لحياة البشر تأمين درجة حرارة ورطوبة ملائمتين وعندها يتطلب ذلك معالجة الهواء الخارجي سواء كان صيفا أم شتاء قبل إدخاله إلى أماكن تواجد الناس وعندها يطلقون على تلك المعالجات **بعمليات تكييف الهواء.**

تتضمن هذه العمليات: تسخين محسوس للهواء (رفع درجة حرارته)، التبريد المحسوس (خفضها)، الترطيب (إضافة رطوبة) أو إزالتها. نحتاج إلى اثنين أو أكثر من هذه العمليات في بعض الأحيان من أجل الحصول على هواء عند درجة الحرارة والرطوبة المرغوب بها. يظهر في الشكل (9-21) عمليات التكييف المختلفة على المخطط السايكومتري. نلاحظ أن عمليتي التبريد والتدفئة المحسوستين تظهران على شكل خط أفقي في المخطط طالما أن الرطوبة الموجودة في الهواء تبقى ثابتة ($d = const.$) خلال العمليتين. (يدفأ الهواء و يرطب عموماً في الشتاء ويبرد وتزال الرطوبة منه في الصيف). تظهر هذه العمليات على المخطط المبين بالشكل (9-21).

مثال 9-11:

للتجفيف يستعمل الهواء عند $t_1 = 20°C$ ، $\varphi = 60\%$ في الكالوريفر، يسخن هذا الهواء حتى $t_2 = 95°C$ ويوجه إلى المجفف، حيث يخرج منه عند $t_3 = 35°C$. أوجد الرطوبة النهائية ومصروف الهواء والحرارة لكل $1kg$ من الرطوبة المتبخرة.

الحل:

على مخطط (I,d) الشكل (9-11) نجد النقطة (1) عند تقاطع $t_1 = 20°C$ و $\varphi = 60\%$ ونعين لها:

$$I_1 = 10.2\,kcal/kg_{da} \quad \text{و} \quad d_1 = 8.9\,g/kg_{da}$$

وبرسم الخط $d = const.$ نجد النقطة (2) عند التقاطع مع الإيزوترم $t_2 = 95°C$

النقطة (2) تصف حالة الهواء بعد خروجه من الكالوريفر. من النقطة (2) نرسم خط $I = const.$ حتى التقاطع مع الإيزوترم $t_3 = 35°C$ حيث نجد النقطة (3) الواصفة لحالة الهواء عند الخروج من المجفف.

نعين بارامترات النقطة (3):

$$I_3 = 28.5\,kcal/kg_{da} \quad \text{و} \quad d_3 = 32.8\,g/kg_{da}$$



الشكل (9-21): تمثيل عمليات التكييف المختلفة على المخطط السايكومتري

وعليه لكل $1kg$ من الهواء الجاف الموجود في الهواء الرطب يكون تغير مضمون الرطوبة:

$$\Delta d = d_2 - d_1 = 32.8 - 8.9 = 23.9\, g / kg_{da}$$

من البديهي أنه لتبخير $1kg$ من الرطوبة يلزم $\frac{1,000}{23.9} = 41.8 kg_{da}$ من الهواء الجاف الموجود في الهواء الرطب.

مصروف الحرارة في الكالوريفير لكل $1kg$ من الهواء الجاف:

$$\Delta I = I_2 - I_1 = 28.5 - 10.2 = 18.3\, kcal / kg_{da}$$

أما مصروف الحرارة لكل $1kg$ من الرطوبة المبخرة (لكل $41.8kg$ من الهواء الجاف) فتشكل:

$$q = 18.3 \times 41.8 = 765\, kcal / kg$$

مسائل غير محلولة

1-9

حدد بمساعدة مخطط (I,d) للهواء الرطب كلاً مما يلي: مضمون الرطوبة d، الرطوبة النسبية φ، الإنتالبي I وكذلك درجة حرارة نقطة الندى t_{dp} إذا علمت أن حالته توصف بالبارامترين: درجة الحرارة الجافة $20°C$ والرطبة $15°C$.

الجواب: $d = 9.2\ g/kg_{da}, \varphi = 62\%, I = 43kJ/kg_{da}, t_{dp} = 12.6°C$

2-9

تتحدد حالة الهواء الرطب البدائية عند الضغط الجوي بـ $t = 25°C$ و $\varphi = 70\%$، يبرد الهواء بعدها حتى درجة الحرارة $15°C$. حدد مقدار الرطوبة المتساقطة من كل $1kg$ هواء.

الجواب: $\Delta d = 3.4\ g/kg_{da}$

3-9

درجة حرارة الهواء الرطب $t = 60°C$ و $\varphi = 50\%$ أوجد الرطوبة المطلقة والضغط الجزئي للبخار.

الجواب: $\rho'_v = 0.0651 kg/m^3, p_v = 0.1016 at$

4-9

درجة الحرارة حسب ترمومترات السايكرومتر $t_{dp} = 50°C$ و $t_w = 46°C$. احسب بارامترات الهواء.

الجواب: $I = 58 kcal/kg_{da}, d = 71\ g/kg_{da}, \varphi = 0.82$

5-9

درجة حرارة الهواء $t = 60°C$ وقراءة الهيدرومتر $t_d = 45°C$. احسب بارامترات الهواء الرطب.

الجواب: $I = 58 kcal/kg_{da}, d = 70\ g/kg_{da}, \varphi = 0.49$

6–9

من مخطط (I,d) أوجد إنتالبي الهواء المشبع عند $p_s = 75\,mmHg$. أوجد أيضاً درجة حرارة هذا الهواء.

الجواب: $I = 54\,kcal/kg_{da}, t = 46°C$

7–9

عند $t = 80°C$ و $\varphi = 40\%$ و $p_b = 745\,mmHg$ ، أوجد d و I والتركيب الكتلي النسبي و t_{dc} للهواء الرطب.

الجواب: $d = 146\,g/kg_{da}, I = 113\,kcal/kg_{da}$, $g_v = 0.129, g_a = 0.871, t_{dc} = 59°C$

8–9

من مخطط (I,d) أوجد إنتالبي الهواء الجاف عند $t = 100°C$.

الجواب: $I = 24\,kcal/kg_{da}$

9–9

يستعمل الهواء عند $t_1 = 10°C$ و $\varphi_1 = 50\%$ للتجفيف بعد أن يسخن في الكالوريفير حتى $t_2 = 90°C$ يوجه إلى جهاز التجفيف ومن هناك يخرج عند $t_3 = 40°C$. احسب مضمون الرطوبة النهائي للهواء ومصروف الهواء والحرارة لـ $1kg$ من الرطوبة المتبخرة.

الجواب: $50\,kg/kg, I_3 = 24\,kcal/kg, q = 970\,kcal/kg$

10–9

يستعمل الهواء عند $t_1 = 10°C$ و $\varphi_1 = 10\%$ للتجفيف وعندما يدخل إلى المجفف تكون درجة حرارته $t_2 = 60°C$ ويخرج منه عند $t_3 = 40°C$ احسب مصروف الهواء لكل $1kg$ من الرطوبة المتبخرة.

الجواب: $125\,kg/kg, q = 1,500\,kcal/kg$

11–9

درجة حرارة الهواء الرطب $t = 40°C$ أما $t_{dc} = 36°C$. أوجد بوساطة مخطط (I,d) كل من I, d, p_v, φ.

الجواب: $I = 33.5\,kcal/kg, d = 38.8\,g/kg, p_v = 43\,mmHg, \varphi = 80\%$

12–9

يسخن الهواء ذي البارامترات $t_1 = 30°C$ و $\varphi_1 = 80\%$ في الكالوريفير حتى درجة الحرارة $t_2 = 70°C$. حدد حالة الهواء النهائية.

الجواب: $d_2 = d_1 = 5\,g/kg_{da}, \varphi_2 = 12\%, I_2 = 130\,kJ/kg_{da}$

13-9

يمتزج $5{,}000\,m^3$ من الهواء الخارجي ذي البارامترات $t_1 = 10°C, \varphi_1 = 80\%, I_1 = 25.6\,kcal/kg_{da}$ (الحالة 1) مع $10{,}000\,m^3$ من هواء ذي البارامترات $t_2 = 25°C, \varphi_2 = 60\%$ (الحالة 2). والمطلوب تحديد بارامترات الخليط تحليلياً وبيانياً بالاستعانة بمخطط (I,d).

الجواب: $d_3 = 11.4\,g/kg_{da}, I_3 = 45.6\,kJ/kg_{da}, \varphi_3 = 78.6\%, t_3 = 19.8°C$

الفصل العاشر

تغير حالة الغاز عند الحركة

- مفاهيم أساسية
- العلاقات الأساسية للغاز المتحرك
- تحديد سرعة الغاز وتدفقه عند حركته
- نسبة الانضغاط الحرجة
- السرعة الحرجة
- عمليات الجريان الحقيقية للغازات والأبخرة
- الخنق
- التأثير التفاضلي للخنق
- منحنى الانقلاب
- مزج الغازات والأبخرة
  - النموذج الأول هو المزج في الحجم الإجمالي
  - النموذج الثاني يسمى المزج عند الحركة
  - النموذج الثالث هو المزج عند التعبئة

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل العاشر

تغير حالة الغاز عند الحركة

مفاهيم أساسية

انتشرت في التقنيات الحديثة وعلى نطاق واسع: الآلات والأجهزة والتجهيزات التي أعمالها الميكانيكية المنجزة مرتبط بتحويل الطاقة الكامنة (طاقة الضغط) للغاز أو البخار إلى طاقة حركية لتيار جسم التشغيل.

تعتمد العمليات الجارية في تلك الأجهزة على أساس استخدام طاقة التيار الحركية التي لها القيمة الأكبر وخاصة ارتباطها بتطور التجهيزات الحديثة كما هو الحال في: مجال الطاقة الحرارية (العنفات البخارية والغازية) – تقنيات الصواريخ والمحركات الصاروخية – الصناعات الكيميائية (الحواقن–منافث الوقود–الحراقات) وتقنيات التبريد.

يمكن تحويل طاقة الغاز (البخار) الساكن إلى عمل مباشرة عند تمدده. تتوزع الحرارة للغاز المتحرك في قناة إلى تسريع التيار وزيادة طاقته التحريكية الخارجية، التي تتحول في المحركات الحرارية إلى عمل ميكانيكي ينقل إلى المستهلك. ينتج العمل الميكانيكي في المحركات: العنفات البخارية والغازية والصاروخية من جراء الطاقة التحريكية الخارجية للغازات أو الأبخرة المتحركة.

من أجل فهم نظرية المحركات الحرارية وتجهيزات أخرى كثيرة كان لابد من دراسة جريان الغازات والأبخرة والذي من أجل ذلك كان هذا البحث.

تحت عنوان مرور (جريان) الغاز يقصد حركة جسم التشغيل (الغاز، البخار، السائل) عبر قناة محددة الشكل. ندعو القنوات ذات المقطع المتغير والتي تتمدد بها الغازات والأبخرة بالفوهات، وتترافق عملية التمدد مع انخفاض في الضغط وازدياد بالسرعة. يجري في الفوهات تحويل الطاقة الكامنة إلى طاقة حركية. إذا جرى في القناة زيادة في ضغط جسم التشغيل وانخفاض سرعة جريانه فإن هذه القناة ندعوها ديفوزر. في الديفوزر تزداد الطاقة الكامنة للغاز من جراء انخفاض طاقته الحركية. يعد الديفوزر

العنصر الأساسي في القاذف، وقد لاقت القواذف استخداما أوسع في آلات التبريد القاذفة للبخار والضواغط التوربينية.

يعتبرون للتبسيط عند دراسة عمليات جريان الغازات بعض الفرضيات:

١- يعدون جسم التشغيل سائل مرونته مثالية، وينعدم فيه الاحتكاك الداخلي (يقصد بسائل مرن أو قابل للانضغاط هي المادة بالحالة الغازية على خلاف عن المائع غير القابل للانضغاط).

٢- تغيب الضياعات اللاعكوسة عند دراسة الجريان.

٣- نعد التيار الغازي مستقرا أي أن سرعة الغاز وبارامترات الحالة له في أي نقطة من المقطع العرضي للتيار لا تتغير مع الزمن.

٤- إن بارامترات حالة الغاز وسرعته يمكن أن تتغير فقط على طول اتجاه التيار .

٥- يتحرك تيار الغاز في القناة بصورة مستمرة (دون انقطاع) وأن كتلة الغاز التي تعبر في أي مقطع عرضي في واحدة الزمن تكون واحدة.

1-10: العلاقات الأساسية للغاز المتحرك

عند دراسة الجريان الأديباتي للغازات تستخدم العلاقات التالية:

١- قانون الترموديناميك الأول للغازات عند الحركة (العلاقة 3-30 من الجزء الأول من الكتاب):

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = i_1 - i_2 \quad \text{أو} \quad -di = c\,dc \tag{1-10}$$

أي يتم تغير الطاقة الحركية لجسم التشغيل من جراء انخفاض الإنتالبي النوعي.

٢- قانون الترموديناميك الأول (العلاقة 3-14 من الجزء الأول من الكتاب). من الصيغتين السابقتين:

$$di = v\,dp \rightarrow c\,dc = -v\,dp \tag{2-10}$$

تشير هذه العلاقة إلى أنه عند جريان جسم التشغيل في قناة فإن dc و di هما من إشارتين مختلفتين:

من العلاقة (10-2)، إذا كان $dp > 0$ (أي أن الغاز ينضغط)، فإن سرعته $(dc < 0)$ تتناقص.

إذا كان $dp < 0$ (أي أن الغاز يتمدد)، فإن سرعته $(dc > 0)$ تتزايد.

كما أسلفنا ندعو القناة التي يجري فيها تمدد للغاز مع انخفاض في الضغط وازدياد في سرعته بالفوهة، على العكس تدعى القناة التي يجري فيها انضغاط للغاز مع ازدياد بالضغط وانخفاض بالسرعة بالديفوزور .

٣- علاقات العملية الأديباتية، وهي علاقات سهلة بالنسبة للغاز المثالي. انظر العلاقات (4-32)، (4-34)، (4-36) من الجزء الأول من الكتاب.

٤- معادلة حالة الغاز ، وهي معادلة كلابيرون بالنسبة للغاز المثالي (المعادلة 15-2 من الجزء الأول من الكتاب).

لندرس العلاقة بين سرعة الجريان والشكل الهندسي للفوهة، من أجل ذلك نأخذ معادلة الاستمرار (أو معادلة عدم الانقطاع)، وبحسب الفرضيات المذكورة أعلاه يمكن أن نكتب بأن كمية جسم التشغيل (الغاز أو البخار) الخارج من فوهة تتحدد في ثانية واحدة من العلاقة:

$$\dot{m} = \frac{A_1 c_1}{v_1} = \frac{A_2 c_2}{v_2} = \ldots = \frac{A c}{v} = const. \qquad (3\text{-}10)$$

حيث $\dot{m}$ التدفق الكتلي للغاز أو البخار $[kg/s]$.

$A_1, A_2, \ldots, A$ مساحة المقاطع العرضية للقناة.

$c_1, c_2, \ldots, c$ سرعات جسم التشغيل في المقاطع المدروسة.

$v_1, v_2, \ldots, v$ الحجوم النوعية لجسم التشغيل في المقاطع المدروسة.

بما أننا اعتبرنا تدفق الكتلي للغاز عند أي مقطع أثناء حركته ثابتا أي $d\dot{m} = 0$ فإن الشكل التفاضلي للعلاقة (3-10) هو :

$$c\,dA + A\,dc = \dot{m}\,dv$$

نقسم الطرفين على $c\,A$:

$$\frac{dA}{A} + \frac{dc}{c} = \frac{\dot{m}}{c\,A}\,dv$$

ولكن:

$$\frac{\dot{m}}{cA}=\frac{1}{v}\ \Rightarrow\ \frac{dA}{A}=\frac{dv}{v}-\frac{dc}{c} \qquad (أ)$$

تمثل المعادلة (أ) شروط استمرار التيار بشكلها التفاضلي، نجد الحد $\frac{dv}{v}$ من المعادلة (4-32) من الجزء الأول، وذلك بعد تفاضلها $\left(k\,pv^{k-1}dv+v^k\,dp=0\right)$ وقسمتها على v^k نجد:

$$\frac{dv}{v}=-\frac{1}{k}\frac{dp}{p} \qquad (ب)$$

بالتبديل في (أ):

$$\frac{dA}{A}=-\frac{1}{k}\frac{dp}{p}-\frac{dc}{c} \qquad (ب)$$

بقسمة العلاقة (10-2) على c^2 نحصل على:

$$\frac{dc}{c}=-\frac{v}{c^2}dp \qquad (ج)$$

بضرب البسط والمقام في الطرف اليميني للعلاقة الأخيرة بـ $k\,p$ نحصل على:

$$\frac{dc}{c}=\frac{k\,pv\,dp}{kc^2\,p} \qquad (ج)$$

وكما هو معلوم من مقرر الفيزياء أن:

$$\sqrt{k\,pv}=a \qquad (4\text{-}10)$$

حيث a سرعة الصوت في وسط بارامتراته p,v.

كما هو واضح من العلاقة (4-10) أن سرعة انتشار الصوت في وسط ما تتعلق ببارامترات الحالة (p,v) وبطبيعة الغاز (أس الأديبات k).

للغازات المثالية: $pv=RT\ \Rightarrow\ a=\sqrt{k\,RT}$

وللحالة الخاصة من أجل الهواء $(k=1.4,\ R=287.1\ J/kgK)$ فإن:

$$a=\sqrt{401.8T}\approx 20\sqrt{T}$$

من العلاقات السابقة نجد أن سرعة الصوت تابعة لدرجة حرارة الغاز T.

نرمز للنسبة $\frac{c}{a}$ بـ M عدد ماخ (وهو عدد لابعدي)، أي: $M = \frac{c}{a}$.

بتعويض (4-10) في (ج) والأخذ بعين الاعتبار العدد اللابعدي M نحصل على:

$$\frac{dp}{p} = -k M^2 \frac{dc}{c} \qquad (5\text{-}10)$$

إذا استبدلنا الحدين $\frac{dv}{v}$ و $\frac{dc}{c}$ في العلاقة (أ) بما يساويان حسب العلاقتين (ب) و (ج) نحصل على:

$$\frac{dA}{A} = -\frac{1}{k}\frac{dp}{p} + \frac{v}{c^2}dp$$

أو:

$$\frac{dA}{A} = \left(-\frac{1}{k\,p} + \frac{v}{c^2}\right)dp$$

$$\frac{dA}{A} = \left(\frac{k\,p v - c^2}{c^2\,k\,p}\right)dp \qquad (6\text{-}10)$$

إذا وضعنا بدلا عن $k\,p\,v$ بما يساويها a^2 في العلاقة (6-10) نحصل على:

$$\frac{dA}{A} = \left(\frac{a^2 - c^2}{c^2\,k\,p}\right)dp \qquad (د)$$

وبدلالة عدد ماخ:

$$\frac{dA}{A} = \frac{dp}{p}\left(\frac{1}{M^2 k} - \frac{1}{k}\right)$$

أو:

$$\frac{dA}{A} = \frac{dp}{p}\left(\frac{1 - M^2}{M^2 k}\right) \qquad (7\text{-}10)$$

$$k M^2 \frac{dA}{A} = \left(M^2 - 1\right)\frac{dp}{p} \qquad (7'\text{-}10)$$

أو بعد استبدال $dp = -c\frac{dc}{v}$ (من العلاقة 10-2) سوف نحصل على:

$$\frac{dA}{A} = \left(M^2 - 1\right)\frac{dc}{c} \qquad (8\text{-}10)$$

كي نوجد العلاقة بين التغيرات النسبية لدرجة الحرارة ومساحة المقطع العرضي للقناة، نفاضل معادلة الحالة (2-15 من الجزء الأول) والتي تأخذ الشكل $\frac{dv}{v}+\frac{dp}{p}=\frac{dT}{T}$ ونستبدل فيها الحد $\frac{dv}{v}$ بما يساويه من معادلة العملية الأديباتية (الجزء الأول) $k\frac{dv}{v}+\frac{dp}{p}=0$، فنحصل على:

$$\frac{dp}{p}=\frac{k}{k-1}\frac{dT}{T}$$

الآن نستبدل قيمة $\frac{dp}{p}$ من العلاقة التي حصلنا عليها في (10-7') فنجد العلاقة المطلوبة:

$$\left(M^2-1\right)\frac{dT}{T}=-M^2(k-1)\frac{dA}{A} \qquad (9\text{-}10)$$

القيم m, v, p, A, c موجبة دوماً، أما العبارة $\left(M^2-1\right)$ فإشارتها تابعة لنوع الجريان:

عند الجريان تحت الصوتي $\left(M<1\Rightarrow\frac{c}{a}<1\Rightarrow c<a\right)$ تكون إشارة التركيب $\left(M^2-1\right)$ سالبة، وعند الجريان فوق الصوتي $\left(M>1\Rightarrow\frac{c}{a}>1\Rightarrow c>a\right)$ تكون إشارته موجبة، أما عند $M=1\Rightarrow c=a$ تكون سرعة الغاز مساوية سرعة الصوت المكانية a ويصبح الفرق مساوياً للصفر.

بما أنه للفوهات $dp<0$ و $dc>0$ وإذا كانت سرعة الجريان أقل من سرعة الصوت $\left(c<a\Rightarrow M<1\Rightarrow M^2-1<0\right)$، فإن الفوهة يجب أن تكون متقاربة بإتجاه جريان الغاز $(dA<0)$.

إذا كانت سرعة الجريان c أكبر من سرعة الصوت $(c>a$ أو $M^2-1>0)$، فإن الفوهة يجب أن تكون متوسعة بإتجاه جريان الغاز $(dA>0)$.

وعليه للجريان فوق الصوتي $\left(M^2-1>0\right)$ وعند تزايد المقطع A (أي عند $dA>0$) يكون:

(أ) $$M > 1 : f \rightarrow c, p, v, T$$

يمكن التعبير عن السطر الأخير (أ) كتابياً: لتأمين الحركة المتسارعة للتيار فوق الصوتي يجب استخدام الفوهة المتوسعة $(M > 1)$.

للحالات الأخرى نجد:

(ب) $$M > 1 : f \rightarrow c, p, v, T \rightarrow M \geq 1$$

(ج) $$M \leq 1 : f \rightarrow c, p, v, T \rightarrow M \leq 1$$

(د) $$M < 1 : f \rightarrow c, p, v, T \rightarrow M < 1$$

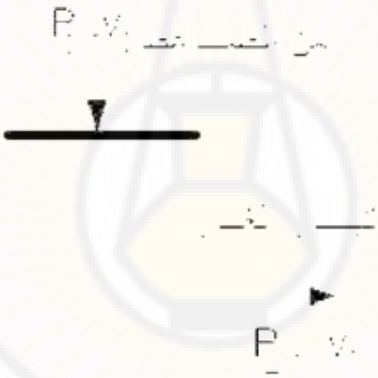
تظهر العبارات (أ) و (ب) و (ج) و (د) أن التغير المستمر للقيم المدروسة (v, p, T, c) يتم بالتأثير الهندسي على التيار المتعاكس حسبما تكون الحركة في المجال تحت الصوتي أو فوق الصوتي، لذا يقال إن هذه العلاقات تعبر عن قانون انعكاس التأثير الهندسي.

تستخدم الفوهة المتضيقة للحركة المتسارعة التي تبدأ من سرعة تحت صوتية ويمكن الحصول من هذه الفوهة على سرعة قصوى مساوية لسرعة الصوت فإذا أردنا متابعة التسريع فإنه يجب الانتقال إلى الفوهة المتوسعة وكذلك الأمر بالنسبة للحركة المتباطئة التي تبدأ من سرعة فوق صوتية في البداية نستخدم الفوهة المتضيقة حتى الوصول إلى سرعة الصوت فإذا أردنا متابعة البطء فإنه يجب الانتقال إلى الفوهة المتوسعة مما تقدم ينتج أنه لتجاوز سرعة الصوت يجب استخدام الفوهة المتضيقة المتوسعة كما أن السرعة في المقطع الأصغري للفوهة ستكون مساوية لسرعة الصوت. عندها يسمى المقطع الأصغري بالمقطع الحرج كما تكون بارامترات الغاز في هذا المقطع (البارامترات الموافقة لسرعة الصوت) حرجة.

2-10: تحديد سرعة الغاز وتدفقه عند حركته

بفرض لدينا خزان أبعاده كبيرة، يوجد بداخله جسم تشغيل (غاز أو بخار) بارامتراته البدائية (p_1, ρ_1, v_1) تبقى ثابتة مع مرور الزمن، ومزود بفتحة موصولة بفوهة لإحداث الحركة المتسارعة. ينطلق الغاز عبر الفوهة الموجودة في جداره إلى الوسط المحيط الذي ضغطه p_2 أقل من ضغط الغاز وذلك من جراء فرق الضغط $p_1 - p_2$ الشكل (10-1).

بفرض بارامترات الغاز للوسط المحيط T_2, v_2 ومساحة مقطع الخروج للفوهة A والسرعة عندها c_2 أما السرعة البدائية فنرمز لها بـ c_1. (عادة تكون السرعة البدائية ضئيلة مقارنة مع c_2 وهي تتزايد باستمرار داخل الفوهة حتى تصبح أعظمية عند مخرجها). لهذا عند إجراء الحسابات العملية يمكن إهمال c_1 مقارنة مع c_2 واعتبارها مساوية للصفر $(c_1 = 0)$، وعندها يمكن الرمز لسرعة الغاز عند المخرج من الفوهة بـ c. تم التوصل إلى أنه من أجل تسريع التيار (على سبيل المثال في المحركات والآلات الحرارية) نحتاج إلى أقنية قصيرة. هذا يعني أن فترة مكوث جسم التشغيل في تلك الأقنية ضئيلة وذلك نتيجة لسرعة التيار الكبيرة. لهذا فإن الفترة القصيرة لوجود جسم التشغيل ضمن القناة لا تسمح له بالتبادل الحراري بينه وبين جدران القناة، لهذا فإن عملية جريان الغاز عبر الفوهة يمكن أن نعتبرها أديباتية.



الشكل (10-1): خروج الغاز من فتحة موجودة في جدار

بحسب قانون الترموديناميك الأول عند الحركة (10-1) نكتب:

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = i_1 - i_2 = -\int_{p_1}^{p_2} v\,dp = \int_{p_2}^{p_1} v\,dp$$

حيث c_1, c_2, i_1, i_2 سرعة (c) وإنتالبي (i) الغاز (أو البخار) في بداية عملية التمدد ونهايتها.

ينتج من العلاقة السابقة:

$$c_2 = \sqrt{2(i_1 - i_2) + c_1^2}$$

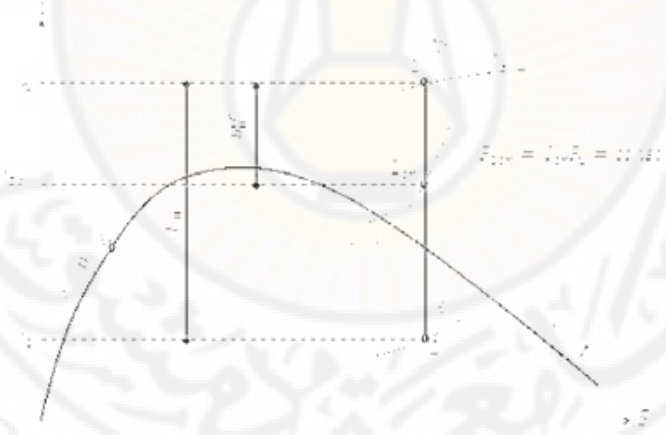
وكما ذكرنا أعلاه بأن قيمة السرعة c_1 أصغر بكثير من c_2 وبالتالي يمكن إهمالها وتكتب العلاقة الأخيرة بالشكل:

$$\frac{c_2^2}{2} = i_1 - i_2 = k(u_1 - u_2) = k\,w_{1,2} \qquad (10\text{-}10)$$

كما نلاحظ من العلاقة (10-10) أن الطاقة الحركية للغاز المتحرك عبر فوهة أكبر من عمل تمدده $w_{1,2}$ (العمل الناتج عن تغير الحجم والذي وجدناه سابقا في الجزء الأول – الفصل الثالث بيانياً يساوي للمساحة المحصورة بين منحني العملية ومحور الحجم النوعي) لأن عامل الأديبات $(k > 1)$ بالنسبة لجميع الغازات.

يرمز للفرق $i_1 - i_2$ بـ h_a وندعوه بالهبوط الحراري المتاح، والذي يمثل على مخطط (i,s) لبخار الماء بطول القطعة $\overline{i_1 - i_2}$، انظر الشكل (10-2). بالعودة للعلاقة (10-10) نحصل على قيمة السرعة:

$$c_2 = c = \sqrt{2(i_1 - i_2)} \qquad (11\text{-}10)$$



الشكل (10-2): تمثيل جريان بخار الماء على مخطط (i,s)

$$c = \sqrt{2\,h_a}$$

حيث i يقدر بـ $[J/kg]$ والسرعة c بـ $[m/s]$.

أما إذا قدر i بـ $[kJ/kg]$ عندها تأخذ العلاقة (11-10) الشكل:

$$c = \sqrt{2\times10^3(i_1 - i_2)} = 44.72\sqrt{i_1 - i_2}$$

وإذا قدر i بـ $[kcal/kg]$ تكتب العلاقة (10-11) بالشكل:

$$c = 91.53\sqrt{i_1 - i_2}$$

من أجل الغازات المثالية يمكن التعبير عن سرعة خروجها c_2 بدلالة البارامترات البدائية p_1, v_1 وضغط الوسط p_2 الذي ينساب إليه الغاز المثالي (وذلك على اعتبار عملية التمدد الجارية على الغاز أديبانية: $k = const.,\ pv^k = const.$):

$$c = \sqrt{2c_p(T_1 - T_2)} = \sqrt{2\frac{k}{k-1}p_1 v_1\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \qquad (12\text{-}10)$$

ولكن $p_1 v_1 = RT_1$:

$$c = \sqrt{2\frac{k}{k-1}RT_1\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \qquad (12'\text{-}10)$$

حيث p_1, p_2 الضغط في بداية ونهاية عملية التمدد الأديباتي في الفوهة مقدراً بـ $[N/m^2]$.

عند عبور الغاز إلى الخلاء $(p_2 = 0)$، فإن سرعة عبوره سوف تكون أعظمية وتتحدد بالعلاقة:

$$c_{max} = \sqrt{\frac{2k\,p_1 v_1}{k-1}}$$

نجد من العلاقة (10-12') أن سرعة جريان الغاز المثالي c تزداد مع ازدياد درجة حرارته البدائية T_1. عند نفس شروط جريان الغازات المختلفة فإن c تكون قيمتها أعلى من أجل الغازات الأخف (بقيم أكبر للثابت المميز للغاز R).

يمكن أن نحدد سرعة جريان بخار الماء من العلاقة (10-12) إذا اعتبرنا أن:

$k = 1.3$ من أجل بخار الماء المحمص.

$k = 1.135$ من أجل بخار الماء المشبع الجاف.

باستبدال كل من c و $2v$ الداخلتين في العلاقة (3-10) بما يساويهما من العلاقتين (10-12) وعلاقة الضغط بالحجم في العملية الأديباتية (المعادلة 4-32 من الجزء الأول من الكتاب):

$$p_2 v_2^k = p_1 v_1^k \Rightarrow v_2 = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}} v_1$$

نحصل على علاقة لحساب تدفق الغاز :

$$\dot{m} = A \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1 v_1}{\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{2}{k}} v_1^2} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}$$

أو :

$$\dot{m} = A \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{p_2} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} \qquad (13\text{-}10)$$

يتحدد تدفق بخار الماء عبر فوهة باستخدام العلاقة (3-10)، بعد حساب c من العلاقة (11-10) أما v_2 فيتم تحديدها بواسطة مخطط (i,s). انظر الشكل (2-10).

واضح من العلاقتين (10-12) و(10-13) أن c و $\dot{m}$ تتعلقان بالنسبة $\frac{p_2}{p_1}$

ويمكن بوضوح التحقق أنه عند $\frac{p_2}{p_1} = 1 \Leftarrow p_2 = p_1$ فإن $c = 0$ و $\dot{m} = 0$، أي لن يكون هناك جريان إذا تساوى $p_1 = p_2$. عند انخفاض الضغط p_2 مع بقاء p_1 ثابت هذا يعني أن انخفاض $\frac{p_2}{p_1}$ يؤدي إلى ازدياد سرعة وتدفق الغاز.

يظهر على الشكل (3-10) تغيرات حالة الغاز أثناء الجريان على مخطط (p,v) والتي يمثلها المنحنى (1←2). تظهر المساحة العنصرية (8-7-6-5) قيمة العمل العنصري الناتج عن تغير الضغط $(-vdp)$ بيانيا، قيمته الكلية على كامل مسار العملية (1←2) تمثله المساحة (4-3-2-1) ، هذا يعني أن المساحة (4-3-2-1) المحصورة بين

منحني عملية التمدد مع محور الضغط والترتيبين المتطرفين تقيس لنا (عند الجريان الأديباتي) الطاقة الحركية لتيار الغاز الخارج $\frac{c^2}{2}$.



الشكل (10-3): تغيرات حالة الغاز أثناء الجريان الاديباتي على مخطط (p،v) والذي يمثلها المنحنى 1-2

10-3: نسبة الانضغاط الحرجة

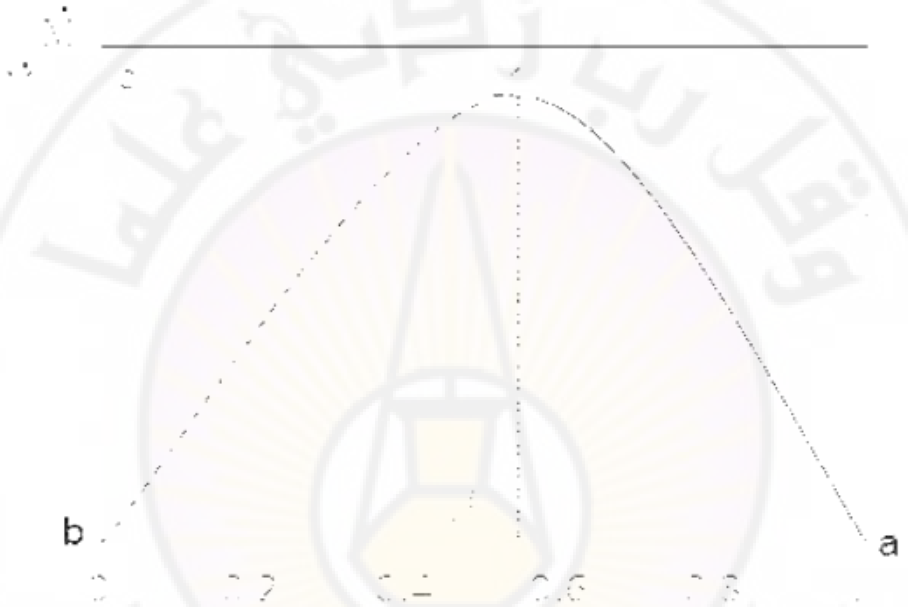
يشير تحليل معادلة التدفق الكتلي (10-13) إلى أنه:

١- عند مساواة الضغط عند المدخل والمخرج من الفوهة ($p_1 = p_2$) فإن $\beta = \frac{p_2}{p_1} = 1$، وعندها $m = 0$ أي لا يتم جريان الغاز، النقطة a من الشكلك (10-4)، وذلك على إحداثيات التدفق m مع نسبة الانضغاط β.

٢- عند جريان الغاز إلى الخلاء ($p_2 = 0$) فإن $\beta = \frac{p_2}{p_1} = 0$ وعندها التدفق الكتلي كما في الحالة الأولى يكون مساوي للصفر ($m = 0$) (النقطة b).

٣- عند تغير نسبة الضغط β من الـ (1) وحتى قيمة $\beta \approx 0.5$ فإن تدفق الغاز يتزايد (المنحني a-k) ويصل إلى قيمة أعظمية في النقطة (k). مع استمرار انخفاض نسبة الانضغاط $\frac{p_2}{p_1}$ (عن طريق انخفاض ضغط الوسط الخارجي) سوف يهبط التدفق الكتلي حتى الـ (0) (النقطة b).

الضغط p_2 على المخرج من الفوهة الموافق للتدفق الأعظمي للغاز ندعوه بالضغط الحرج، والنسبة $\frac{p_{2cr}}{p_1}$ تحمل تسمية النسبة الحرجة للضغط ونرمز لها بالرمز β_{cr}، إن بقية بارامترات الغاز الموافقة للتدفق الأعظمي (T_{cr}, i_{cr}, c_{cr}... وغيرها) ندعوها بالبارامترات الحرجة.



الشكل (10-4): $\dot{m} = f\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$ ، علاقة التدفق الكتلي للغاز بنسبة الانضغاط

كما رأينا أعلاه، فإن التدفق الكتلي للغاز $\dot{m}$ المحسوب بالعلاقة (10-13) يتعلق بنسبة الضغط $\frac{p_2}{p_1}$. لنقم بتحديد نسبة الضغوط التي تجعل تدفق الغاز $\dot{m}$ أعظميا والتي رمزنا لها بـ β_{cr} . من أجل هذه الغاية سوف نعتبر بارامترات الغاز عند المدخل إلى القناة (p_1, v_1) ثابتة، عندها نلاحظ من العلاقة (10-13) أن القيمة المتغيرة لـ p_2 تدخل فقط ضمن القوسين الموجودين تحت إشارة الجذر . تتحدد هذه النسبة الحرجة وفق التسلسل التالي: نأخذ بداية المشتق الأول للعبارة الموجودة بين القوسين في المعادلة (10-13)، ومن ثم نعدمه:

$$\frac{d}{dp}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}}-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]=\frac{2}{k}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}-1}-\frac{k+1}{k}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}-1}$$

$$\frac{d}{dp}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}}-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]=\frac{2}{k}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2-k}{k}}-\frac{k+1}{k}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}}=0 \Rightarrow$$

$$\frac{2}{k}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2-k}{k}}-\frac{k+1}{k}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}} \tag{14-10}$$

وبالتالي:

$$\beta_{cr}=\frac{p_{2cr}}{p_1}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{15-10}$$

إذاً، تتحدد قيمة β_{cr} التي تجعل تدفق الغاز أعظمياً وفق العلاقة (15-10). إن نسبة الانضغاط الحرج β_{cr} تتعلق فقط بطبيعة الغاز أو البخار الذي يعبر بالفوهة وذلك لأنها تتعلق بـ k والتي لها قيم مختلفة بحسب نوع جسم التشغيل. على سبيل المثال من أجل الغازات ثنائية الذرة $(k=1.4)$ فإن $\beta_{cr}=0.528$ ، ولبخار الماء المحمص $(k=1.3)$ فإن $\beta_{cr}=0.546$.

باستبدال قيمة β_{cr} في العلاقة (13-10) سوف نجد التدفق الأعظمي للغاز:

$$\dot{m}_{max}=A\sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_1}{v_1}\left\{\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}\right]^{\frac{2}{k}}-\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}\right]^{\frac{k+1}{k}}\right\}}$$

$$=A\sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_1}{v_1}\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}-\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}\right]}$$

$$=A\sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_1}{v_1}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}\left[1-\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k-1}{k-1}\frac{k+1}{2}}\right]}$$

$$\dot{m}_{max} = A\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\sqrt{\frac{2k}{k-1}\,p_1 v_1\left(1-\frac{2}{k+1}\right)} \qquad (16\text{-}10)$$

$$\dot{m}_{max} = A\psi\sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \qquad (17\text{-}10)$$

حيث:

$$\psi = \sqrt{2\,\frac{k}{k+1}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}} \qquad (18\text{-}10)$$

كما نلاحظ أن ψ تتعلق بطبيعة الغاز أي بحسب قيمة k. من أجل الغازات ثنائية الذرة $(k=1.4)$: $\psi = 0.68$ (k=1.4)، للبخار المحمص $(k=1.3)$: $\psi = 0.665$.

بالعودة إلى الشكل (4-10) والمبين فيه علاقة تغير $\dot{m}$ بدلالة $\frac{p_2}{p_1}$، أي $\dot{m} = f\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$، وبالتوافق مع المعادلة (13-10) سوف يبدو هذا المنحني له الشكل (a-k-b)، لكن في الواقع فإن تدفق الغاز يتغير وفق الجزء (a-k-c). الفرع (k-b) من المنحني والمبين بشكل خط متقطع لا يتحقق. يمكن تفسير ذلك أنه في الشروط الواقعية (وفق نتائج القياس) لا يمكن لضغط الغاز عند المخرج من الفوهة أن يصبح أقل من الضغط الحرج.

4-10: السرعة الحرجة

نحصل على المعادلة التي تسمح لنا بتحديد السرعة الحرجة لجريان الغاز c_{cr} بعد استبدال $\frac{p_2}{p_1}$ بـ β_{cr} (العلاقة 10-15) في العلاقة (10-12) أي:

$$c_{cr} = \sqrt{2\frac{k}{k-1}p_1 v_1\left[1-\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}\cdot\frac{k+1}{k}}\right]}$$

$$= \sqrt{2\frac{k}{k-1}p_1 v_1\left(1-\frac{2}{k+1}\right)}$$

$$= \sqrt{2\frac{k}{k-1}p_1 v_1\frac{k-1}{k+1}} = \sqrt{2\frac{k}{k+1}p_1 v_1}$$

$$c_{cr} = \sqrt{2\frac{k}{k+1}RT_1} \qquad (19\text{-}10)$$

تسمح العلاقة (19-10) بتحديد السرعة الحرجة للجريان وفق البارامترات المعطاة للغاز عند الدخول إلى الفوهة p_1, v_1 أو p_1, T_1 وكذلك تتعلق بأس الأديبات k. في الحالة الخاصة من أجل الغازات الثنائية الذرة: $c_{cr} = 1.08\sqrt{p_1 v_1}$ أو $c_{cr} = 1.08\sqrt{RT_1}$. أي أن c_{cr} تزداد مع ازدياد درجة الحرارة البدائية وهي تختلف باختلاف الغازات، على سبيل المثال من أجل الهواء عند $t = 200°C$ فإن:

$$c_{cr} = 1.08\sqrt{\frac{8314\times 473}{28.95}} = 398\,m/s$$

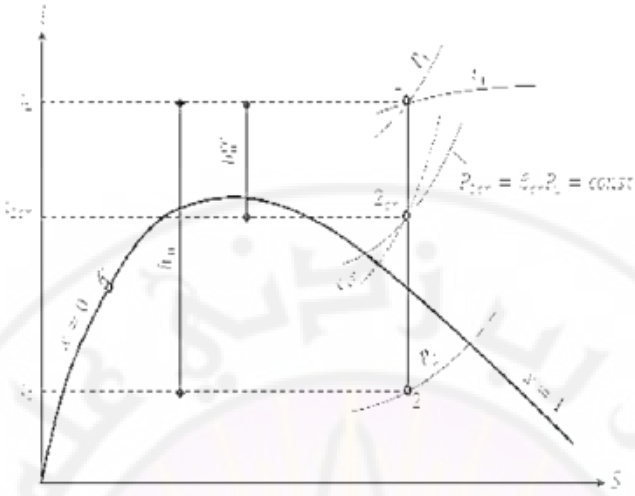
أما عند $1{,}000°C$:

$$c_{cr} = 650\,m/s$$

في جميع العلاقات السابقة واحدة قياس p هي $[N/m^2]$، والسرعة بـ $[m/s]$ والحجم النوعي بـ $[m^3/kg]$

بالنسبة لبخار الماء فإنه يمكن تحديد c_{cr} بمساعدة مخطط (i,s) وذلك إذا بدلنا i_2 في العلاقة (10-11) بـ i_{cr} والتي تحدد من مخطط (i,s) على أنها تنتج من تقاطع الأديبات مع الضغط الحرج p_{2cr} (الشكل 10-5)، أي:

$$c_{cr} = \sqrt{2(i_1 - i_{2cr})} \qquad (19'\text{-}10)$$



الشكل (10-5): تحديد c_{cr} لبخار الماء بمساعدة مخطط (i,s)

مثال 10-1

يخرج أوكسجين موجود في خزان عند ضغط ثابت $p = 50 bar$ عبر فوهة إلى الوسط الخارجي الذي ضغطه $p_2 = 40 bar$. أوجد سرعة جريان الأوكسجين وتدفقه الكتلي، إذا علمت أن مقطع الخروج للفوهة $A = 20\,mm^2$ ودرجة الحرارة البدائية للأوكسجين $t_1 = 100°C$. افترض السرعة البدائية $c_1 = 0$.

الحل

بما أن $\frac{p_2}{p_1} = \frac{50}{40} = 0.8 > \beta_{cr} = 0.528$ فإن نظام الجريان تحت الحرج لهذا من أجل إيجاد سرعة الجريان c والتدفق الكتلي للغاز نستخدم العلاقتين: (10-12') و (10-13).

بداية نقوم بحساب الحجم النوعي البدائي v_1 للأوكسجين وذلك من معادلة الحالة:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{259.8 \times 373}{5 \times 10^6} \approx 0.019 m^3/kg$$

سرعة الخروج:

$$c_2 = \sqrt{2\frac{k}{k-1}p_1 v_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}$$

$$= \sqrt{2\frac{1.4}{1.4-1}\left(5\times 0.02\times 10^{6}\right)\left[1-(0.8)^{\frac{1.4-1}{1.4}}\right]} = 212\,m/s$$

التدفق الكتلي:

$$\dot{m} = A\sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_1}{v_1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}}-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} = 0.18\,kg/s$$

مثال 10-2

أعد حل المثال 10-1 للشروط نفسها الواردة فيه من حيث تحديد سرعة الجريان والتدفق الكتلي وضغط الأوكسجين عند جريانه عبر فوهة متضيقة إلى الوسط المحيط $p_b = 1\,bar$.

الحل:

لهذه الشروط فإن $\frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{50} = 0.02 < \beta_{cr} = 0.528$ ، إذا نظام الجريان حرج وسرعة الجريان حرجة وتدفق الغاز يكون أعظمياً. وبالتالي لتحديدهما نستخدم العلاقتين (17-10) و (19-10):

$$c_{cr} = 1.08\sqrt{RT_1} = 1.08\sqrt{259.8\times 373} = 334\,m/s$$

$$\dot{m}_{max} = \psi A_2\sqrt{\frac{p_1}{v_1}} = \psi A_2\frac{p_1}{\sqrt{RT_1}}$$

$$= 0.685\times 20\times 10^{-4}\times 5\times 10^{6}\sqrt{259.8\times 373} = 0.222\,kg/s$$

الضغط النهائي: $p_2 = p_{cr} = \beta_{cr}\,p_1$

$$p_2 = 0.528\times 50 = 26.4\,bar$$

مثال 10-3

يخرج بخار ماء بارامتراته البدائية $p_1 = 20\,bar$ و $t_1 = 350°C$ عبر فوهة متضيقة إلى وسط ضغطه $p_2 = 2\,bar$. أوجد سرعة خروجه.

الحل

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2}{20} = 0.1 < \beta_{cr} = 0.546$$

ولهذا لن يحصل تمدد كامل للبخار نتيجة جريانه، نظام الجريان حرج وفي عنق الفوهة يكون الضغط حرجاً:

$$p_{cr} = \beta_{cr}\, p_1 = 0.546 \times 20 \cong 10.9\,bar$$
$$h_n = (i_1 - i_{2cr})_{ds=0} = 160\,kJ/kg$$

حيث تم تحديد قيم الأنتالبي للبخار بمساعدة مخطط (i,s).

سرعة جريان البخار تساوي السرعة الحرجة ونحصل عليها من العلاقة (10-19'):

$$c_2 = c_{cr} = \sqrt{2 h_n} = \sqrt{2 \times 160 \times 10^3} \approx 567\,m/s$$

مثال 10-4

يخرج بخار ماء مشبع رطب ضغطه البدائي $p_1 = 20\,bar$ وكسر جفافه $\chi_1 = 0.9$ ، عبر فوهة متقاربة بمقطع خروج $A = 20\,mm^2$ إلى وسط ضغطه $p = 15\,bar$. أوجد سرعة جريان البخار وتدفقه الكتلي.

الحل

نحسب بداية أس الأديبات لهذا البخار المشبع الرطب:

$$k = 1.035 + 0.1\,\chi_1 = 1.125$$

نقوم بحساب β_{cr} لهذه القيمة لـ k : $\beta_{cr} = 0.5797$

$$\frac{p}{p_1} = \frac{15}{20} = 0.75 > 0.5797$$

وبالتالي يجري تمدد كلي للبخار حتى الضغط $p_2 = 15bar$. نوجد من مخطط (i,s) لبخار الماء الهبوط الحراري المتاح $(p_1 = 20bar, \chi_1 = 0.9, p_2 = 15bar)$ ومن ثم نحدد:

$$c_2 = \sqrt{2h_d} = \sqrt{2 \times 44 \times 10^3} = 291 m/s$$

نجد التدفق الكتلي من المعادلة:

$$\dot{m} = \frac{A_2 c_2}{v_2} = \frac{20 \times 10^{-6} \times 291}{0.1165} = 0.051 kg/s$$

5-10: عمليات الجريان الحقيقية للغازات والأبخرة

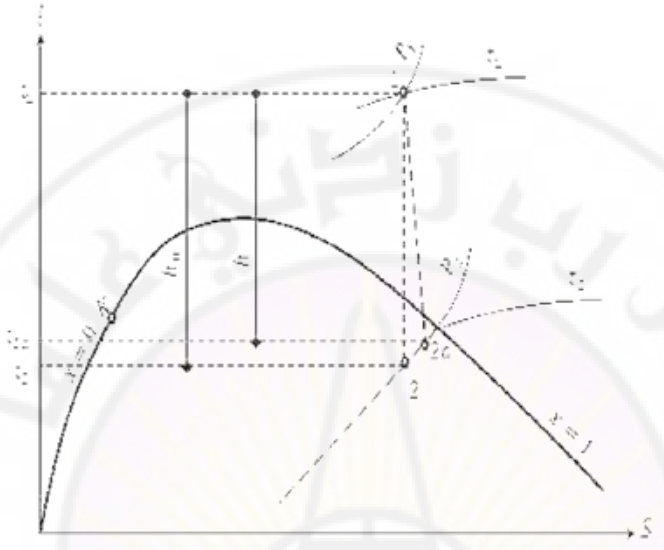
يترافق جريان الغاز أو البخار ضمن الأقنية في الشروط الواقعية بضياع جزء من طاقته للتغلب على الاحتكاك، المرتبط بلزوجة الغاز أو البخار وبخشونة جدران القناة و ..... غير أن التبادل الحراري يهمل مع الوسط الخارجي كما أشرنا عليه سابقا. لهذا فإن عملية الجريان تستمر بصورة أديباتية، غير أنها ليست عكوسة لأنه بنتيجة طرح حرارة الاحتكاك q_{fr} فإن إنتروبي التيار يتزايد $\left(ds = \frac{dq_{fr}}{T}\right)$ وترتفع درجة حرارته ولهذا السبب فإن النقطة (2a) الواصفة لنهاية العملية الحقيقية للجريان سوف تتوضع على مخطط (i,s) على يمين وأعلى من النقطة (2) وذلك عند هبوط الضغط نفسه $(p_1 - p_2)$. منحني العملية (1←2a) هو شرطي لعملية التمدد اللاعكوسة، الشكل (6-10).

إن العلاقة (10-1) صالحة للجريان مع احتكاك أو من دون احتكاك:

- بدون احتكاك: $i_2 + \frac{c_2^2}{2} = i_1 + \frac{c_1^2}{2}$
- مع احتكاك: $i_{2a} + \frac{c_{2a}^2}{2} = i_1 + \frac{c_1^2}{2}$

من هنا نجد أن $c_2 > c_{2a}$ أو $i_{2a} > i_2$، في حين أن الطرفين اليمنيين يبقيان نفسهما من دون تغير. نسبة السرعة الحقيقية c_{2a} إلى النظرية c_2 ندعوها بمعامل

السرعة والذي نرمز له بـ φ . هذا المعامل مختلف من أجل فوهات مختلفة وتتحدد قيمته تجريبيا. تبلغ قيمته لفوهات العنفات الحديثة $0.98 - 0.93$.



الشكل (10-6): عملية التمدد الحقيقية لبخار الماء على مخطط (i,s)

ضياع الطاقة الحركية عند الجريان مع احتكاك عدديا يساوي:

$$\frac{\Delta c^2}{2} = \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_{2a}^2}{2} = \frac{c_2^2}{2}\left(1 - \varphi^2\right) = \zeta\frac{c_2^2}{2}$$

حيث $\zeta = 1 - \varphi^2$ تصف ضياع العمل عند الجريان بسبب تأثير قوى الاحتكاك وندعوه معامل الطاقة.

بهذه الصورة تكون سرعة الجريان الفعلية:

$$c_{2a} = \varphi c_2 = \varphi\sqrt{2h_a} \qquad (20\text{-}10)$$

أو:

$$c_{2a} = \sqrt{2\varphi^2 h_a} = \sqrt{2h}$$

من هنا نجد أن:

$$\frac{h}{h_a} = \varphi^2 = \eta_c \qquad (21\text{-}10)$$

حيث η_c نسبة هبوط الحرارة الفعلي h إلى النظري h_a .

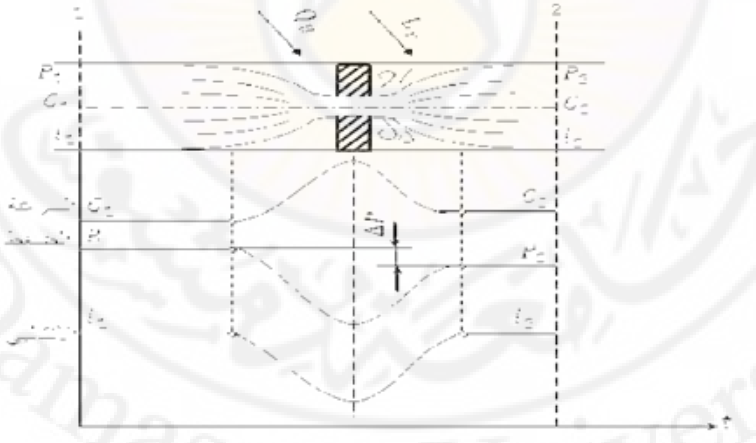
تشير المعادلة (10-21) أن η للفوهة عددياً تساوي إلى مربع معامل السرعة.

6-10: الخنق

إذا قابل مرور الغازات أو الأبخرة في الأنابيب أي تضيق في مقطع الجريان فإنه و بسبب هذه المقاومة الناشئة عن هذا التضيق، فإن الضغط خلف مكان التضيق p_2 باتجاه التيار دوما يكون أقل من الضغط p_1 ، الشكل (10-7). هذه الظاهرة التي ينتقل خلالها الغاز أو البخار من الضغط العالي إلى ضغط منخفض دون إنجاز عمل خارجي ودون إعطاء أو فقد حرارة تسمى الخنق الاديباتي.

إن وجود أي مقاومة هيدروليكية موضعية (مكانية) كأن يمر الغاز أو البخار في فتحة موضوعة داخل أنبوب شكل (10-8)، أو عبر حاجز منزلق شكل (10-9)، أو عبر كوع يغير اتجاه حركته شكل (10-10)، أو عبر صمام أو صنبور (بفتحة كلية أو جزئية) وهلم جرا، يعمل على خنق للغاز أو البخار وبالتالي هبوط بالضغط.

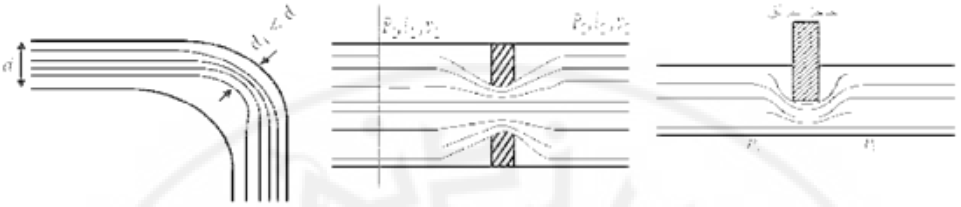
في جميع الحالات السابقة تتقارب خطوط التيار في المقاومة الهيدروليكية ثم تتباعد ليتنظم سيرها من جديد.



الشكل (10-7): تغير باراسترات جسم التشغيل خلال عملية الخنق

يتم أحيانا إقحام الخنق في دورة عمل هذه الالة أو تلك. على سبيل المثال: نتحكم باستطاعة العنفة البخارية عن طريق خنق البخار قبل الدخول إليها، الأمر نفسه نستخدمه

عندما نريد التحكم باستطاعة محركات الاحتراق الداخلي العاملة على البنزين حيث نغير من فتحة الخانق بالمفحم.



الشكل (10-8) الشكل (10-9) الشكل (10-10)

أنواع المقاومات الهيدروليكية المكانية

في حين تعد عملية الخنق الجارية في صمام الخنق أساسية في دورات آلات التبريد الضاغطة البخارية وذلك من أجل الحصول على درجات حرارة منخفضة لجسم التشغيل، وكذلك تستخدم هذه الظاهرة في مجال التبريد العميق من أجل تمييع الغازات عن طريق خنقها عدة مرات.

إن التفسير الفيزيائي لهبوط الضغط لجسم التشغيل خلف المقاومة المكانية يعود إلى صرف جزء من طاقة التيار للتغلب على هذه المقاومة، كما تشير أيضا دراسة عملية الخنق إلى أنه عند عبور التيار خلال الجزء المتضيق فإن سرعته تتزايد في أضيق مقطع (مقارنة مع المقطع العرضي للأنبوب) وهذا يعني أن طاقته الحركية تزداد في هذا المقطع، الأمر الذي يترافق مع هبوط في الضغط. خلف الخانق يعود التيار يتحرك على كامل مقطع الأنبوب وتتناقص سرعته ويزداد ضغطه من جديد ولكنه لا يعود إلى قيمته البدائية قبل الخانق ($p_1 > p_2$)، ويعود ذلك إلى أن جزءا من طاقة التيار الحركية يفقدها دون التمكن من استرجاعها لأنها صرفت على تشكل الأعاصير وللتغلب على الاحتكاك في الخانق. إن عمل التمدد من p_1 حتى p_2 الذي ينجزه الغاز لا ينقل إلى الخارج، نتيجة لذلك يسمى الخنق التمدد دون إنجاز عمل خارجي، ويتحول عمل التمدد جزئيا إلى حرارة يمتصها الغاز ، أما الباقي فيصرف على تغير طاقة الغاز الحركية.

(إن وجود الاحتكاك يجعل هذه العملية لاعكوسة فالحرارة الناتجة عن الاحتكاك يكتسبها التيار وبالتالي يزداد إنتروبي جسم التشغيل خلال هذه العملية).

لندرس القوانين الناظمة التي تحكم على عملية الخنق، من أجل ذلك ندرس المثال التالي: جريان تيار عبر قناة بمقطع لا على التعيين الشكل (10-7) موضوع بداخلها حاجز مزود بثقب ضيق ونختار على هذه القناة مقطعين (I) و (II) بعيدين عن موقع الحاجز حيث تبقى بارامترات التيار فيهما ثابتة مع الزمن، وذلك في حالة الجريان الأديباتي $dq = 0$ ومن دون إنجاز عمل خارجي، عندها يمكن استخدام العلاقة (3-28) من الجزء الأول:

$$i_1 + \frac{c_1^2}{2} + g z_1 = i_2 + \frac{c_2^2}{2} + g z_2$$

حيث c_1, c_2 سرعة التيار في المقطع (I) و (II) على التوالي.

i_1, i_2 إنتالبي الغاز أو البخار في المقطعين (I) و (II) على التوالي

يلاحظ عند خنق الغازات مع ثبات مقطع الأنبوب ازدياد سرعة تيار الغاز خلف الخانق ($c_2 > c_1$) وهذا مرتبط بانخفاض الضغط ($p_2 < p_1$)، الأمر الذي يؤدي إلى ازدياد الحجم النوعي للغاز ($v_2 > v_1$).

في حالة خنق السوائل المشبعة (كما هو الحال في الدورات الحرارية لآلات التبريد الضاغطة البخارية) فإن ازدياد السرعة مرتبط بتشكل البخار الذي يرافق عملية الخنق (انظر الفقرة 13-2-4).

عند شرط $z_1 = z_2$ يمكن أن نكتب العلاقة الأخيرة بالشكل:

$$i_2 - i_1 = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} \qquad (22\text{-}10)$$

إن مقدار تغير سرعة جسم التشغيل قبل المقاومة الهيدروليكية وبعدها بمسافة كافية عملياً ليس كبيراً ($c_1 \cong c_2$) (إن سرعات جريان الغاز c_1, c_2 في المقاطع (I) و (II) صغيرة: $4 - 10\ m/s$) وبالتالي عند الخنق يمكن كتابة:

$$i_2 - i_1 \qquad (23\text{-}10)$$

أي أن إنتالبي البخار قبل عملية الخنق الاديباتي وبعدها ودون إنجاز عمل خارجي يكون واحداً.

وهكذا فإن حالة الغاز أو البخار بعد الخنق تتحدد ببارامترين الأول هو الضغط p_2 ويكون معطى عادة والانتالبي $i_2 = i_1$.

هذه النتيجة الهامة تبقى صحيحة من أجل الغازات الحقيقية والأبخرة وللسوائل طالما أنه تم الوصول إليها من معادلة قانون الترموديناميك الأول عند الحركة.

غير أنه من غير المقبول القول إن عملية الخنق هي عملية ايزوانتالبية، فعند عبور التيار عبر فتحة الخنق يتغير الإنتالبي، لأنه تجري عمليات غير مستقرة لازدياد أو انخفاض سرعة التيار التي تؤثر بالتالي في تغيير الطاقة الحركية والتي بدورها عند عملية الخنق الاديباتية تقود إلى تغيير الإنتالبي. مجرد انتهاء عملية الخنق بالكامل يأخذ الإنتالبي قيمته البدائية. **من أجل هذا يمثلون عملية الخنق في المخططات بخطوط متقطعة.**

من أجل الغازات المثالية وعلى اعتبار أن الحرارة النوعية لها لا تتعلق بالضغط لذا فإن الإنتالبي لها يتعلق فقط بدرجة الحرارة $\left(di = c_p\, dT\right)$، ولا يتعلق بالضغط أيضا. عندها بالأخذ بعين الاعتبار العلاقة (10-23) نجد:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{i_2 - i_1}{c_p} = 0 \;\Rightarrow\; T_1 = T_2 \qquad (23'\text{-}10)$$

أي أن درجة الحرارة للغاز المثالي بعد الخنق تبقى مساوية لدرجة الحرارة قبل الخنق

تمثل عملية الخنق للغاز المثالي على مخطط (T,s) بالمستقيم (1←2) المبين على الشكل (10-11) وكما نلاحظ مثلنا عملية الخنق بخط متقطع.

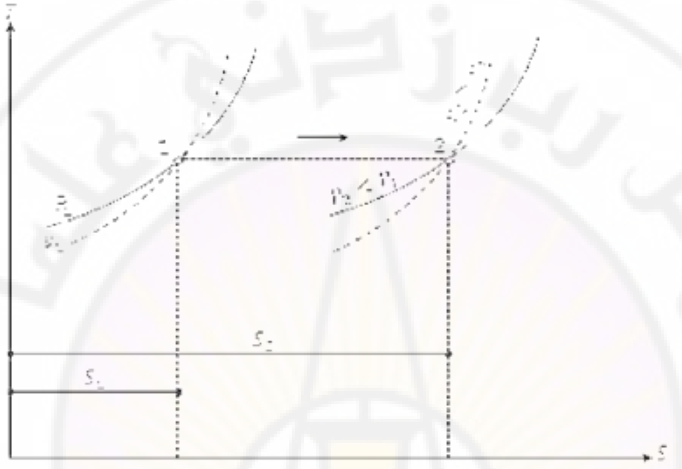
يتم إيجاد النقطة الواصفة لحالة البخار النهائية (بعد الخنق) على مخطط (i,s) بمقاطعة الإيزوبار p_2 مع خط ثبوت الأنتالبي i_1. انظر الشكل (10-12).

عادة تمثل عملية الخنق عبر اختناق وحيد بمجموع عمليتين:

- الأولى عملية تمدد أديباتي حقيقي يوافق الخط (1←3'). انظر الشكل (10-13) (خلال هذه العملية ينقص الضغط والإنتالبي وتزداد سرعة الغاز).

- تليها عملية تسخين إيزوبارية وفق الإيزوبار (2←3') حيث تتناقص سرعة الغاز وتتحول طاقته الحركية إلى طاقة حرارية يمتصها الغاز حيث يعود إنتالبي البخار إلى قيمته البدائية.

هنا تمثل النقطة (3') حالة الغاز في الاختناق بالذات.



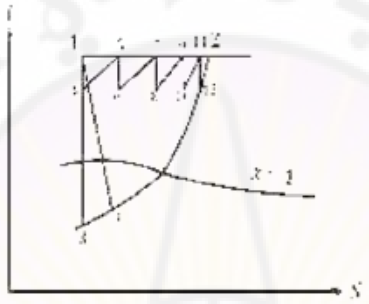
الشكل (10-11): تمثيل عملية خنق الغازات المثالية على مخطط (T,s)



الشكل (10-12): تمثيل عملية الخنق على مخطط (i,s)

إذا تعددت الاختناقات فإن عملية الخنق تمثل بمجموعة متتالية من أزواج العمليات (أديباتية – إيزوبارية...) عددها يساوي لعدد الاختناقات.

في الشكل (10-13) نلاحظ أن الخط المنكسر (1,4,5,6,7,8,9,10,11,12,2) يمثل عملية الخنق في سلسلة خوانق عددها (5). نلاحظ من الشكل أن الخط المنكسر (منحنى عملية الخنق) ومع ازدياد عدد الخوانق والمحافظة على الحالتين البدائية والنهائية للغاز يزداد اقتراباً من خط ثبوت الإنتالبي. فإذا ازداد عدد الخوانق إلى اللانهاية فإن الخط المنكسر ينطبق على خط ثبوت الإنتالبي. عندها يمكن وصف عملية الخنق بالخط $i - const.$



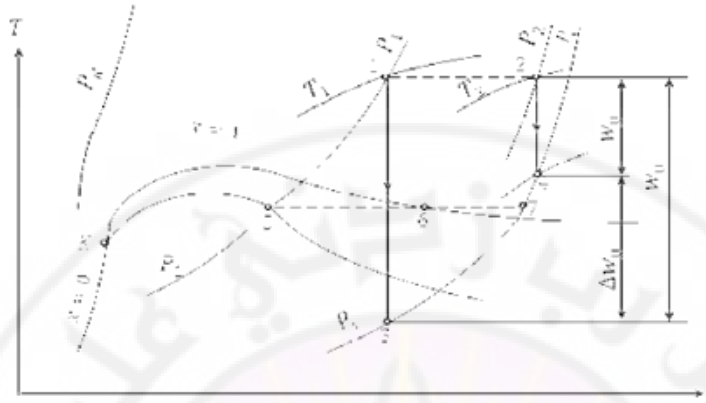
الشكل (10-13): تمثيل عمليات اختناق متعددة على مخطط (i,s)

في الهندسة الحرارية يحدث شيء قريب من هذا في المانعات التيهية في التوربينات.

تمثل عملية الخنق الجارية على بخار الماء كما هو موضح على مخطط (i,s) المبين بالشكل (10-14). كما هو ملاحظ فإنه نتيجة عملية الخنق تنخفض درجة حرارة البخار.

يظهر على الشكل السابق عملية خنق للبخار المحمص ذي البارامترات البدائية (p_1, t_1) (العملية 1←2) والتي بنتيجتها يبقى محمصاً، أما عملية الخنق (5←7) فإن البخار الرطب ببارامترات (5) يتحول بداية إلى بخار مشبع جاف (النقطة 6) ومن ثم يتحول إلى بخار محمص (النقطة 7). نلجأ في أغلب محطات القوى البخارية إلى تخفيض قابلية العمل للبخار عن طريق الخنق. هذه الخاصية موضوعة أساساً للتحكم في استطاعة العنفات البخارية. فعلياً إذا كانت بارامترات البخار القادم إلى العنفة p_1, t_1 تمثلها النقطة (1) فإنه عند التمدد الأديباتي حتى الضغط النهائي p_2 تمثلها العملية (1←3) عندها فإن العمل المنجز:

$$w_o = i_1 - i_3$$



الشكل (10-14): عمليات الخنق الأديباتي لبخار الماء على مخطط (i,s)

إذا أغلقنا نسبيا صمام البخار المركب على أنبوب البخار المغذي للعنفة البخارية نقول إنه حصل خنق وفق العملية (1←2) وعندها يصل البخار إلى العنفة ببارامترات p_2 ، t_2 والتي تمثلها النقطة (2)، وبهذه الحالة عند التمدد الأديباتي للبخار في العنفة إلى قيمة الضغط p_3 نفسها وفق العملية (2←4) فإن العمل المنجز $w'_o = i_2 - i_4$ يكون أقل من العمل في الحالة الأولى:

$$w'_o = i_2 - i_4 < w_o = i_1 - i_3$$

ويكون مقدار الضياع في قابلية العمل للبخار :

$$\Delta w_o = w_o - w'_o = i_4 - i_3$$

إن تأثير عملية الخنق على فعالية عمل آلات التبريد الضاغطة البخارية سوف ندرسه في الفصل الثالث عشر .

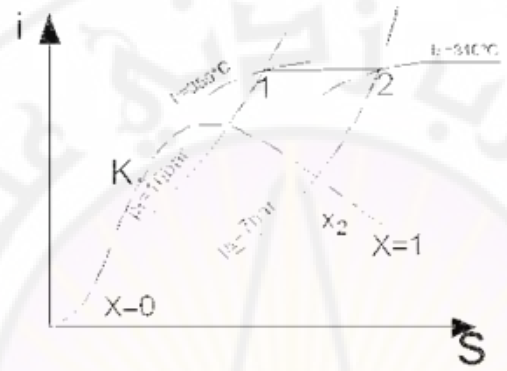
بالنسبة للغازات الحقيقية فإن t_2 (بعد الخنق) قد تكون أكبر أو أصغر أو مساوية لـ t_1 .

مثال 10-5

يتعرض بخار الماء عند $p_1 = 16\,bar$ و $t_1 = 350°C$ للخنق حتى $p_2 = 7\,bar$. أوجد حالة البخار النهائية.

الحل

نحدد النقطة (1) الواصفة لحالة البخار البدائية على مخطط (i,s)، الشكل (10-15)، ونمرر عبرها مستقيماً موازياً للمحور s $(i = const.)$ حتى التقاطع مع الإيزوبار $p_2 = 7\,bar$ في النقطة (2)، عبر النقطة (2) يمر الإيزوترم $t_2 = 340°C$.



الشكل (10-15): تابع للمثال (10-5)

هذه هي درجة الحرارة المطلوبة للبخار بعد الخنق وهي أخفض من درجة حرارة البخار قبل الخنق.

لنجد كيف تغيرت زيادة التسخين: للحالة البدائية تشكل زيادة التسخين $t_1 - t_{s1} = 350 - 200 = 150°C$ وللحالة النهائية أيضاً $t_2 - t_{s2} = 340 - 164 = 176°C$ أي أنه نتيجة عملية الخنق فإن زيادة التسخين ازدادت.

10-7: التأثير التفاضلي للخنق

لتحديد كيفية تغير درجة حرارة الغاز الحقيقي (الأبخرة) في عملية الخنق تم إدخال مفهوم التأثير التفاضلي للخنق: ويسمى أيضاً تأثير جول–طومسون التفاضلي للخنق ونرمز له α_j.

وهو يصف نسبة التغير اللامتناهي في الصغر لدرجة الحرارة إلى التغير اللامتناهي في الصغر للضغط في عملية الخنق، بمعنى آخر تصف قيمة α_j سرعة تغير درجة حرارة الغاز مع تغير الضغط عند الخنق والشكل الرياضي له:

$$\alpha_i = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i \qquad (24\text{-}10)$$

الدليل i يشير إلى أن العملية تجري بثبات الإنتالبي. تعتبر قيمة α_i صفة بارزة لعملية الخنق والتي يمكن تحديدها انطلاقا من المعادلة التفاضلية التي تعطي تغير الإنتالبي في أي عملية ترموديناميكية ومن أجل أي جسم تشغيل (سواء غاز مثالي أو حقيقي) وبدلالة زوج البارامترات T, p بالشكل:

$$di = c_p\, dT - \left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v\right] dp \qquad (25\text{-}10)$$

وبحسب تعريف الخنق فإن $di = 0$ أي:

$$di = c_p\, dT \quad \left| T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \quad v \right| dp = 0$$

وبالتالي:

$$\alpha_i = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i = \frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p} \qquad (26\text{-}10)$$

$$dT = \frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p} \qquad (27\text{-}10)$$

لتحديد α_i لأية مادة (غاز أو بخار) وفق العلاقة (10-26)، يلزم معرفة معادلة الحالة التي تصف حالة الغاز أو البخار. فمن أجل $1kg$ من الغاز المثالي تكتب معادلة الحالة له $pv = RT$، إذا استبدلنا الحد $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$ في العلاقة (10-26) بما يساويه لحالة الغاز المثالي $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p} = \frac{v}{T}$ نحصل بالنتيجة:

$$\alpha_i = \frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p} = \frac{T\frac{R}{p} - v}{c_p} = 0 \qquad (28\text{-}10)$$

أي أن التأثير التفاضلي لخنق الغاز المثالي يساوي الصفر $(\alpha_j = 0)$ وبالتالي: $dT \to 0 \Rightarrow T_1 = T_2$ التي سبق وأثبتناه.

أما إذا كان الغاز حقيقياً ويتبع لمعادلة فاندرفالس فإنه وبطريقة مماثلة لما أجريناه لحالة الغاز المثالي يمكن أن نحصل على معادلة مشابهة للمعادلة (10-27):

$$dT = \left(\frac{\frac{2a}{RT} - b}{c_p} \right) dp \qquad (29\text{-}10)$$

حيث a, b ثابتان للغاز المعطى. واضح من المعادلة (10-29) أن الإشارة الجبرية لـ dT تتعلق بإشارة البسط (حيث أن الخنق يجري دوماً عند dp سالبة) وهنا نميز ثلاث حالات:

- الحالة الاولى

$$dT = 0 \Rightarrow T_1 = T_2 \Rightarrow \alpha_j = 0$$

حتى تكون $dT = 0$ يجب أن يكون البسط في العلاقة (10-29) مساوي للصفر أي:

$$\frac{2a}{RT} - b = 0 \Rightarrow \frac{2a}{RT} = b \Rightarrow T = \frac{2a}{Rb}$$

حالة الغاز التي عندها سوف يغير المعامل التفاضلي α_j إشارته ندعوها بنقطة انقلاب الغاز وندعو عندها درجة الحرارة الموافقة لهذه النقطة بدرجة حرارة الانقلاب ونرمز لها بـ T_{inv}، درجة حرارة الانقلاب لأغلب الغازات مرتفعة $\left(T_{inv} \geq 600°C\right)$ وذلك عند الضغط الجوي ويستثنى منها الهيدروجين والهليوم حيث:

$$T_{inv\,H_2} = -80°C$$

وللهليوم:

$$T_{inv\,He} = -239°C$$

يبين الجدول 10-1 قيم درجات الحرارة الحرجة والانقلاب لبعض الغازات.

وهكذا ففي الحالة التي يكون فيها الغاز عند نقطة الانقلاب وتعرض للخنق فإن تأثير العاملين a, b يكون بجهة انعدام البسط في العلاقة (10-29) ويجعل الكسر كله صفرياً ولا يحدث تغير في درجة الحرارة عند الخنق.

الجدول (10-1): قيم درجات الحرارة الحرجة والانقلاب لبعض الغازات

اسم الغاز	درجة الحرارة الحرجة T_{cr} $[K]$	درجة حرارة الانقلاب T_{inv}	
		$[K]$	$[^oC]$
الهليوم	5	34	-239
الهيدروجين	32	216	-57
الأزوت	128	865	592
الأوكسجين	154	1,040	767
ثاني أوكسيد الفحم	304	2,050	1,777
بخار الماء	647	4,370	4,097

– الحالة الثانية

$$dT > 0 \Rightarrow T_1 < T_2 \Rightarrow \alpha_j < 0$$

وتتحقق هذه المتراجحة عند:

$$\frac{2a}{RT} - b < 0 \rightarrow T > \frac{2a}{Rb} = T_{inv}$$

أي أن درجة حرارة الغاز الحقيقي سوف تزداد بعد الخنق إذا كانت درجة حرارته أكبر من درجة حرارة الانقلاب لهذا الغاز .

– الحالة الثالثة

$$dT < 0 \Rightarrow T_1 > T_2 \Rightarrow \alpha_j > 0$$

(حيث الخنق يجري عند dp سالبة) وتتحقق هذه المتراجحة عند:

$$\frac{2a}{RT} - b > 0 \Rightarrow T < \frac{2a}{Rb} = T_{inv}$$

أي أن الخنق سيترافق بانخفاض في درجة حرارة الغاز الحقيقي فيما لو كانت درجة حرارته أخفض من درجة حرارة نقطة انقلاب هذا الغاز .

من دراسة العلاقة (10-29) نستنتج أن تغير درجة الحرارة متعلق بالثابتين a,b، أي بالقيم التي تميز الغاز الحقيقي عن المثالي، وتزداد درجة حرارة الغاز أو تتناقص أثناء الخنق تبعاً لتغلب تأثير أحد الثابتين a,b في الحالة الراهنة للغاز. بما أن تأثير الثابتين a,b يزداد بازدياد الضغط فإن تغير درجة الحرارة سيزداد بازدياد الضغط البدائي. عند الضغوط البدائية الصغيرة فإن الغازات الحقيقية ستسلك عملياً سلوك الغازات المثالية لأن تغير درجة الحرارة سيكون صغيراً إلى حد يسمح بإهماله. إذا كانت درجة الحرارة البدائية للغاز أو البخار أعلى من درجة حرارة الانقلاب فإنه ونتيجة الخنق ستزداد درجة حرارته في حين لو كانت درجة الحرارة البدائية للغاز أو البخار أخفض من درجة حرارة الانقلاب فإنه ونتيجة الخنق ستنخفض درجة حرارته. (على سبيل المثال، من أجل تبريد الهليوم عن طريق الخنق لابد أولاً من تخفيض درجة حرارته إلى ما دون $-239°C$)

10-8: منحني الانقلاب

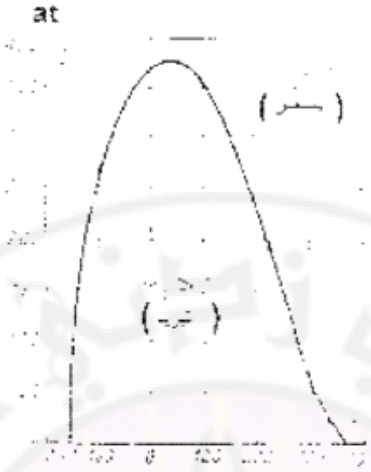
من العلاقة (10-27) ومع اعتبار $dH=0$ نحصل على قيمة درجة حرارة الانقلاب لأية مادة التي تأخذ الشكل:

$$T_{inv}=v\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p \qquad (30\text{-}10)$$

فإذا كان معلوماً لدينا معادلة الحالة للغاز المعطى فإنه واعتماداً على العلاقة (10-30) يمكن أن نحدد قيم T_{inv}. عند كل قيمة لضغط المادة يوجد نقطتي انقلاب: واحدة في منطقة السائل والأخرى في منطقة البخار المحمص. يسمى المحل الهندسي لنقاط الانقلاب على المخططات بمنحني الانقلاب، (منحنيات الانقلاب ترسم من أجل مواد مختلفة). موضح على الشكل (10-16) منحني الانقلاب $T_{inv}=f(p)$ للأزوت والمرسوم بالاعتماد على المعادلة (10-30).

تكون قيمة $\alpha_i>0$ في كامل المنطقة المحصورة بمنحني الانقلاب مع محور درجة الحرارة، وبالتالي سوف يبرد الأزوت عند إجراء الخنق عليه في هذه المنطقة.

بينما قيمة $\alpha_i<0$ خارج المنطقة السابقة، ولهذا فإن الأزوت سوف يسخن عند خنقه في حال وقوعه ضمن هذه المنطقة.



الشكل (10-16): منحنى الانقلاب $T_{inv} = f(p)$ للأزوت

بالنتيجة خنق الأزوت بالطور الغازي عند درجات حرارة بدائية $T > T_{inv}$ سوف يترافق بتبريده، على العكس عندما $T_{in} < T$ فإنه يسخن .

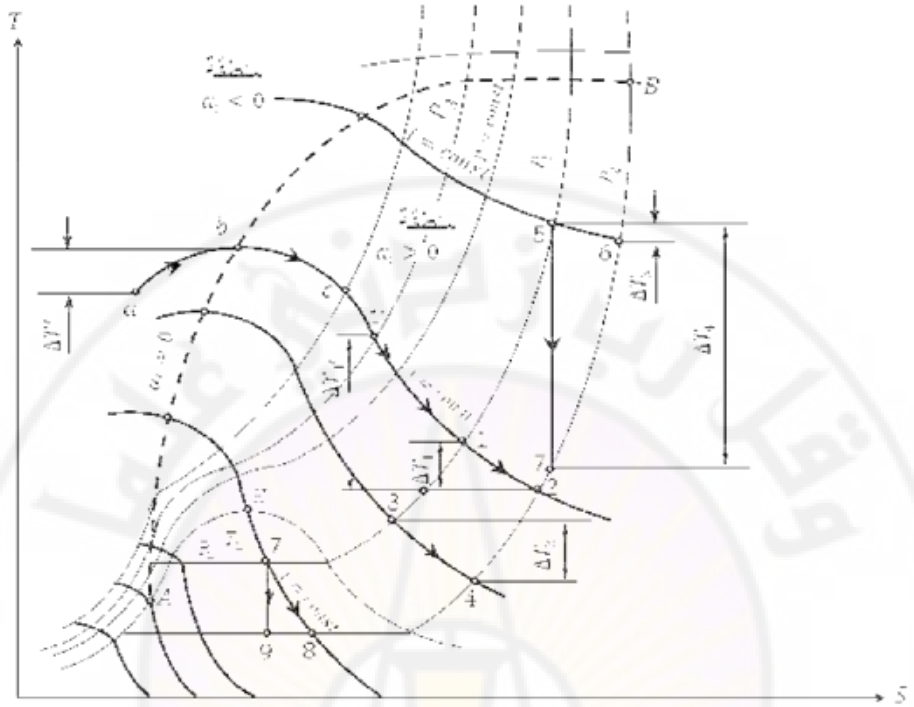
ولما كانت منحنيات الانقلاب متشابهة من حيث الطبيعة لأجسام التشغيل المختلفة فإنه يمكن توثيق الآتي:

من أجل المواد الموجودة في الطور الغازي عند $T_{inv} > T$ فعملية خنقها تترافق بتبريدها أما عند $T_{inv} < T$ فإن المواد تسخن.

لندرس طبيعة تغير قيمة وإشارة التأثير التفاضلي للخنق على مخطط (T,s)، الشكل (10-17)، وذلك عند بارامترات بدائية ونهائية مختلفة لتيار جسم التشغيل.

واضح من الشكل أن خطوط الإنتالبي في منطقة الضغوط العالية لها ذروة عظمى. الخط المنقط AB الواصل بين ذرى قيم خطوط ثبات الأنتالبي يمثل منحني الانقلاب الموافق لـ $\alpha_j = 0$ والذي يقسم هذا المخطط إلى قسمين:

- قسم يساري $(\alpha_j < 0)$ حيث التأثير التفاضلي للخنق سالب أي أن الخنق في هذا الجزء يترافق بارتفاع درجة الحرارة $(T_b > T_a$ للعملية a←b).
- قسم يميني $(\alpha_j > 0)$ أي أن عملية الخنق للغاز في هذا الجزء يترافق بانخفاض في درجة الحرارة (الغاز يبرد $T_b > T_c$ للعملية c←b).



الشكل (10-17): طبيعة تغير قيمة وإشارة التأثير التفاضلي للخنق

طالما أن درجة حرارة الإشباع في منطقة البخار الرطب تنخفض بانخفاض الضغط، الإشارة الجبرية للتأثير التفاضلي للخنق موجب $\left(\alpha_i = \left.\frac{\partial T}{\partial p}\right|_{i\ =\ const} > 0\right)$.

وبالتالي فإن الخنق في هذه المنطقة من المخطط يترافق بانخفاض درجة الحرارة.

بمقارنة عمليتي الخنق (1←2) و (1'←2) اللتين لهما ضغطان بدائيان مختلفان $(p_3 > p_1)$ وحتى نفس الضغط النهائي p_2، نجد أن التبريد الحاصل نتيجة الخنق يكون أكبر في الحالة التي ضغطها البدائي أكبر $(\Delta T'_i > \Delta T_i)$. وكما هو واضح يمكن التحقق من أن الهبوط الأعظمي لدرجة الحرارة نصل إليه عند الخنق من الضغط البدائي الموافق لنقطة الانقلاب على نفس الخط i_3 وهي النقطة (b)، أي في العملية (b←2).

يجب الإشارة إلى أنه في منطقة درجات الحرارة العالية أو في حالات هبوط الضغط الكبيرة فإن انخفاض درجة حرارة الغاز من جراء تمدده أديباتيا دوما مفضل مقارنة

مع الخنق، يمكن ملاحظة ذلك عند مقارنة فعالية تبريد جسم التشغيل عند الخنق العملية (5←6) والتمدد الأديباتي العكوس العملية (5←7) حيث $\Delta T_1 >> \Delta T_2$.

يستخدم في الوقت الحاضر وبصورة واسعة في تقنية التبريد العميق طريقة التمدد الأديباتي من أجل الحصول على درجات حرارة منخفضة ويتم تحقيق ذلك في الممدد التوربيني. عند التمدد في منطقة البخار المشبع الرطب تنخفض درجة الحرارة في نهاية كل من العملية الأديباتية $(dq = 0)$ (7←9) وبعملية الخنق (7←8) إلى المستوى نفسه ولكن الحالة النهائية تكون مختلفة لكلا العمليتين. ظهور الاحتكاك في عملية الخنق يؤدي إلى رفع قيمة كسر جفاف تيار البخار في نهاية عملية الخنق مقارنة مع حالة البخار في نهاية التمدد العكوس الأديباتي. تتحقق عملية التمدد في آلات التبريد البخارية من حالة السائل المشبع أو غير المشبع، عندها فإن عمل التمدد في الممدد التوربيني يكون صغير. لهذا في آلات التبريد البخارية ونظراً للسعر العالي للممدد التوربيني مقارنة مع صمام الخنق فإن عملية تمدد وسيط التبريد لا تجري في الممدد التوربيني.

أغلب أجسام التشغيل المستخدمة في الهندسة الحرارية أو هندسة التبريد لها بارامترات حالة متوضعة على مخطط (T,s) في القسم اليميني من منحني الانقلاب لهذا عند الخنق الأديباتي لها فإن درجة حرارتها تنخفض. فقط خنق الهيدروجين والهليوم عند درجة حرارة الوسط المحيط يؤدي إلى تسخينهما وذلك لأن درجة حرارة الانقلاب لهذين الغازين أخفض بكثير من درجة حرارة الغرفة.

مثال 10-6:

يدخل $1kg$ بخار ماء محمص بارامتراته البدائية $p_1 = 100bar; t_1 = 530°C$ في الحالة الأولى إلى عنفة بخارية حيث يتمدد أديباتيا حتى الضغط النهائي $p_2 = 0,05bar$، وينجز البخار من جراء تغير طاقته الحركية عملاً، عددياً يساوي لتغير الانتالبي. في الحالة الثانية يخنق البخار بداية في صمام حتى الضغط البيني $p_1 = 3bar$، ومن ثم يتمدد ثانية بصورة أديباتية في عنفة بخارية حتى الضغط النهائي. والمطلوب تحديد درجة حرارة البخار خلف الصمام، مقدار ازدياد الإنتروبي وضياع العمل المفيد بسبب الخنق.

الحل

بدلالة البارامترات البدائية وبالاستعانة بمخطط (i,s) نجد أن:

$$i_1 = 3,450 kJ/kg \ , \ s_1 = 6.7 kJ/kgK$$

برسم مستقيم أفقي يوازي محور s من النقطة البدائية حتى تقاطعه مع الضغط خلف الصمام $(p_{1'} = 3 bar)$، نجد حرارة البخار خلف الصمام: $t_{1'} = 483°C$.

من نفس مخطط (i,s) نجد حالة البخار في نهاية التمدد الأديباتي حيث $p_2 = 0,05 bar$ فنجد أن: $i_2 = 2,040 kJ/kg$

مقدار هبوط الإنتالبي في عملية التمدد:

$$h_1 - i_1 - i_2 - 3,450 - 2,040 - 1,410 kJ/kg$$

أما استمرار عملية التمدد الأديباتي بعد عملية الخنق في الصمام فإن هبوط الإنتالبي: $h_2 = i_1 - i_{2'} = 3,450 - 2,530 = 920 kJ/kg$

من هنا فإن ضياع قابلية العمل للبخار تساوي:

$$\Delta h - 1,410 - 920 - 490 kJ/kg$$

$$\Delta h - \frac{1410 - 920}{1410} \times 100\% - 35\%$$

الإنتروبي بعد الخنق: $s_2 = 8,3 kJ/kgK$

تعد عملية الخنق عملية نمطية لاعكوسة وتترافق دوما بازدياد في الانتروبي. وفق معطيات المثال فإن مقدار ازدياد الانتروبي:

$$s_2 - s_1 = 8,3 - 6,7 = 1,6 kJ/kgK$$

9-10: مزج الغازات والأبخرة

تقودنا الحاجة أحيانا إلى استخدام خلائط من الغازات (السوائل) في الأجهزة والأنظمة المختلفة أو استخدام حصص مختلفة من نفس الغاز (السائل) عند بارامترات مختلفة للحصص الداخلة بالخليط.

سوف ندرس في هذه الفقرة عمليات مزج نفس الغاز (أو السائل) ولكن عند بارامترات مختلفة لحصص الغاز المراد مزجها. طالما أنه في هذه الفقرة لن ندرس ترموديناميك المحاليل، هذا يعني أنه لن ندرس عمليات مزج غازات وسوائل مختلفة.

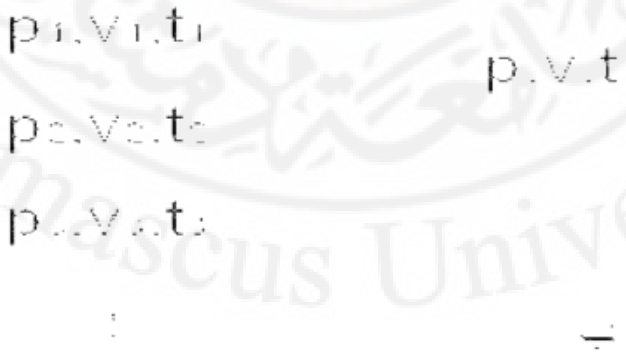
سوف ندرس عملية المزج الجارية دون وجود تبادل حراري (دون إعطاء أو طرح حرارة إلى الجسم) عند المزج، أي تتم بصورة أديباتية. إن هذه الظاهرة غالباً ما تكون مرتبطة بحركة جسم التشغيل

الغاية الأساسية من دراسة عمليات المزج هي معرفة بارامترات حالة الخليط بعد المزج .

يمكن أن يتم مزج الغازات بطرائق عديدة ولكن هذه الطرائق يمكن جمعها في ثلاثة نماذج ، لكل نموذج قوانينه الحسابية .

10-9-1: النموذج الأول هو المزج في الحجم الإجمالي

ليكن لدينا ثلاثة غازات ذات ضغوط ودرجات حرارة مختلفة وموجودة في حجوم مختلفة (بارامترات الغاز الأول p_1, v_1, T_1, u_1 ، للغاز الثاني p_2, v_2, T_2, u_2 ، للغاز الثالث p_3, v_3, T_3, u_3)، الشكل (10-18-أ). إذا أزلنا الحواجز ، فسيتشكل نتيجة حركة الجزيئات الحرارية خليط متجانس تكون درجات الحرارة في جميع أنحاء حجمه واحدة وكذلك الضغوط p, v, T, u ، الشكل (10-18-ب).



الشكل (10-18): المزج في الحجم الإجمالي

طالما نحن ندرس عملية المزج في وعاء مزود بعازل مثالي وطالما حجم الوعاء يبقى ثابت (جدرانه جاسئة بصورة مطلقة لهذا فإن $dw = pdv = 0$ أي أنه لا يحصل عمل عند المزج). فإنه يمكن أن نكتب في هذه الحالة:

حجم الخليط $V = V_1 + V_2 + V_3$ أي أنه يساوي مجموع حجوم الغازات الممزوجة:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = const. \quad (31\text{-}10)$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = const. \quad (32\text{-}10)$$

$$m = m_1 + m_2 + m_3$$

نجد من العلاقتين (31-10) و (32-10):

$$m_1 u_1 + m_2 u_2 + m_3 u_3 = (m_1 + m_2 + m_3)u \quad (33\text{-}10)$$

ومنه فإن الطاقة الداخلية للغاز بعد المزج تتحدد بالعلاقة:

$$u = \frac{m_1 u_1 + m_2 u_2 + m_3 u_3}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (34\text{-}10)$$

وبصورة مشابهة يمكن أن نحدد v:

$$v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 + m_3 v_3}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (35\text{-}10)$$

تعد عملية المزج المدروسة حتما لاعكوسة، لأجل هذه الغاية ومن أجل فصل الغاز الموجود في الوعاء إلى جزأين يملكان درجتي حرارة وضغطين مختلفين، كان لابد من صرف عمل خارجي.

من المستحيل تحديد بارامترات الغاز المتبقية (T, p) تحليليا بعد المزج ، لحالة الغازات الحقيقية والسوائل.

تتحدد قيمة T, p للغاز المثالي بعد المزج مباشرة بعلاقات تحليلية معلوم فيها قيم بارامترات الحالة لحصص الغازات الممزوجة. وعندها فإن درجة حرارة الغاز T بعد المزج نحددها وذلك على اعتبار أن $c_v = const.$:

$$u_1 = c_v T_1 \ , \ u_2 = c_v T_2 \ , \ u_3 = c_v T_3 \quad (36\text{-}10) \quad -$$

بأخذ الشرط السابق بعين الاعتبار نجد:

$$T = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2 + m_3 T_3}{m_1 + m_2 + m_3} \qquad (37\text{-}10)$$

يحدد الضغط p للغاز بعد المزج مع الأخذ بعين الاعتبار معادلة كلابيرون (15-2):

$$p = \frac{(m_1 + m_2 + m_3) R T}{V} \qquad (38\text{-}10)$$

حيث T درجة حرارة الغاز بعد المزج والمحددة بالعلاقة (37-10).

V حجم الوعاء.

$m_1 + m_2 + m_3$ كتلة الخليط الكلية.

R الثابت المميز للخليط، ويحدد بالعلاقة: $R = \frac{8314}{\mu_{mix}}$

بمجرد معرفة T و p لخليط الغاز المثالي الحاصل بعد المزج يمكن حساب إنتروبي الخليط من العلاقة:

$$s - s_o = c_{p_o} \ln \frac{T}{T_o} - R \ln \frac{p}{p_o} \qquad (39\text{-}10)$$

مثال 10-7 (مزج غازين مثاليين في صهريج)

يقسم حاجز صهريج صلب معزول إلى مقصورتين، الأولى تحوي على $7kg$ من غاز O_2 عند درجة الحرارة $40°C$ والضغط $100kPa$، أما المقصورة الثانية فتحوي على $4kg$ من غاز N_2 عند درجة الحرارة $20°C$ والضغط $150kPa$. تمت إزالة الحاجز، وسمح للغازين أن يمتزجا. عيّن ما يلي:

أ- درجة حرارة المزيج،

ب- ضغط المزيج بعد تمام التوازن .

الحل

نأخذ كامل محتوى الصهريج (كلا المقصورتين) كوحدة واحدة، هذه الوحدة تعتبر مغلقة طالما أنه لا يوجد تبادل في الكتلة عبر حدود الوحدة خلال العملية، نلاحظ أن حجم الصهريج الصلب ثابت لذلك $V_1 = V_2$ ولا يوجد أي عمل منجز لحدود الجملة.

أ- بـلا شك أنـه لا يوجد أي تبادل حراري من أو إلـى الصـهريج، علاقة تـوازن الطاقة للصهريج يمكن التعبير عنها:

$$E_m - E_{in} = \Delta E_{system}$$

$$0 = \Delta U = \Delta U_{N_2} + \Delta U_{O_2}$$

$$\left[mc_v(T_m - T_1)\right]_{N_2} + \left[mc_v(T_m - T_1)\right]_{O_2} = 0$$

وباستخدام قيم c_v عند درجة حرارة الغرفة، تحدد قيمة درجة حرارة المزيج النهائية لتكون:

$$\left[(4\times 0.743)(T_m - 20)\right] + \left[(7\times 0.658)(T_m - 40)\right] = 0$$

$$T_m = 32.2°C$$

ب- يحدد الضغط النهائي للمزيج الغازي من علاقة الغاز المثالي:

$$p_m V_m = N_m R_u T_m$$

حيث:

$$N_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}} = \frac{7}{32} = 0.219\,kmol$$

$$N_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{\mu_{O_2}} = \frac{4}{28} = 0.143\ kmol$$

$$N_m = N_{O_2} + N_{N_2} = 0.219 + 0.143 = 0.362\ kmol$$

ولدينا أيضاً:

$$V_{O_2} = \left(\frac{N R_u T_1}{p_1}\right)_{O_2} = \frac{0.219\times 8.314\times 313}{100} = 5.7 m^3$$

$$V_{N_2} = \left(\frac{N R_u T_1}{p_1}\right)_{N_2} = \frac{0.143\times 8.314\times 293}{150} = 2.32 m^3$$

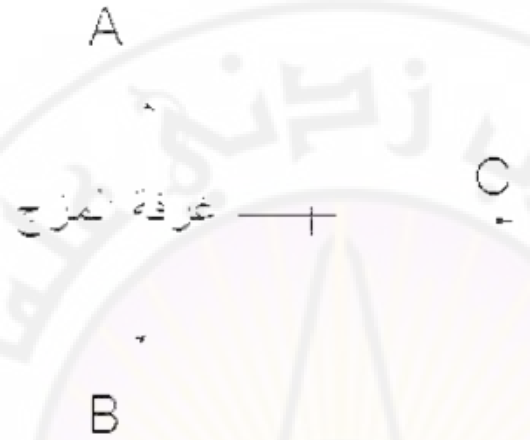
$$V_m = V_{O_2} + V_{N_2} = 5.7 + 2.32 = 8.02 m^3$$

لذلك:

$$p_m = \frac{N_m R_u T_m}{V_m} = \frac{0.362\times 8.314\times 305.2}{8.02} = 114.5 kPa$$

10-9-2: النموذج الثاني يسمى المزج عند الحركة

تعد عملية مزج تيارين غازيين (أو أكثر) من العمليات الهامة في الهندسة الحرارية ويبين الشكل (10-19) رسماً توضيحياً لمثل عملية المزج هذه.



الشكل (10-19): المزج عند الحركة

يجري الغاز (I) تدفقه $\dot{m}_1$ وبارامتراته p_1, v_1, T_1, i_1 في الأنبوب (A) الموصول بغرفة المزج ويجري الغاز (II) تدفقه $\dot{m}_2$ وبارامتراته p_2, v_2, T_2, i_2 في الأنبوب (B) الموصول إلى غرفة المزج نفسها. يخنق التيارين الغازيين قبل دخولهما إلى غرفة المزج بحيث أن الضغط p في غرفة المزج يكون أقل من الضغطين p_1 و p_2. بديهي أن الضغط بعد المزج يجب أن يكون أقل من ضغط كل من الغازات الممزوجة وإلا لانتظمت الحركة باتجاه الضغط الأقل عوضاً من أن تتجه من (A) و (B) باتجاه المخرج (C).

(إذا كان p أكبر من أحد الضغطين، على سبيل المثال $p > p_1$، عندئذ سوف يهرب الغاز الموجود في غرفة المزج عبر الأنبوب A).

تختلف عملية مزج تيارين عن عملية المزج المدروسة سابقاً (المزج في الحجم الإجمالي)، حيث يكون للضغط بعد المزج قيمة واحدة تتحدد من البارامترات البدائية لحصتي الغاز الممزوجتين.

يجب أن نشير إلى أن قيمة الضغط p في غرفة المزج يمكن اختيارها مختلفة بحسب درجة فتح الصمامين المركبين على الأنبوبين (A) و (B).

يخرج من غرفة المزج تيار غازي في الأنبوب (C)، بارامتراته p, v, T, i ، وتدفقه:

$$\dot{m}_{mix} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

كما ورد سابقاً، نعد أن عملية المزج عند الحركة تجري بصورة أديباتية (غرفة المزج محاطة بعازل حراري مثالي). كذلك فإن عملية المزج لتيارين هي عملية لاعكوسة.

تستعمل العلاقات التالية من أجل تحديد بارامترات الغاز الحاصل بعد المزج عند الحركة:

$$i = \frac{\dot{m}_1 i_1 + \dot{m}_2 i_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \qquad (40\text{-}10)$$

تتحدد بقية بارامترات الغاز بعد المزج (T, v, s) الذي عرف فيه p و i وذلك بالاستعانة بمخطط (i,s) للغاز المدروس.

عند مزج تيارين لغاز مثالي لهما بارامترات مختلفة فإن قيمة T و v للمزيج تتحدد تحليليا من خلال قيم البارامترات المعلومة للغاز بعد المزج.

فإذا افترضنا أن الحرارة النوعية للغاز المثالي ثابتة عندها نستطيع أن نكتب:

$$i_1 = c_p T_1 \ , \ i_2 = c_p T_2 \ , \ i = c_p T \qquad (41\text{-}10)$$

وبالأخذ بعين الاعتبار (40-10) نحصل على:

$$T = \frac{\dot{m}_1 T_1 + \dot{m}_2 T_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \qquad (42\text{-}10)$$

بمعلومية p, T للغاز المثالي في غرفة المزج وبالاستعانة بمعادلة كلابيرون (15-2) نجد الحجم النوعي v:

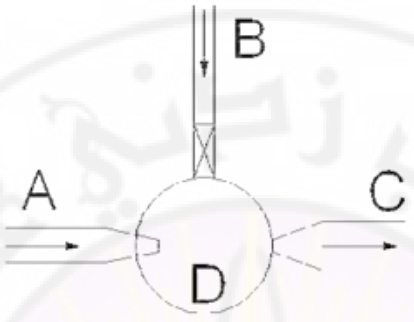
$$v = \frac{RT}{p} \qquad (43\text{-}10)$$

حيث R الثابت المميز للخليط الغازي المحدد بالعلاقة: $R = \frac{8314}{\mu_{mix}}$.

ويتحدد الأنتروبي من العلاقة (39-10).

يجب أن نأخذ في الحسبان أنه بوساطة جهاز خاص يمكن أن نحصل بعد المزج على ضغط للمزيج يفوق ضغط أحد الغازات الممزوجة. ويتم هذا بوساطة بخ الغاز،

الشكل (10-20). يصل الغاز من أنبوب الضغط العالي (A) عن طريق بوق ناشر (ديفوزور) إلى غرفة المزج (D) المتصلة مع الأنبوب (B). يمكن عبر (B) أن يدخل إلى المستودع (D) غاز ذو ضغط منخفض يزيد قليلا على الضغط فيها.



الشكل (10-20)

هذا الغاز يُشفط بالتيار القادم من (A) ويتحرك المزيج بسرعة أقل من سرعة الجريان من (A) ($10at > p_{mix} > 1at$). تتناقص في الديفوزر السرعة وتختفي تقريبا الطاقة الحركية للغاز محدثة عمل انضغاط الغاز حتى ضغط ما واقع بين ضغطيين (A) و (B). جميع علاقات المزج في هذه الحالة يمكن أن تؤخذ من النموذج (II).

10-9-3: النموذج الثالث هو المزج عند التعبئة

ويتم عندما يجري إلى المستودع المملوء بأحد الغازات غاز آخر عن طريق أنبوب (الشكل 10-21).

الشكل الثالث والهام لعملية المزج ندعوه بالمزج عند التعبئة، في هذا النموذج من المزج لدينا وعاء حجمه ثابت V_1، يحتوي على غاز (سائل) بارامتراته p_1, v_1, T_1 وكتلته m_1 نوجه إلى داخله عن طريق أنبوب كمية محددة من نفس الغاز (السائل) بارامتراته p_2, v_2, T_2 وكتلته m_2، انظر الشكل (10-21). بديهي أن الضغط $p_2 > p_1$. لندرس حصول عملية المزج كما في النموذجين السابقين (بصورة أديباتية).

نستخدم العلاقات التالية من أجل تحديد بارامترات الغاز بعد المزج (التعبئة):

$$m = m_1 + m_2$$

$$u = \frac{m_1 u_1 + m_2 i_2}{m_1 + m_2} \qquad (44\text{-}10)$$



الشكل (10-21): المزج عند التعبئة

نحدد الحجم النوعي للغاز بعد المزج وبما أنه معلوم حجم الوعاء V_1 وكتلة الخليط $m_1 + m_2$:

$$v = \frac{V_1}{m_1 + m_2} \qquad (45\text{-}10)$$

وبدلالة u, v وبمساعدة مخططات الحالة يمكن تحديد بقية بارامترات الخليط (p, T, s).

إذا استخدمنا الغازات المثالية في عملية المزج وفق هذا الأسلوب عندها يمكن الحصول على علاقات تساعد في تحديد p, T للغاز بعد المزج وذلك بمعلومية p_1, T_1 و p_2, T_2 فإذا اعتبرنا أن الحرارة النوعية للغاز المثالي ثابتة إذا:

$$u_1 = c_v T_1 \ , \ i_2 = c_p T_2 \ , \ u = c_v T \qquad (46\text{-}10)$$

بالأخذ بعين الاعتبار للعلاقات السابقة وتبديلها في العلاقة (10-44):

$$T = \frac{m_1 T_1 + k m_2 T_2}{m_1 + m_2}$$

حيث k أس الأديبات للغاز المثالي: $k = \frac{c_p}{c_v}$

يتحدد الضغط p بعد المزج من معادلة كلابيرون (2-15):

$$p = \frac{(m_1 + m_2) R T}{V_1} \qquad (47\text{-}10)$$

بنفس الطريقة وبعد معرفة p, T نقوم بتحديد s.

مما تقدم ينتج أن:

أ- يمكن في نماذج المزج جميعاً التعرف على كتلة المزيج وتركيبه الكتلي (كتلة أي عنصر من عناصر الخليط بعد المزج تساوي كتلته قبل المزج) وعليه:

$$m_{mix} = \sum_{i=1}^{n} m_i$$

(بالنسبة للمزج عند الحركة يستبدل بالكتلة التدفق الكتلي).

ب- يمكن في جميع نماذج المزج التعرف على أحد بارامترات المزيج:

- بالنسبة للنموذجين (I) و (III) نستطيع التعرف على الحجم النوعي للمزيج لأن:

$$v_{mix} = \frac{V_{mix}}{m_{mix}}$$

حيث V_{mix} للنموذج (I) يساوي $\sum_{i=1}^{n} V_i$، وللنموذج (III) تساوي V_1

- بالنسبة للنموذج (II) فإن ضغط المزيج يكون معطى عادة.

ت- لإيجاد البارامتر الآخر للمزيج المتشكل نتيجة المزج الأدياباتي يستخدم قانون الترموديناميك الأول حيث ينتج عنه القوانين التالية:

- للمزج في الحجم الإجمالي:

$$U_{mix} = \sum U_i = m_1 u_1 + m_2 u_2 + m_3 u_3 \qquad (أ)$$

- للمزج عند الحركة:

$$I_{mix} = \sum I_i \qquad (ب)$$

- للمزج عند التعبئة:

$$U_{mix} = U_1 + U_2 \qquad (ج)$$

- ب

حيث: $I_{mix} = m_{mix}\, i_{mix}$ ، $I_i = m_i\, i_i$ ، $U_{mix} = m_{mix}\, u_{mix}$ ، $U_i = m_i\, u_i$

يدل الدليل i على رقم العنصر قبل المزج.

العلاقات (أ) و (ب) و (ج) صالحة لجميع الغازات الحقيقية منها والمثالية.

مسائل غير محلولة

1-10

أوجد سرعة جريان الهواء وتدفقه الكتلي إذا كان $p_1 = 70 bar, t_1 = 65°C$ و $A = 10 mm^2$ و $p_2 = 42 bar$.

2-10

يوجد O_2 في خزان سعته $5 m^3$ عند $T_1 = 320 K, p_1 = 3 bar$ يأتي إليه عبر أنبوب $0.6 m^3$ من غاز CO_2 بارامتراته $T_2 = 400 K, p_2 = 12 bar$. أوجد بارامترات حالة الخليط الناتج علما بأن الحرارة النوعية ثابتة.

الجواب: $T_{mix} = 348 K, p_{mix} = 4.5 bar$

3-10

يتعرض البخار عند $p_1 = 20 bar$ و $\chi_1 = 0.95$ للخنق، لأي ضغط يجب أن يستمر الخنق كي نحصل على بخار مشبع جاف؟ ما هي درجة الحرارة التي ستكون للبخار عند انتهاء عملية الخنق؟

الجواب: $p_2 = 2.1 bar, T_2 = 120.7°C$

4-10

بارامترات بخار الماء في خزان سعته $V = 10 m^3$ هي $p_1 = 2 bar$ و $\chi_1 = 0.98$، يرسل له بواسطة أنبوب $V = 4 m^3$ من البخار ببارامترات $p_2 = 20 bar$ و $t_2 = 300°C$، أوجد حالة البخار بعد المزج.

الجواب: $p_{mix} = 12 bar, t_{mix} \approx 360°C$

الفصل الحادي عشر

انضغاط الغازات والأبخرة

- معلومات عامة
- العمليات الأساسية في ضاغط مكبسي مثالي وحيد المرحلة
  - مبدأ العمل
- حساب عمل الضاغط المثالي
  - عملية الانضغاط الإيزوترمي
  - عملية الانضغاط الأديباتي
  - عملية الانضغاط البوليتروبي
- دورة عمل الضاغط المكبسي الفعلي
- إنتاجية الضاغط الفعلي
  - المعامل الحجمي (λ_v)
- كمية الحرارة المطروحة خلال عملية الانضغاط
- الضواغط متعددة المراحل
- الضواغط العنفية (التوربينية)
- مسائل وغير محلولة

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الحادي عشر

انضغاط الغازات والأبخرة

11-1: معلومات عامة

تعد الضواغط على اختلاف أنواعها عنصرا أساسيا في بعض الآلات الحرارية، فوجودها على سبيل المثال ضروري في الآلة العنفية الغازية (حيث تستخدم لرفع ضغط الهواء)، كذلك الأمر بالنسبة لآلات ومحطات التبريد (التي تستخدم فيها وسائط تبريد مختلفة كالفريونات والهواء...).

يعرف الضاغط بأنه الآلة ذات التأثير المستمر التي يتم بمساعدتها رفع ضغط الغاز أو البخار الداخل إليها. والضاغط آلة منفذة وليست محركا فهي تستهلك الطاقة الميكانيكية، تصنف الضواغط حسب مبدأ عملها إلى ثلاث مجموعات رئيسية:

أ – الضواغط الحجمية

يتم رفع ضغط الغاز أو البخار فيها عن طريق إنقاص حجم الفراغ العامل وأمثلة على هذه الضواغط: الضواغط المكبسية– الدورانية– الحلزونية. وفيها تتم عملية الانضغاط وطرد الغاز المضغوط بصورة دورية وبالتالي تكون إنتاجيتها الكتلية أو الحجمية ليست كبيرة مقارنة مع ضواغط المجموعة (ب) ولكن تتميز عن هذه المجموعة بإمكانية الحصول على ضغوط مرتفعة.

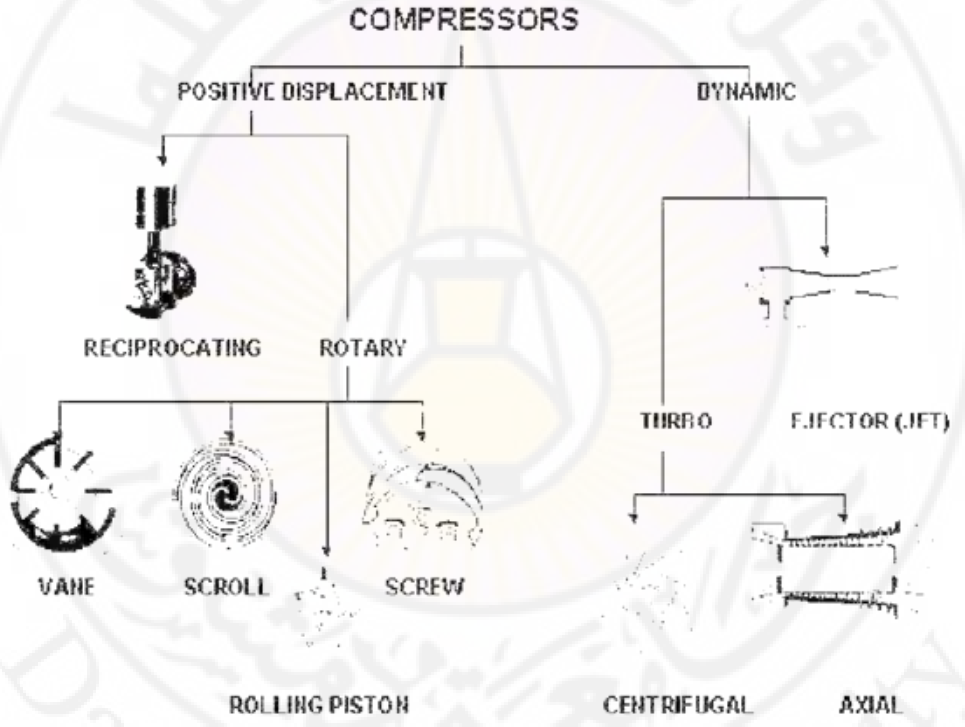
ب – الضواغط التوربينية

تتم عملية الانضغاط فيها على مرحلتين: في المرحلة الأولى يكتسب الغاز أو البخار سرعة إضافية تزيد طاقته الحركية وفي المرحلة الثانية يجري تحويل الطاقة الحركية المكتسبة إلى طاقة كامنة للضغط ويمكن أن تكون الضواغط التوربينية طاردة مركزية أو محورية، وتكون عملية انضغاط وطرد الغاز (أو البخار) بصورة مستمرة.

ج – ضواغط تيار البخار

هي تعتمد على مزج نوعين من البخار : البخار الحار ذي الضغط العالي والبخار المسحوب ذي الضغط المنخفض لتعطي مزيجاً ذا ضغط متوسط.

يظهر على الشكل (11-1) الأنواع الأنفة الذكر . تختلف ضواغط المجموعتين (أ) و(ب) عن بعضهما من حيث التصميم والأداء ولكن من وجهة النظر الترموديناميكية فإن العمليات الجارية فيهما واحدة. لذلك سوف ندرس الأسس الترموديناميكية لعمليات انضغاط الغاز أو الهواء في الضاغط المكبسي لأنه الأكثر بساطة.



الشكل (11-1): تصنيف الضواغط

إن مهمة التحليل الترموديناميكي للضاغط هي تحديد العمل اللازم صرفه للحصول على $1kg$ (على سبيل المثال) من الغاز أو الهواء المضغوط وذلك عند معرفة البارامترات البدائية والنهائية للغاز .

11-2: العمليات الأساسية في ضاغط مكبسي مثالي وحيد المرحلة

يمثل الشكل (11-2) الشكل التوضيحي للضاغط المكبسي وحيد المرحلة والمخطط البياني[1] للضاغط المكبسي المثالي. يتألف الضاغط المكبسي من الأسطوانة k مع قميصها الخاص بمياه التبريد، المكبس p وصمامي السحب (ص.س) والطرد (ص.ط) اللذين يفتحان آلياً تحت تأثير الضغط داخل الأسطوانة (تبقى التعاريف الواردة في الفقرة (1-6) من بحث محركات الاحتراق الداخلي من الجزء الأول من كتاب الترموديناميك نفسها لحالة الضواغط المكبسية).

11-2-1: مبدأ العمل

عند تحرك المكبس نحو اليمين فانه يتم سحب الغاز إلى داخل أسطوانة الضاغط وذلك بعد أن ينفتح صمام السحب تحت تأثير فرق ضغط الغاز على جانبي الصمام (من جهتي أنبوب السحب وجوف الأسطوانة). تستمر عملية السحب حتى وصول المكبس إلى نهاية الشوط (النقطة الميتة السفلى) ويبقى ضغط الغاز p_1 في الضاغط ثابتا عمليا على طول الشوط بدءا من لحظة انفتاح صمام السحب. في اللحظة التي يغير فيها المكبس اتجاه حركته يغلق صمام السحب ويبقى صمام الطرد مغلقاً وتبدأ عملية انضغاط الغاز. وتحدد طبيعة عملية الانضغاط شروط التبادل الحراري، بين الغاز الخاضع للضغط المحصور في أسطوانة الضاغط وجدران الأسطوانة (أي الوسط الخارجي). (بالنسبة للضواغط الحقيقية يؤثر في طبيعة الانضغاط بالإضافة لعملية التبادل الحراري وجود الاحتكاك).

في اللحظة التي يصبح فيها ضغط الغاز داخل الأسطوانة أكبر من الضغط داخل الخزان p_2 بما يكفي لفتح صمام الطرد ينفتح الصمام المذكور ويبدأ طرد الغاز المضغوط إلى خط الدفع. عندما يغير المكبس اتجاه حركته يغلق صمام الطرد وفور

---

[1] يستخدم المخطط البياني (p,v) لتمثيل العمليات الجارية خلال دورة عمل الضاغط وحيد المرحلة حيث تمثل على محور العينات قيم الضغط في أسطوانة الضاغط، أما محور السينات فيمثل وضعية المكبس وبالتالي حجم الغاز الموجود داخل الأسطوانة.

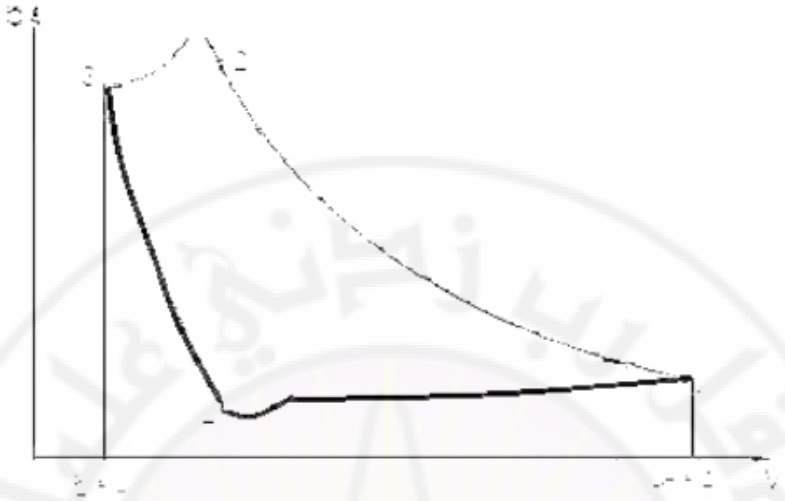
عودة المكبس باتجاه (ن.م.س) ينخفض الضغط مباشرة من p_2 وحتى p_1 ، يفتح صمام السحب وتتكرر العملية.



الشكل (11-2): الشكل التوضيحي لضاغط مكبسي ودورة عمله على مخطط (p,v)

في الضاغط الحقيقي يحصر المكبس عند وجوده في النقطة الميتة العليا حجماً من الغاز V_3 ، انظر الشكل(11-3)، وهذا الحجم يؤثر سلباً على إنتاجية الضاغط ويسمى لذلك الحجم الضار (أو حجم الفراغ الميت) الذي هو بالتعريف: الحجم المحصور بين السطح العلوي للمكبس عند وجوده في النقطة الميتة العليا والسطح الداخلي لغطاء الأسطوانة).

فالغاز الموجود في الحجم الضار يتمدد في بداية مشوار السحب ولا يسمح بدخول الشحنة الجديدة إلا عندما يصبح الضغط داخل الأسطوانة أقل من ضغط السحب.



الشكل (11-3): دورة العمل الفعلية للضاغط المكبسي

(الخط 3←4) يعكس عملية تمدد الغاز المتبقي في حجم الفراغ الضار . تمثل النقطة (4) بداية دخول شحنة جديدة. أي أن الحجم الضار يخفض من كمية الغاز الداخل إلى أسطوانة الضاغط عند السحب وبالتالي تنخفض إنتاجية الضاغط.

بالإضافة إلى ذلك هناك العديد من مظاهر اللاعكوسية يرافق عمل الضاغط الحقيقي مثل الاحتكاك بالإضافة إلى وجود مقاومات هيدروليكية في الصمامات مما يؤدي إلى اختلاف قيم الضغط على طرفي صمامي السحب والطرد أثناء الانفتاح (الخط 4←1) غير منطبق على إيزوبار الضغط الخارجي p_1 والخط (2←3) غير منطبق على إيزوبار ضغط الخزان p_2 (انظر الفقرة 11-4).

يدرس الترموديناميك بالدرجة الأولى العمليات المثالية والآلات المثالية لذا فإن الدراسة الترموديناميكية تجري على الضاغط المكبسي المثالي وهو الضاغط الذي يحقق الافتراضات التالية:

١- الحجم الضار معدوم $(V_c = 0)$.

٢- انعدام الاحتكاك وبالتالي انعدام العمل المصروف على الاحتكاك.

٣- ضغط الغاز أثناء طرده من أسطوانة الضاغط ثابت خلال كامل زمن الطرد ويساوي للضغط في خزان تجميع الغاز المضغوط.

٤- ضغط الغاز داخل الأسطوانة خلال شوط السحب ثابت ويساوي ضغط الوسط الذي نسحب منه الغاز إلى الأسطوانة.

وعليه فإن شوط السحب في الضاغط المثالي (انظر الشكل (11-2)) يبدأ من النقطة الميتة العليا (الخط 4←1) أما طرد الغاز فيمثل (بالخط 2←3) وفي كلا الشوطين يكون الضغط داخل الأسطوانة مساوياً لضغط جسم التشغيل خارجها (بصورة أدق يختلف الضغطان الخارجي والداخلي بالمقدار التفاضلي dp).

بقي أن نقول إن مشواري السحب (4←1) والطرد (2←3) لا يعدان عمليتين ترموديناميكيتين وذلك لأن أياً من بارامترات الغاز لا يتغير خلال كل من المشوارين السابقين. إن حجم الغاز في هذين المشوارين ناتج عن تغير كتلة الغاز حصراً وبالتالي لا يمثل الخط (1-4-3-2-1) دورة حرارية مغلقة لأنه في المخطط البياني (مخطط (p,v)) فقط العملية (1←2) هي عملية ترموديناميكية.

عند الانتقال النظامي (النظري) إلى مخطط (p,v) فإن الخط (4←1) سيمثل بالنقطة (1) (حالة الغاز خلال كامل مشوار السحب لا تتغير) كما أن الخط (2←3) سيمثل بالنقطة (2) أي لا يجوز استبدال $1'$ في مخطط (p,v) بـ v نظراً لأن مثل هذا الاستبدال نظامي فقط لحالة ثبات الكتلة. فعند ثبات الكتلة يؤدي استبدال $1'$ بـ v إلى تغير المقياس لا غير ومع ذلك فإن العديد من المراجع يستبدل تجاوزاً $1'$ بـ v. وهذا التجاوز لا يؤدي إلى خطأ في حساب العمل كما سنرى لاحقاً.

مما تقدم ينتج أنه لا توجد دورة حرارية للضاغط حيث خلال كامل دورته الميكانيكية المؤلفة من شوطين للمكبس (أو دورة واحدة للعمود المرفقي) تتم عملية ترموديناميكية وحيدة هي عملية الانضغاط (1←2) أو (1←2') أو (1←2")، انظر الشكل (11-2).

- لتحقيق عملية الانضغاط الإيزوترمية يجب تحريك المكبس بسرعة بطيئة جداً بحيث يمكن لجسم التشغيل ومن خلال تبادله للحرارة مع الوسط المحيط أن يحافظ على درجة حرارة مساوية لدرجة حرارة الوسط المحيط.

- لتحقيق عملية الانضغاط الأديباتي يجب تحريك المكبس بسرعة كبيرة جداً بحيث لا يفسح المجال خلالها لحدوث تبادل حراري بين جسم التشغيل (الغاز) والوسط الخارجي.
- لتحقيق عملية الانضغاط البوليتروبي يجب تنشيط التبادل الحراري بين جسم التشغيل والوسط الخارجي مع تحريك المكبس بسرعة كبيرة وعندها أس البوليتروب يكون بين الواحد و k.

3-11: حساب عمل الضاغط المثالي

العمل المصروف على ضغط الغاز لدورة عمل واحدة (أو لشوطين للمكبس) هو المجموع الجبري للأعمال التالية: عمل السحب W_1 وعمل الانضغاط W_c وعمل الطرد W_2، وندعوه بالعمل النظري ونرمز له بـ W_{th}. نعد عمل السحب موجباً لأن انتقال المكبس يتم باتجاه قوة تأثير الغاز عليه بينما نفترض عملي الانضغاط والطرد سالبين لأن انتقال المكبس يعاكس قوة تأثير الغاز عليه وبالتالي فإن العمل النظري اللازم لتشغيل الضاغط:

$$W_{th} = W_1 + W_c + W_2 \qquad (1\text{-}11)$$

بما أن مشواري السحب والطرد هما عمليتان ميكانيكيتان لملء وإفراغ أسطوانة الضاغط لذلك فإن حسابهما يتم كالتالي:

سنرمز لسطح المكبس بـ A وطول شوط السحب بـ ℓ_1. إن الضغط المطبق على المكبس خلال هذا المشوار ثابت ويساوي لـ p_1 عندها ومن تعريف عمل القوة الثابتة عند تطابق منحاها مع منحى الانتقال:

$$W_1 = F\ell_1 = p_1 A\ell_1 = p_1 V_1 \qquad (أ)$$

نرمز لمشوار المكبس الموافق لعملية الطرد ℓ_2، عندها يكون عمل الطرد:

$$W_2 = -F\ell_2 = -p_2 A\ell_2 = -p_2 V_2 \qquad (ب)$$

في مخطط (p,v) الجداء p_1V_1 الذي يحسب عمل مشوار السحب ليس إلا مساحة المستطيل (4-7-5-1-4) أي المساحة تحت الخط (1-4) كما أن الجداء $-p_2V_2$ الذي يحسب عمل مشوار الطرد هو المساحة (2-6-7-3-2) تحت الخط (3-2). لو أننا

استبدلنا تجاوزاً V بـ v فإن المساحة تحت الخط (4-1) ستقيس العمل النوعي في العملية الإيزوبارية (4←1) (غير الموجودة أصلا) كما أن المساحة تحت الخط (2-3) ستقيس العمل النوعي في العملية الإيزوبارية (2←3) (غير الموجودة أصلا) وهكذا فإن التجاوز في استبدال V بـ v لا يؤثر في حساب عمل الضاغط ولكن يجب الانتباه إلى أن حالة جسم التشغيل خلال كامل مشوار السحب تمثل بالنقطة (1) وحالته خلال كامل مشوار الطرد تمثل بالنقطة (2).

بالنسبة لعملية الانضغاط (1←2) (الشكل 11-2) فإن استبدال V بـ v نظامي لأن كتلة جسم التشغيل خلال العملية ثابتة وعليه فإن المساحة تحت منحني العملية مع محور الحجم v في مخطط (p,v) تقيس عمل العملية وبالتالي فإن العمل النوعي النظري للضاغط يقاس بالمجموع الجبري للمساحات (4-7-5-1-4) (موجبة) و (1-2-6-5-1) (سالبة) و (2-3-7-6-2) (سالبة) أي تتم عملية القياس بالمساحة(1-4-3-2-1) وهي المساحة المحصورة بين منحني عملية الانضغاط (1←2) ومسقطه على محور الضغط p (أي أن النقاط (1-4-3-2-1) تمثل عمل الضاغط المكبسي المثالي).

ملاحظة -1-

للتذكير فقط بأن عمل عملية ترموديناميكية على مخطط (p,v) يقاس بالمساحة المحصورة بين منحني العملية ومحور الحجم النوعي، في حين المساحة المحصورة بين منحني عملية الانضغاط ومحور الضغط تقيس لنا العمل النظري اللازم لتشغيل الضاغط

بما أن عملية الانضغاط (1←2) تعد عملية ترموديناميكية فإن عمل الغاز خلال هذه العملية نحدده من العلاقة (3-3 من كتاب الترموديناميك-الجزء الأول):

(ج) $$W_c = \int_1^2 p\,dV$$

بتبديل (أ) و (ب) و (ج) في العلاقة (1-11) نحصل:

(2-11) $$W_{tc} = p_1V_1 + \int_1^2 p\,dV - p_2V_2$$

وبحسب طبيعة عملية الانضغاط (1←2) نميز بين:

1-عملية الانضغاط الإيزوترمي: (العلاقة 4-24 من كتاب الترموديناميك- الجزء الأول):

$$w_{1\,2} = \int_1^2 p\,dv = RT_1 \ln\frac{v_2}{v_1} = RT_1 \ln\frac{p_1}{p_2} = -RT_1 \ln\frac{p_2}{p_1}$$

ولدينا في هذه العملية $p_1 v_1 = p_2 v_2$ إذا:

$$w_{ik} = -RT_1 \ln\frac{p_2}{p_1} = -p_1 v_1 \ln\frac{p_2}{p_1} \qquad (3\text{-}11)$$

k

تعني الإشارة السالبة بأنه يلزم صرف طاقة من الوسط المحيط لتحقيق عملية الانضغاط.

2-عملية الإنضغاط الأديباتي: (العلاقة 4-39 من كتاب الترموديناميك- الجزء الأول):

$$w_{1\,2} = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_2) = -\frac{R}{k-1}(T_2 - T_1) = -\frac{1}{k-1}(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

بتبديل العلاقة الأخيرة في (2-11) المكتوبة لـ $1kg$ من الغاز:

$$w_{ak} = p_1 v_1 - \frac{1}{k-1}(p_2 v_2 - p_1 v_1) - p_2 v_2$$

$$= \frac{1}{k-1}\left[(k-1)(p_1 v_1 - p_2 v_2) + (p_1 v_1 - p_2 v_2)\right]$$

بالإصلاح:

$$w_{ak} = \frac{k\,R}{k-1}(T_1 - T_2) = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \qquad (4\text{-}11)$$

كما أنه يمكن حساب w_{ak} لحالة عملية الانضغاط الأديباتي (العلاقة 4-38 من كتاب الترموديناميك- الجزء الأول):

$$w_{1\,2} = -\Delta u = -(u_2 - u_1) = u_1 - u_2$$

بالتبديل في (2-11):

$$w_{ak} = p_1 v_1 + (u_1 - u_2) - p_2 v_2 = (p_1 v_1 + u_1) - (p_2 v_2 + u_2)$$

$$w_{ok} = i_1 - i_2 \qquad (5\text{-}11)$$

أي أن العمل النوعي النظري اللازم لتشغيل الضاغط المثالي في حالة الانضغاط الأديباتي يمكن أن نحسبه كفرق إنتالبيي الغاز في بداية عملية الانضغاط ونهايتها.

3-عملية الإنضغاط البوليتروبي:

كما ذكرنا أعلاه فإن قيمة أس البوليتروب لهذه العملية يتراوح من الواحد وحتى k وقيمة w_o تحسب بقوانين عملية الانضغاط الأديباتي وذلك بعد استبدال أس الأديبات k بـ n وبالتالي:

$$w_{on} = \frac{n}{n-1} R (T_1 - T_2) = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \qquad (6\text{-}11)$$

ملاحظة -2-

يمكن حساب قيمة العمل النظري اللازم لتشغيل الضاغط المثالي على اختلاف أنواع عمليات الانضغاط (إيزوترمية – بوليتروبية – أديباتية) بالعلاقة المعممة التالية:

$$w_{on} = n\, w_k$$

حيث w_k عمل عملية الانضغاط

n أس البوليتروب الموافق لعملية الانضغاط.

فإذا كانت عملية الانضغاط (1←2) على سبيل المثال أديباتية هذا يعني أن أس البوليتروب هو k لهذه العملية وعملها:

$$w_k = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2)$$

وعندها: $$w_{ok} = k\, w_k = k \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2)$$

إن جداء العمل النوعي النظري اللازم لتشغيل الضاغط (المعادلات (3-11) و (4-11) و (6-11)) بالتدفق الكتلي لجسم التشغيل(وهو كمية الغاز أو البخار الداخلة إلى أسطوانة الضاغط عند شروط السحب في واحدة الزمن) يحدد الاستطاعة النظرية للضاغط N (بعد أن نأخذ قيمة العمل النظري بالقيمة المطلقة).

لحالة الضاغط الإيزوترمي:

$$N_t = p_1 v_1 \dot{m} \ln \frac{p_2}{p_1} = p_1 \dot{V}_1 \ln \frac{p_2}{p_1} \qquad (7\text{-}11)$$

لحالة الضاغط الأدياباتي:

$$N_k = \frac{k}{k-1} \dot{m} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \qquad (8\text{-}11)$$

لحالة الضاغط البوليتروبي:

$$N_n = \frac{n}{n-1} \dot{m} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \frac{n}{n-1} p_1 \dot{V}_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \qquad (9\text{-}11)$$

ملاحظة -3-

يمكن حساب الاستطاعة النظرية للضاغط المكبسي مباشرة من علاقة العمل النوعي النظري اللازم لتشغيل الضاغط وذلك في حال كان معلوم لدينا الإنتاجية الحجمية للضاغط والتي نرمز لها بـ $\dot{V}$ (حيث $\dot{V}$ الإنتاجية الحجمية لضاغط وحيد المرحلة $\left[m^3 / s \right]$)، وهي حجم الغاز أو البخار الداخل إلى أسطوانة الضاغط في واحدة الزمن عند شروط السحب). (سواء كانت عملية الانضغاط: إيزوتيرمية – أديباتية – بوليتروبية) وذلك بعد استبدال $\dot{V}$ بدلاً من v_1 الداخلة في علاقات العمل النظري اللازم لتشغيل الضاغط (بعد أن نأخذ قيمة العمل النظري بالقيمة المطلقة).

مثلاً للضاغط الإيزوترمي:

$$w_{tt} = R T_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$

تصبح:

$$N_t = p_1 \dot{V} \ln \frac{p_2}{p_1} \qquad (11\text{-}10)$$

وبالأسلوب نفسه يمكن الحصول من علاقات العمل النوعي النظري لحالات الانضغاط البوليتروبي والأدياباتي على علاقات الاستطاعة النظرية الموافقة لكلا عمليتي الانضغاط.

يمكن التحقق من الشكل (11-2) أن الضاغط الايزوترمي من ناحية توفير الطاقة هو الأفضل بين الضواغط الثلاثة السابقة حيث العمل w_{12} المصروف على تحقيق دورة عمل الضاغط (وبالتالي من حيث الاستطاعة اللازمة لتحقيق إنتاجية محددة للضاغط) هو الأقل ومن ثم يليه الضاغط البوليتروبي وأخيراً الضاغط الأديباتي وذلك لأن: المساحة (4-3-2"-1) < المساحة (4-3-2-1) < المساحة (4-3-2'-1)

يظهر على الشكل (11-4) تمثيل عمليات الانضغاط الثلاثة: (الإيزوترمية (1←2') والبوليتروبية (1←2) والأديباتية (1←2") على مخطط (T,s).



الشكل (11-4): عمليات الانضغاط الثلاثة على مخطط (T,s)

مثال 11-1:

تبلغ الإنتاجية الحجمية لضاغط مكبسي هوائي مثالي وحيد المرحلة $0.2 m^3/s$ وذلك عند درجة حرارة سحب $t_1 = 27°C$ وضغط $p_1 = 1 bar$. قيمة الضغط النهائي للهواء $p_2 = 8 bar$. أوجد درجة حرارة الهواء في نهاية عملية الانضغاط والعمل النظري اللازم لتشغيل الضاغط والاستطاعة المصروفة للحصول على الهواء المضغوط وذلك في الحالات التالية:

أ) عند الانضغاط الإيزوترمي،

ب) عند الانضغاط البوليتروبي $(n = 1.2)$،

ت) عند الانضغاط الأديباتي $(k = 1.4)$.

الحل:

أ) الاحتمال الأول أن عملية الانضغاط إيزوترمية عندها:

$$T_2 = T_1 = 27 + 273 = 300\,K$$

يحسب العمل النظري اللازم لتشغيل الضاغط الإيزوترمي من العلاقة (3-11):

$$w_{ot} = -RT_1 \ln\frac{p_2}{p_1} = -p_1 v_1 \ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$w_{ot} = -\frac{8314\times 300}{29\times 10^3}\ln\frac{8}{1} = -178.84\,kJ/kg$$

وتحسب الاستطاعة المصروفة من العلاقة (7-11):

$$N_t = p_1 \dot{V} \ln\frac{p_2}{p_1} = \frac{10^5}{10^3}\times 0.2\ln\frac{8}{1} = 41.5\,kW$$

ب) عملية الانضغاط البوليتروبية:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 300\left(\frac{8}{1}\right)^{\frac{0.2}{1.2}} = 424\,K$$

يحسب العمل النظري اللازم لتشغيل الضاغط البوليتروبي من العلاقة (6-11):

$$w_{op} = \frac{nR(T_1 - T_2)}{n-1} = \frac{1.2\times 8314\times(300-424)}{29\times(1.2-1)\times 10^3} = -213.29\,kJ/kg$$

أما الاستطاعة فتحدد من العلاقة (9-11) بعد أخذ القيمة المطلقة:

$$N_p = \frac{n}{n-1} p_1 \dot{V}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

$$= \frac{1.2}{0.2}\times\frac{10^5}{10^3}\times 0.2\left(8^{\frac{0.2}{1.2}} - 1\right) = 49.6\,kW$$

ت) لحالة الانضغاط الأديباتي:

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 300\times 8^{\frac{0.4}{1.4}} = 544\,K$$

يحسب العمل النظري اللازم لتشغيل الضاغط الأدياباتي من العلاقة (11-4):

$$w_{ad} = -\frac{k\,R(T_1 - T_2)}{k-1} = -\frac{1.4\times 8314\times(300-544)}{29\times(1.4-1)\times 10^3} = -244.83\,kJ/kg$$

والاستطاعة نحسبها من العلاقة (11-8):

$$N_{ad} = -\frac{k}{k-1}\,p_1 V\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]$$

$$N_{ad} = -\frac{1.4}{0.4}\times\frac{10^5}{10^5}\times 0.2\left(8^{\frac{0.4}{1.4}} - 1\right) = -56.7\,kW$$

وكما نلاحظ أن الاستطاعة المصروفة هي أقل ما يمكن في الضاغط الإيزوترمي ثم البوليتروبي وأخيرا الأدياباتي.

مثال 11-2

أوجد قيمة الضغط الأعظمي المسموح بها لضاغط مكبسي مثالي هوائي وحيد المرحلة p_2 إذا علمت أن درجة حرارة الاشتعال الذاتي لزيت التزييت $t_M = 270°C$، درجة حرارة الهواء الخارجي الداخل للضاغط $t_a = 27°C$، ضغط الهواء البدائي $p_1 = 1\,bar$. تتم عملية الانضغاط وفق الأدياباتي $(k = 1.4)$.

الحل

نفترض أن درجة حرارة الهواء الأعظمية المسموح بها في نهاية عملية الانضغاط مساوية درجة حرارة الاشتعال الذاتي للزيت وبالتالي:

$$T_2 = t_M + 273 = 543\,K$$

درجة حرارة الهواء في بداية عملية الانضغاط نفترضها مساوية لدرجة حرارة الهواء الخارجي أما الضغط فهو $p_1 = 1\,bar$ وبالتالي فإن قيمة الضغط النهائي الأعظمية المسموح بها تتحدد:

$$p_3 = p_1\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 1\times\left(\frac{543}{300}\right)^{\frac{1.4}{0.4}} \approx 7.97\,bar$$

4-11: دورة عمل الضاغط المكبسي الفعلي

تختلف دورة عمل الضاغط المكبسي الفعلي عن النظري بسبب وجود جملة من العوامل التي تؤدي بالنتيجة إلى انخفاض في إنتاجية الضاغط الفعلي أهمها:

أ- وجود الفراغ الميت (الحجم الضار):

يحصر المكبس عند وجوده في النقطة الميتة العليا مع السطح الداخلي للأسطوانة الغاز أو البخار المضغوط بضغط عال p_3 من نهاية عملية الطرد لدورة عمل الضاغط السابقة، الحجم المحصور هذا ندعوه بالحجم الضار أو حجم الفراغ الميت، الذي يتألف من الحجوم التالية:

أ- -جزء من حجم الأسطوانة بارتفاع يساوي الفراغ الميت الخطي. الفراغ الميت الخطي: هو المسافة بين رأس المكبس عند وجوده في النقطة الميتة العليا (للضواغط العمودية البسيطة) وسقف الأسطوانة.

ب- الحجم الحلقي بين جدران المكبس والأسطوانة على ارتفاع يساوي المسافة من رأس المكبس إلى أول حلقة إحكام.

ت- حجم الأقنية التي تصل الأسطوانات بالصمامات.

يؤثر هذا الحجم تأثيرا سلبيا في إنتاجية الضاغط الفعلي، حيث أن الغاز (أو البخار) المحصور بداخله من نهاية دورة عمل الضاغط السابقة يكون ضغطه p_3 أكبر من ضغط الغاز (أو البخار) الداخل إلى أسطوانة الضاغط عند شروط السحب p_1. عند الحركة العكسية للمكبس من (ن.م.ع) إلى (ن.م.س) تبدأ عملية السحب فقط بعد أن يتمدد الغاز المضغوط المتبقي في الفراغ الميت وينخفض ضغطه حتى ضغط السحب. هذه العملية تتم خلال جزء من مشوار المكبس وندعوها بالتمدد العكسي. وبهذا الشكل فإن وجود الفراغ الميت يقلل من إنتاجية الضاغط الفعلي.

2- الضياعات الهيدروليكية:

وجود جسمي صمامي السحب والطرد في مجرى جريان الغاز (أو البخار) عند الدخول والخروج يعدان مقاومتين هيدرولكيتين باتجاه الجريان، أضف إلى ذلك ضياع الضغط في قنوات السحب والطرد وهذا كله يؤدي إلى انخفاض الإنتاجية الحجمية للضاغط الفعلي.

3- تسخين البخار :

يؤدي ارتفاع درجة حرارة الهواء (أو البخار) الداخل إلى الضاغط في الجزء بين فتحة السحب وأسطوانة الضاغط إلى ازدياد حجمه النوعي (انخفاض كثافته) وبالتالي تنخفض كتلته (أي تنخفض الإنتاجية الكتلية للضاغط الفعلي...)

4- التبادل الحراري في الأسطوانة:

خلال عمليتي الانضغاط والتمدد العكسي يحدث تبادل حراري بين البخار وجدران الأسطوانة والمكبس ويكون هذا التبادل ذا اتجاهات وشدات مختلفة. بنتيجة ذلك فإن دليل البوليتروب في هذه الإجراءات يكون ذا قيمة متغيرة وفعالية عمل الضاغط تنخفض.

5- تذبذب الضغط في قناتي الأسطوانة:

ذكرنا سابقا أن الضواغط المكبسية تعتمد في مبدأ عملها على إنقاص حجم الفراغ العامل وأن عملية الحصول على الغاز (أو البخار) المضغوط يتم بصورة دورية (حيث تأتي اللحظة التي يغلق فيها صمامي السحب والطرد لتجري عملية الانضغاط) هذا يعني أن دخول الغاز (أو البخار) وخروجه من الضاغط يكون بسرعة متغيرة الأمر الذي يؤدي إلى تذبذب كل من سرعة وتدفق الغاز (أو البخار) وبالتالي إلى تذبذب الضغط في قناتي الأسطوانة وهذا ينعكس على شكل تيار الغاز في الأقنية فبدلا من أن يكون تيارا مستمرا للغاز يصبح تدفق الغاز على شكل نبضات، ويتجلى هذا الأثر بشكل كبير في الضواغط المتعددة المراحل حيث لا يدخل الغاز القادم من مرحلة الضغط الأولى إلى مرحلة الضغط الثانية في الوقت نفسه بسبب وجود فراغ فاصل بين المرحلتين. إن تذبذب الضغط يزيد من الاستطاعة اللازمة لتدوير الضاغط، ولكن في بعض الحالات يزيد من الإنتاجية الفعلية بالمقارنة مع النظرية.

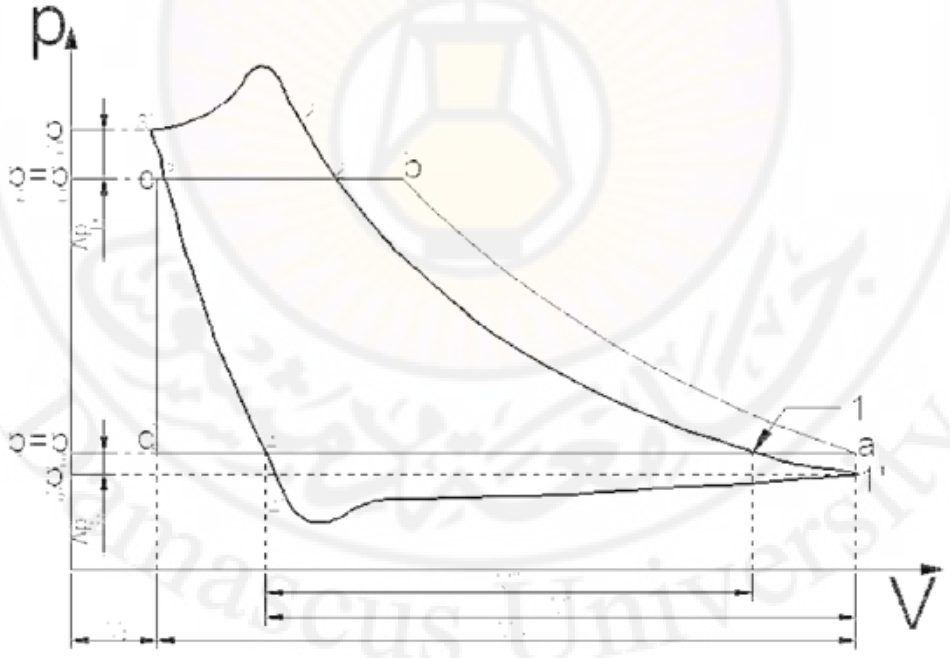
6- التسرب:

يمكن أثناء عمل الضاغط أن يحدث تسرب عبر الخلوصات المختلفة لأجزاء الضاغط مثل: حلقات الإحكام، الخلوص بين المكبس والحلقات وجدران الأسطوانة، عبر الصمامات غير المحكمة وغير ذلك.

7- الاحتكاك:

جزء من الطاقة اللازمة لتدوير الضاغط الفعلي يصرف للتغلب على الاحتكاك في محامل الضاغط.

إن تأثير جزء كبير من العوامل السابقة ينعكس على المخطط البياني الفعلي والذي يساعد على إجراء التحليل الكيفي والكمي للإجراءات الفعلية للضاغط. الإجراءات الفعلية تختلف بشكل ملموس عن الإجراءات النظرية. وهذا واضح بمقارنة المخطط البياني النظري (a-b-c-d) والفعلي ('4-'3-'2-'1) للضاغط. الشكل (11-5).



الشكل (11-5): المخطط البياني الفعلي

إجراء السحب ('4←'1) يتم عند ضغط متغير وأكثر انخفاضاً من الضغط في فتحة السحب ($p_1 = p_s$). توافق النقطتان ('1 و '4) بداية فتح صمام السحب وإغلاقه

تماماً بالتتالي. فرق الضغط بين فتحة السحب والأسطوانة خلال الإجراء ('4←'1) ناتج عن مقاومة حركة البخار على الطريق بينهما، وإن تغير قيمة هذا الفرق مقرونة بحالتين: الأولى تغير نسبة فتح صمام السحب، والثانية تغير سرعة البخار فيه من جراء تغير سرعة المكبس.

إن الفرق بين الضغط في الفتحة p_s وفي بداية عملية الانضغاط p'_s يسمى هبوط الضغط على السحب. نشاهد صورة مشابهة في إجراء الطرد ('2←'3). هنا النقطة ('2) توافق لحظة فتح صمام الطرد. وبسبب كون الفتحة صغيرة عند بداية فتح الصمام فإن الضغط يستمر بالارتفاع حتى بعد بداية فتح الصمام، وبعد الوصول إلى القيمة الأعظمية ينخفض الضغط قبل الصمام ولكنه في نهاية الدفع (الطرد) يبقى أيضاً أعلى من الضغط في فتحة الدفع. يسمى الفرق بين p_D في النقطة ('3) والضغط $p_D = p_2$ هبوط الضغط على خط الدفع.

5-11 إنتاجية الضاغط الفعلي

تختلف إنتاجية الضاغط الفعلي عن الضاغط المثالي بسبب الضياعات الحجمية الآنفة الذكر، ولتحديد الإنتاجية الفعلية تم إدخال مفهوم معامل التغذية (أو معامل الملء) والذي نرمز له بـ λ وهو بالتعريف:

$$\dot{V}_r = \lambda \dot{V}_t \qquad (11\text{-}11)$$

حيث $\dot{V}_r$ الإنتاجية الحجمية للضاغط الفعلي.

$\dot{V}_t$ الإنتاجية الحجمية للضاغط النظري.

يمكن تحديد λ بدلالة الإنتاجية الكتلية وذلك بعد قسمة طرفي المساواة (11-11) على الحجم النوعي v_1 للبخار عند الضغط ودرجة الحرارة في فتحة السحب:

$$\lambda = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_t} \qquad (12\text{-}11)$$

حيث $\dot{m}_r$ الإنتاجية الكتلية للضاغط الفعلي.

$\dot{m}_t$ الإنتاجية الكتلية للضاغط النظري.

وبالتالي تتحدد الإنتاجية الكتلية للضاغط الفعلي بالعلاقة:

$$\dot{m}_r = \lambda \dot{m}_t \qquad (13\text{-}11)$$

من العلاقة (11-13) نجد أن معامل الملء هو كمية الغاز الحقيقية الداخلة إلى الضاغط عند شروط السحب السائدة ($\dot{m}_r$) إلى كمية الغاز النظرية ($\dot{m}_t$).

يمكن التعبير عن معامل التغذية على أنه جداء عدة معاملات:

$$\lambda = \lambda_c \cdot \lambda_D \cdot \lambda_w \cdot \lambda_l \qquad (14\text{-}11)$$

حيث:

- λ_c المعامل الحجمي وهو يأخذ بعين الاعتبار الضياعات الحجمية الحاصلة عن وجود حجم الفراغ الميت (الحجم الضار في الضاغط).
- λ_D معامل الخنق أو معامل الضغط وهو يعكس الضياعات الحاصلة في إنتاجية الضاغط المكبسي الفعلي من جراء المقاومات الهيدروليكية لجسمي صمامي السحب والطرد تجاه دخول الغاز (أو البخار) وخروجه.
- λ_w المعامل الحراري أو معامل التسخين وهو يعكس الضياعات الحاصلة في إنتاجية الضاغط المكبسي الفعلي من جراء التبادل الحراري بين الغاز (أو البخار) الداخل وجسم الضاغط.
- λ_l معامل الإحكام وهو يعكس الضياعات الحاصلة في إنتاجية الضاغط المكبسي الفعلي من جراء تسرب الغاز من أساور إحكام المكبس والصمامات وغيرها.

يمكن تحديد المعاملين λ_c و λ_D بوساطة المخطط البياني لذلك فإن جداءهما $\lambda_i = \lambda_c \cdot \lambda_D$ يسمى المعامل البياني. معاملا التسخين λ_w والإحكام λ_l لا يمكن تحديدهما بالمخطط البياني لذلك يسمونهما أحياناً معاملات الضياعات الخفية.

11-5-1 المعامل الحجمي λ_c

يسمى أحياناً بمعامل الحجم الميت وينتج عن الضياع الحجمي بسبب تمدد الغاز المتبقي في حجم الفراغ الميت (الحجم الضار) وذلك عند حركة المكبس من النقطة الميتة العليا باتجاه النقطة الميتة السفلى. ويمكن تحديده بمساعدة الشكل (11-5).

يحدد المعامل الحجمي λ_c بالعلاقة:

$$\lambda_v = \frac{V'}{V_{h1}} \qquad (15\text{-}11)$$

حيث V' حجم السحب الفعلي والذي يمكن التعبير عنه بالعلاقة:

$$V' = V_{h1} + V_c - V_4$$

V_h الحجم العامل.

V_c حجم الفراغ الميت(الحجم الضار). والذي يمكن أن نعبر عنه من خلال قيمته النسبية C:

$$V_c = C V_{h1}$$

ندعو C الفراغ النسبي الميت وتبلغ قيمته لمعظم الضواغط الحديثة 5% 3، أما في الضواغط ذات التصميم الخاص، مثلاً ذات درجات الحرارة المنخفضة يمكن أن ينخفض حتى 2% – 1.5.

إذا افترضنا أن عملية التمدد العكسي (3'—4) تتم وفق عملية بوليتروبية وعلى فرض أن:

$$V_3' = V_c = C V_{h1}$$

فإن الحجم V_4 يحدد من معادلة العملية البوليتروبية:

$$V_4 = C V_{h1} \left(\frac{p_2'}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}$$

بوضع قيم V_c و V_4 في العلاقة (15-11) نحصل على:

$$\lambda_v = \frac{V_{h1} + C V_{h1} - C V_{h1} \left(\frac{p_2'}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}}{V_{h1}}$$

وعلى فرض أن $p_2' = p_2 + \Delta p_2$ نجد:

$$\lambda_v = 1 - C \left[\left(\frac{p_2 + \Delta p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \qquad (16\text{-}11)$$

عند عدم وجود انضغاط (أي ضغط الدفع يساوي لضغط السحب) تكون قيمة $\chi = 1$ ومنه $\lambda_{c} = 1$ (χ تدعى نسبة ازدياد الضغط للضاغط وهي نسبة ضغط الدفع إلى ضغط السحب). من هنا نستنتج أنه كلما ازدادت قيمة χ انخفضت قيمة المعامل الحجمي λ_{c}. يبين الشكل (11-6) تأثير زيادة χ على λ_{c} وكما نلاحظ أن النقطة (4) التي تمثل حالة الغاز المتمدد تتحرك باتجاه النقطة (1) وذلك بزيادة χ. في اللحظة التي تنطبق فيها النقطة (4) على النقطة (1) عندها ينطبق كامل الخط (1←2) الممثل لعملية الانضغاط على الخط (4←1) الممثل لعملية السحب وعندها يصبح الفراغ النسبي الميت مساوي للصفر:



الشكل (11-6): تاثير زيادة χ على λ_{c}

$$\lambda_{c} = 1 - C\left(\chi^{\frac{1}{n}} - 1\right) = 0$$

ومنه:

$$\chi = \left(\frac{1}{C} + 1\right)^{n} \qquad (11\text{-}7)$$

مثال 11-3:

يرفع ضاغط بمرحلة واحدة، (القيمة النسبية لمعامل الفراغ الميت لهذا الضاغط $C = 0.05$)، ما مقداره $400\,m^3/h$ هواء من الشروط الطبيعية ذات الضغط $p_1 = 1\,bar$ ودرجة الحرارة $t_1 = 20°C$ حتى الضغط $p_2 = 7\,bar$، تتم كل من عمليتي الانضغاط والتمدد وفق منحن بوليتروبي حيث $n = 1.3$. احسب استطاعة المحرك الكهربائي للضاغط والمعامل الحجمي لهذا الضاغط إذا كان مردود الضاغط الكلي والفعال $\eta = 0.7$.

الحل:

يكافئ عمل الضاغط المساحة (4-3-2-1)، الشكل (11-7) والتي تساوي فرق المساحتين: (5-6-3-4) – (5-6-2-1). إذ تكافئ كل من هاتين المساحتين بدورهما عمل ضاغط مثالي (بدون فراغ ميت) أي:

$$w_o = w_{1\,2\,6\,5\,1} - w_{4\,3\,6\,5\,4}$$

$$= \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] - \frac{n}{n-1} p_4 v_4 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$= \frac{n}{n-1} p_1 (v_1 - v_4) \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

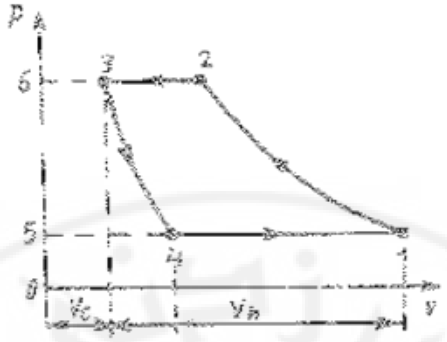
إذا كان حجم السحب للضاغط $1\,m^3$ عندها يكون $v_1 - v_4 = 1$ وبالتالي يحسب العمل النوعي لـ $1\,kg$ بالمعادلة:

$$w_{oo} = \frac{n}{n-1} p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{1.3}{0.3} \times 10^5 \left[\left(\frac{7}{1} \right)^{\frac{0.3}{1.3}} - 1 \right] = 245{,}627\,J/kg$$

استطاعة المحرك الكهربائي اللازم وصله بالضاغط:

$$N = \frac{400}{3{,}600} \times \frac{245{,}627}{1{,}000} \times \frac{1}{0.7} = 39\,kW$$

علاقة المعامل الحجمي:



الشكل (11-7): تابع للمثال (11-3)

$$\lambda_c = \frac{v_3 - v_4}{v_h}$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \times 293}{1 \times 10^5} = 0.84\, m^3/kg$$

$$v_h = v_1 - v_c$$

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_c} \Rightarrow v_c = \frac{v_h}{\varepsilon - 1}$$

$$v_h = v_1 - \frac{v_h}{\varepsilon - 1}$$

$$v_h = \frac{v_1}{1 + \frac{1}{\varepsilon - 1}} = \frac{0.84}{1 + 0.05} = 0.8\, m^3/kg$$

$$v_c = v_1 - v_h = 0.84 - 0.8 = 0.04\, m^3/kg$$

$$v_4 = v_3 \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{1}{n}} = v_c \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} = 0.04 \times 7^{\frac{1}{1.3}} = 0.179\, m^3/kg$$

ومنه:

$$\lambda_c = \frac{0.84 - 0.179}{0.8} = 0.826$$

كما يمكن حساب λ_c من العلاقة:

$$\lambda_c = 1 - \frac{1}{\varepsilon - 1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right] = 1 - \frac{1}{0.05} \times \left(7^{\frac{1}{1.3}} - 1\right) = 0.827$$

مثال 11-4:

لدينا ضاغط آزوت يحافظ على ضغط قدره 10 ضغط جوي في خزان للآزوت المضغوط والذي يقوم بتعبئة بالونات سعة كل منها 80 ليترا. يقوم الضاغط بتعبئة 300 بالون في الساعة عند درجة حرارة للآزوت $t = 60°C$، على فرض أن الغاز يبرد ضمن مجمع الغاز من الدرجة $t = 110°C$ إلى الدرجة $t = 60°C$، شروط دخول الآزوت إلى الضاغط $t = -10°C$، 1.1 ضغط جوي. احسب عمل الضاغط واستطاعة كل من الضاغط والمحرك الكهربائي وتصريف الضاغط في الساعة.

الحل:

$$\dot{V}_2 = 0.08 \times 300 = 24\, m^3/h$$

تتحدد كتلة الغاز من:

$$\dot{m} = \frac{p_2 \dot{V}_2}{R T_2} = \frac{10 \times 10^5 \times 24}{297 \times 333} = 242.6\, kg/h$$

العمل اللازم في حالة الانضغاط الإيزوترمي لـ $1kg$ آزوت:

$$w_{iso} = m R T_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = 1 \times 297 \times 263 \ln \frac{10}{1.1} = 172.4\, kJ/kg$$

استطاعة الضاغط:

$$N_{iso} = \dot{m} w_{iso} = \frac{242.6}{3600} \times 172.4 = 11.6\, kW$$

إذا افترضنا أن المردود في حالة الانضغاط الإيزوترمي $\eta_{iso} = 0.65$ تحسب استطاعة المحرك الكهربائي اللازم:

$$N_E = \frac{N_{iso}}{\eta_{iso}} = \frac{11.6}{0.65} = 17.87\, kW$$

العمل في حالة الانضغاط الأديباتي لـ $1kg$ من الآزوت:

$$w_{ad} = \frac{k}{k-1} RT \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$w_{ad} = \frac{1.4}{0.4} \times 297 \times 263 \left[\left(\frac{10}{1.1} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right] = 240\, kJ/kg$$

بفرض أن مردود الضاغط في حالة الانضغاط الأديباتي $\eta_a = 0.9$ فتكون استطاعة المحرك الكهربائي اللازم:

$$N_E = \frac{240 \times 242.6}{3600 \times 0.9} = 18\, kW$$

من خلال معرفة درجات حرارة وضغوط الحالة البدائية والنهائية نستنتج أن الضاغط يعمل عمل انضغاط بوليتروبي إذ يمكن تحديد أس البوليتروب من العلاقة:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

أو :

$$\frac{10}{1.1} = \left(\frac{273 + 110}{273 - 10} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

ومنه بأخذ لغاريتم الطرفين والإصلاح نجد $n = 1.205$.

العمل في حالة الانضغاط البوليتروبي:

$$w_{pol} = \frac{n}{n-1} RT \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1.205}{0.205} \times 297 \times 263 \left[\left(\frac{10}{1.1} \right)^{\frac{0.205}{1.205}} - 1 \right] = 209.3\, kJ/kg$$

استطاعة الضاغط:

$$N_p = \frac{209.3 \times 242.6}{3600} = 14.1\, kW$$

بفرض أن η_p في حالة الانضغاط البوليتروبي تساوي 0.8 تكون استطاعة المحرك الكهربائي اللازم:

$$N_L = \frac{14.1}{0.8} = 17.6kW$$

6-11: كمية الحرارة المطروحة خلال عملية الانضغاط

نتيجة عملية الانضغاط ترتفع درجة حرارة الهواء (أو الغاز أو البخار) المضغوط الأمر الذي يستوجب سحب هذه الحرارة كي لا تؤثر في عمل الضاغط، وكما هو معروف فإن عملية الانضغاط قد تكون إيزوترمية أو أديباتية أو بوليتروبية وبالتالي نميز بين كمية الحرارة المطروحة خلال عملية الانضغاط في :

١- الضاغط الإيزوترمي: وفيه تكون عملية الانضغاط (1←2) إيزوترمية (العملية 1←2' على الشكل (11-2)) ولحساب كمية الحرارة الضائعة خلال هذه العملية نستخدم:

$$q_{1\,2} = RT\ln\frac{p_1}{p_2} \qquad (18\text{-}11)$$

٢- الضاغط الأديباتي: وفيه تكون عملية الانضغاط (1←2) أديباتية (العملية 1←2" على الشكل (11-2)) وخلال هذه العملية تكون كمية الحرارة المتبادلة مساوية للصفر .

٣- الضاغط البوليتروبي: وفيه تكون عملية الانضغاط (1←2) بوليتروبية (العملية 1←2 على الشكل (11-2)):

$$dq = c\,dT \Rightarrow q = c(T_2 - T_1)$$

$$q = c_{\cdot}\frac{n-k}{n-1}(T_2 - T_1) = \frac{R}{k-1}\frac{n-k}{n-1}(T_2 - T_1) \qquad (19\text{-}11)$$

ولما كان $\frac{R}{n-1}(T_2 - T_1) = -w_{pol}$ (العمل في العملية البوليتروبية) نكتب العلاقة الأخيرة بالشكل:

$$q = w_{pol}\frac{n-k}{k-1} = \frac{k-n}{k-1}w_{pol}$$

$$q = \frac{k}{k-1}\frac{n}{n} w_{an} \qquad (20\text{-}11)$$

حيث w_{an} العمل النظري اللازم لتشغيل الضاغط البوليتروبي.

مثال 11-5

ضاغط مكبسي مثالي يتألف من مرحلة واحدة يضغط هواء ذا ضغط ابتدائي $p_1 = 1 at$ ودرجة حرارة $t_1 = 20°C$ حتى الضغط $p_2 = 4.5 at$ ، قيمة أس الانضغاط البوليتروبي $n = 1.3$. أوجد العمل المصروف في الضاغط والحرارة المطروحة في مجموعة التبريد، ثم قارن العمل المصروف مع العمل في حالة الانضغاط الأديباتي والإيزوترمي.

الحل:

العمل في حالة الانضغاط البوليتروبي:

$$w_{an} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1.3}{0.3} \times 10^4 \times 0.856 \left[\left(\frac{4.5}{1} \right)^{\frac{0.3}{1.3}} - 1 \right] = 15,392\, kgf\, m / kg$$

إذ تم حساب v_1 من العلاقة:

$$v_1 = \frac{R T_1}{p_1} = \frac{29.27 \times 293}{1 \times 10^4} = 0.857\, m^3 / kg$$

درجة الحرارة في نهاية عملية الانضغاط:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 293 \times 4.5^{\frac{0.3}{1.3}} = 414.6\, K$$

تحسب قيمة تغير الإنتالبي للجسم العامل (الهواء) نتيجة عملية الانضغاط بالعلاقة:

$$\Delta i = c_p (T_2 - T_1) = 0.24(414.6 - 293) = 29.2\, kcal/kg$$

كمية الحرارة المكافئة لعمل الانضغاط:

$$w_i = \frac{15.392}{427} = 36\, kcal/kg$$

كمية الحرارة المطروحة في المبرد:

$$q = 29 - 36 = -7\, kcal/kg$$

حالة الانضغاط الأديباتي:

$$w_{ad} = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$w_{ad} = \frac{1.4}{0.4} \times 10^4 \times 0.856 \left[(4.5)^{0.3} - 1 \right] = 15.084\, kgf\,m/kg$$

كمية الحرارة المكافئة للعمل:

$$w_i = \frac{16.084}{427} = 37.7\, kcal/kg$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \times 4.5^{0.4} = 450.3\, K$$

$$\Delta i = c_p (T_2 - T_1) = 0.24 \times (450.3 - 293) = 37.7\, kcal/kg$$

نلاحظ أن $w_{ad} = \Delta i$ ، أي أن كامل العمل المبذول لتحقيق الانضغاط قد تحول إلى حرارة ضمن الغاز المضغوط.

حالة الانضغاط الإيزوترمي:

$$w_{th} = R T_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = 29.7 \times 293 \ln\left(\frac{4.5}{1}\right) = 13,088\, kgf\,m/kg$$

$$w_h = \frac{13,088}{427} = 30.65\, kcal/kg$$

$$\Delta i = 0$$

$$q = w_h = 30.65\, kcal/kg$$

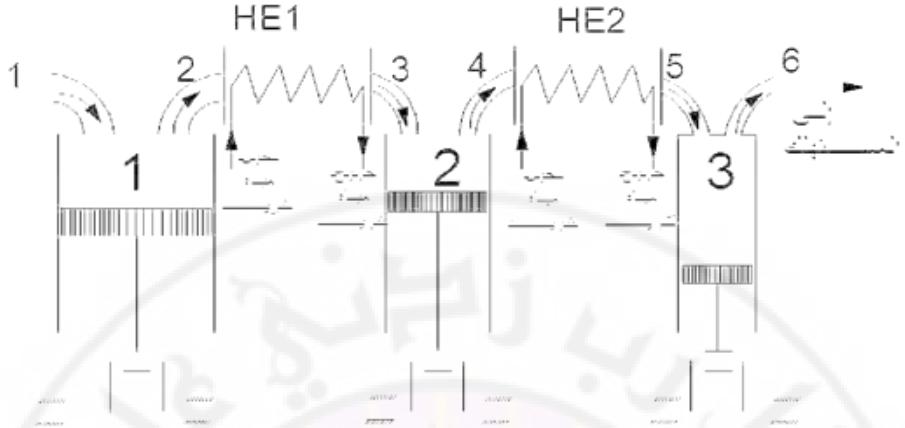
7-11: الضواغط متعددة المراحل

لقد دلت التجارب على أنه من المناسب استخدام ضواغط أحادية المرحلة من أجل الحصول على ضغط حتى $10\, bar$ أما إذا أردنا الحصول على غاز بضغوط مرتفعة (قد تصل إلى $1,000\, bar$) فلا ينصح باستخدام ضواغط أحادية المرحلة وذلك لأن درجة حرارة الغاز المضغوط T_2 سوف تزيد عن الحد المسموح به وهذا واضح من العلاقة التالية $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\chi-1}{\chi}}$ وذلك لحالة الانضغاط الأديباتي حيث أنه بازدياد $\chi = \frac{p_2}{p_1}$ تزداد معها T_2 التي قد تصل إلى درجة حرارة الاشتعال الذاتي لزيت التزييت.

لهذا وعندما نريد الحصول على ضغوط عالية نستخدم ضواغط متعددة المراحل حيث تجري عملية الانضغاط فيها بصورة متتالية على عدة مراحل.

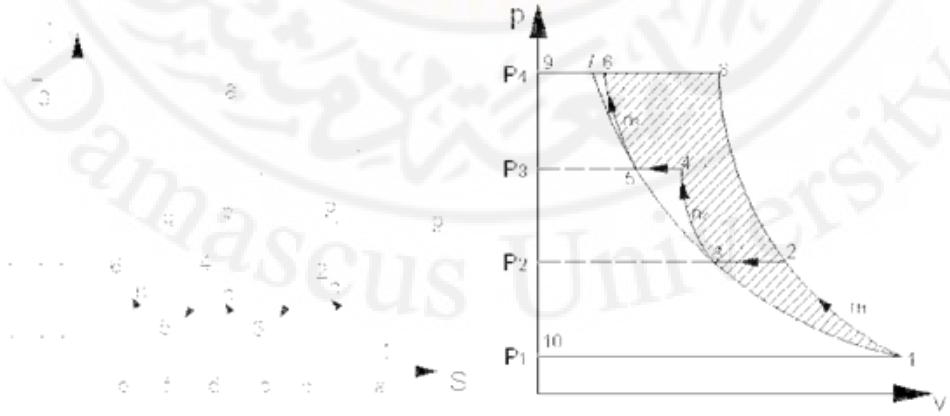
الغاز المضغوط في المرحلة الأولى يعبر إلى أسطوانة المرحلة الثانية مارا بمبرد بيني (مبادل حراري) حيث تجري فيه عملية تبريد للغاز المضغوط قبل دخوله إلى المرحلة الثانية وعملية التبريد هذه تتم عند الضغط الثابت p_2 الذي وصل إليه الغاز في نهاية المرحلة الأولى وعملية التبريد يفضل أن تستمر حتى الوصول إلى درجة حرارة الدخول البدائية للغاز في المرحلة الأولى T_1.

يبين الشكل (11-8) شكلا توضيحيا لضاغط هوائي مكبسي بوليتروبي ثلاثي المراحل مؤلف من ثلاث أسطوانات (1) و (2) و (3) مع مكابسها (تحصل المكابس على حركتها من عمود المرفق) بالإضافة إلى المبردين البينيين لتبريد الهواء بين المراحل.



الشكل (11-8): مخطط ضاغط مكبسي بوليتروبي ثلاثي المراحل، HE1 و HE2 مبادلان حراريان من أجل تبريد الهواء المضغوط: HE1 بعد مرحلة الانضغاط الأولى، HE2 بعد مرحلة الانضغاط الثانية

يمثل الخط (10←1) على (الشكل 11-9-أ) مشوار السحب لمكبس أسطوانة المرحلة الأولى بعدها يضغط الهواء وفق العملية البوليتروبية (1←2) فيزداد الضغط من p_1 وحتى p_2 . في العملية الإيزوبارية (2←3) يتم تبريد الهواء المضغوط في المبادل الحراري الأول (HE1). بعدها يُضغط الهواء في أسطوانة المرحلة الثانية وفق العملية البوليتروبية (3←4) فيزداد الضغط حتى p_3 ومن ثم يبرد في المبادل الحراري الثاني (HE2) وذلك وفق العملية الإيزوبارية (4←5). في العملية البوليتروبية (5←6) يضغط الهواء من p_3 وحتى القيمة p_1 وذلك في أسطوانة المرحلة الثالثة حيث يرسل الهواء المضغوط بعدها إلى "المستهلك" ببارامترات النقطة (6) (خزان التجميع).



-ب- -أ-

الشكل (11-9): تمثيل دورة عمل الضاغط المكبسي المثالي المراحل على مخطط (p,v) و (T,s)

فإذا افترضنا أن:

١- درجة حرارة دخول الهواء إلى كل مرحلة هي نفسها $(T_1 = T_3 = T_5)$.

٢- درجة حرارة خروج الهواء المضغوط من جميع المراحل هي نفسها أيضا $(T_2 = T_4 = T_6)$.

٣- أس البوليتروب لمراحل الانضغاط الثلاثة هو واحد أي $n_1 = n_2 = n_3$.

فإن نسبة الضغط النهائي إلى الضغط البدائي لكل مرحلة تكون واحدة ويمكن برهان ذلك على النحو التالي:

في المرحلة الأولى: $$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

في المرحلة الثانية: $$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

في المرحلة الثالثة: $$\frac{p_6}{p_5} = \left(\frac{T_6}{T_5}\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

إن الأطراف اليمنى من العلاقات الثلاث السابقة متساوية وبالتالي فإن الأطراف اليسرى متساوية أيضا أي:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_3} = \frac{p_6}{p_5} \qquad (أ)$$

إذا رمزنا لكل نسبة بالحرف χ (نسبة الضغوط) فإنه ومن الرياضيات نكتب:

$$\frac{p_6}{p_5} \times \frac{p_4}{p_3} \times \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_6}{p_1}$$

وبالأخذ في الحسبان أن $p_4 = p_5$ و $p_2 = p_3$ يمكن كتابة العلاقة (أ) بالشكل التالي:

$$\frac{p_6}{p_1} = \chi \times \chi \times \chi = \chi^3$$

إذاً:

$$\chi = \sqrt[z]{\frac{p_e}{p_1}}$$

بتعميم هذه العلاقة لضاغط ذي عدد z من المراحل نجد:

$$\chi = \sqrt[z]{\frac{p_e}{p_1}} \qquad (21\text{-}11)$$

حيث p_e الضغط النهائي.

لتحديد العمل النظري الكلي اللازم لتشغيل الضاغط متعدد المراحل نحسب العمل المصروف على انضغاط الغاز لكل مرحلة مستقلة ومن ثم نقوم بجمع هذه الأعمال:

عمل المرحلة الأولى:

$$w_{op_1} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} R T_1 \left(\chi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \qquad (22\text{-}11)$$

عمل المرحلة الثانية:

$$w_{op_2} = \frac{n}{n-1} p_3 v_3 \left[\left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} R T_3 \left(\chi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \qquad (23\text{-}11)$$

عمل المرحلة الثالثة:

$$w_{op_3} = \frac{n}{n-1} p_5 v_5 \left[\left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} R T_5 \left(\chi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \qquad (24\text{-}11)$$

عند تساوي T_1, T_3, T_5 تتساوى الأطراف اليمنى للعلاقات الثلاث السابقة وهذا يعني تساوي الأطراف اليسرى أي:

$$w_{op_1} = w_{op_2} = w_{op_3}$$

ومنه فإن العمل النظري اللازم لتشغيل ضاغط متعدد المراحل واللازم لانضغاط $1kg$ من الهواء (الغاز) يساوي جداء عدد المراحل z بقيمة العمل النظري لمرحلة واحدة:

$$w_{op_2} = z\, w_{op_1} \qquad (25\text{-}11)$$

أما بيانياً فإن العمل النظري للضاغط متعدد المراحل يساوي للمساحة (10-1-2-3-4-5-6-9-10)، الشكل (11-9-أ). إذا افترضنا أن عملية الانضغاط تتم في أسطوانة واحدة بحيث يتم فيها رفع ضغط الغاز من p_1 وحتى p_4 (وفق العملية البوليتروبية 1←8) فإن العمل المصروف يساوي للمساحة (10-1-8-9-10)، وكما هو واضح من الشكل نفسه أن المساحة (10-9-6-5-4-3-2-1-10) أصغر من المساحة (10-1-8-9-10) بمقدار المساحة المهشرة وبالتالي العمل المصروف على رفع ضغط $1kg$ من الغاز من p_1 إلى p_4 في الضاغط ثلاثي المراحل أقل من عمل الضاغط وحيد المرحلة، كما أن استخدام الضواغط متعددة المراحل يسمح بالاقتراب إلى حالة الانضغاط الإيزوترمية فكما نلاحظ أن العملية المركبة (1-2-3-4-5-6) تقترب إلى حد كبير من العملية الإيزوترمية (1←7). كما أن من مزايا الانضغاط المتعدد المراحل تخفيض كبير في قيمة القوة المكبسية ففي مرحلة الانضغاط الواحدة إذا كان الضغط في نهاية عملية الانضغاط مرتفعاً فإن ذلك يتطلب قوة مكبسية كبيرة، أما في ضاغط متعدد المراحل فإن مساحة المكبس تكون أصغر وبالتالي تكون القوى المكبسية أصغر ، حتى أنه في حالة تجميع القوى المكبسية في مراحل الانضغاط كافة فإنها تبقى ذات قيمة أصغر من قيمة القوة اللازمة في حال مكبس واحد.

وكذلك تزداد قيمة المعامل الحجمي λ_v فمن الواضح أنه عند زيادة نسبة الانضغاط يزداد ضغط الغاز النهائي ويزداد بالتالي الحجم المتمدد والمتبقي في الفراغ الميت مما يؤدي إلى التقليل من كمية غاز السحب (مما سبق نستنتج أن زيادة عدد مراحل الانضغاط يؤدي إلى تخفيض نسبة الانضغاط لكل مرحلة وبالتالي زيادة قيمة λ_v

أما على مخطط (T,s) (الشكل 11-9-ب) فإن المساحة (a-1-2-b-a) الواقعة تحت العملية البوليتروبية (1←2) في الأسطوانة الأولى تساوي كمية الحرارة التي يفقدها الهواء (الغاز) عبر جدران هذه الأسطوانة إلى الوسط المحيط (مياه التبريد) (التي تساوي كمية الحرارة التي تكتسبها مياه التبريد)، بينما تمثل المساحة (2-3-c-b-2) الواقعة تحت العملية الإيزوبارية (2←3)، كمية الحرارة التي يطرحها الهواء المضغوط إلى مياه التبريد

في المبادل الحراري الأول HE1 (التي تساوي كمية الحرارة التي تكتسبها مياه التبريد في المبادل الحراري الأول) وهكذا بالنسبة لبقية العمليات. درجة حرارة الهواء النهائية في الضاغط ثلاثي المراحل تساوي T_6 أما في حالة كون عملية الانضغاط تتم بأسطوانة واحدة (بمرحلة واحدة) فتساوي T_8 وكما هو مبين من الشكل فإن $T_6 << T_8$.

بقي أن نقول إن الضواغط المتعددة المراحل أعقد وأغلى من الضواغط وحيدة المرحلة وقد لا يكون هناك مسوغ اقتصادي لاستخدامها ولكن هناك حالات تضطرنا لاستخدام هذه الضواغط كأن يكون الغاز المراد ضغطه قابلاً للانفجار في هذه الحالة يجب أن لا تصل درجة حرارة الغاز أثناء ضغطه إلى أعلى من درجة الحرارة المسموح بها.

مثال 11-6

يضغط هواء في ضاغط مثالي ثنائي المرحلة حتى الضغط $20\,bar$. أوجد درجة حرارة الهواء وضغطه في نهاية المرحلة الأولى إذا علمت أن درجة حرارة الهواء الخارجي $t_1 = 15°C$ أما الضغط $p_1 = 1\,bar$. تتم عملية الانضغاط وفق بوليتروب أسه $n = 1.2$.

الحل

من العلاقة (11-21) نجد لحالة $z = 2$:

$$\chi = \sqrt{\frac{20}{1}} = 4.47$$

وبالتالي فإن قيمة الضغط في نهاية المرحلة الأولى:

$$\chi = \frac{p_2}{p_1} \Rightarrow p_2 = \chi\, p_1 = 4.47 \times 1 = 4.47\,bar$$

أما درجة الحرارة النهائية:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = T_1\, \chi^{\frac{n-1}{n}} = 288 \times 4.47^{\frac{0.2}{1.2}} \approx 370\,K$$

مثال 11-7:

لدينا ضاغط مكبسي مثالي مؤلف من مرحلتي انضغاط مع تبريد بيني كامل بين المرحلتين تتم عملية الانضغاط أديباتيا من $p_1 = 1at, t_1 = 15°C$ وحتى $p_3 = 9at$ ، حدد عمل الضاغط النظري وأعلى درجة حرارة للهواء في الضاغط ثم قارن النتائج التي تحصل عليها مع القيم التي تنتج فيما لو تم الانضغاط بضاغط أديباتي مثالي وحيد المرحلة.

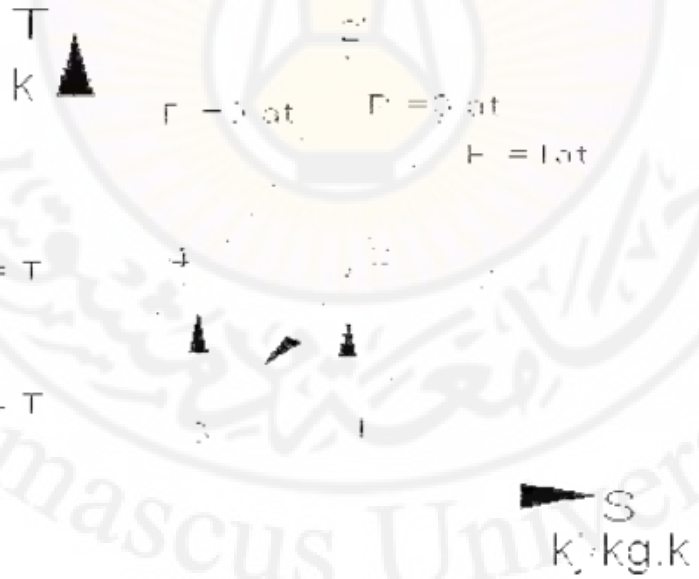
الحل

نلاحظ من الشكل (11-10) أن: $T_3 = T_4 \ , \ T_1 = T_2$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{29.27 \times 293}{1 \times 10^4} = 0.857\, m^3/kg$$

$$p_2 = \sqrt{p_1 p_4} = \sqrt{1 \times 9} = 3at$$

$$w_{ok} = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$



الشكل (11-10): تابع للمثال (11-7)

$$w_{ad} = \frac{1.4}{0.4} \times 1 \times 10^4 \times 0.857 \left[\left(\frac{3}{1} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right] = 11,060 kgf\,m/kg$$

درجة الحرارة في نهاية عملية انضغاط المرحلة الأولى:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \left(\frac{3}{1} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} = 401\,K$$

الحجم النوعي في نهاية انضغاط المرحلة الأولى:

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{29.27 \times 401}{3 \times 10^4} = 0.394\,m^3/kg$$

الحجم النوعي في بداية انضغاط المرحلة الثانية:

$$v_3 = \frac{RT_3}{p_2} = \frac{29.27 \times 293}{3 \times 10^4} = 0.2858\,m^3/kg$$

عمل ضاغط المرحلة الثانية:

$$w_2 = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$w_2 = \frac{1.4}{0.4} \times 1 \times 10^4 \times 0.857 \left[\left(\frac{9}{3} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right] = 11,060 kgf\,m/kg$$

درجة حرارة الغاز في نهاية انضغاط المرحلة الثانية:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \times \left(\frac{3}{1} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} = 401\,K$$

أما إذا استخدمنا ضاغطاً أديباتياً مثالياً وحيد المرحلة فإن عملية الانضغاط تمثلها (1←2') المبينة على نفس الشكل. العمل فيما لو استعملنا ضاغطاً مثالياً أحادي المرحلة:

$$w_{ok} = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_4}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1.4}{0.4} \times 1 \times 10^4 \times 0.857 \left[\left(\frac{9}{1} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right] = 26,199\, kgf\, m / kg$$

درجة الحرارة في نهاية عملية الانضغاط أحادية المرحلة:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_4}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \times 9^{\frac{0.4}{1.4}} = 549\, K$$

مثال 11-8:

يسحب ضاغط هوائي أديباتي الهواء عند ضغط $p_1 = 1 at$ ودرجة حرارة $t_1 = 20°C$ ويضغطه حتى $p_2 = 8 at$ ، حدد درجة حرارة الهواء في نهاية عملية الانضغاط والعمل النظري المصروف والمعامل الحجمي للضاغط:

أ- في حالة الانضغاط أحادية المرحلة.

ب-في حالة الانضغاط بمرحلتين مع تبريد كامل بينهما.

علماً بأن معامل الفراغ الميت $C' = 8\%$.

الحل

أ- حالة مرحلة انضغاط واحدة:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \times \left(\frac{8}{1} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} = 530.7\, K$$

العمل النظري:

$$w_{ok} = \frac{k}{k-1} R T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1.4}{0.4} \times 287 \times 293 \left(8^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right) = 238,824\, J / kg$$

$$\lambda_c = 1 - C\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}} - 1\right] = 1 - 0.08\left(8^{\frac{1}{1.4}} - 1\right) = 0.726$$

ب- حالة الانضغاط بمرحلتين:

$$p_2 = \sqrt{p_1 p_3} = \sqrt{1 \times 8} = 2.828 at$$

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \times \left(\frac{2.828}{1}\right)^{\frac{0.4}{1.4}}$$

$$w_{ok2} = 2\frac{k}{k-1} R T_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]$$

$$= 2\frac{1.4}{0.4} \times 287 \times 293\left[\left(\frac{2.828}{1}\right)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1\right] = 208{,}356\ J/kg$$

$$\lambda_2 = 1 - C\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}} - 1\right] = 1 - 0.08\left(2.828^{\frac{1}{1.4}} - 1\right) = 0.902$$

مثال 11-9:

أوجد قيمة العمل اللازم لتحقيق انضغاط $1m^3$ من الضغط الابتدائي $p_1 = 1at$ إلى الضغط $p_2 = 10at$ في الحالات التالية:

أ- عند استعمال ضاغط بمرحلة واحدة.

ب- بمرحلتين.

ت- بثلاث مراحل، بفرض أن الانضغاط أديباتي في الحالات الثلاث وأن جسم التشغيل هواء.

ث- أوجد العمل المصروف في حالة الانضغاط الإيزوترمي فيما لو كان الضاغط وحيد المرحلة.

الحل

أ- انضغاط أديباتي بمرحلة واحدة:

$$w = p_1 v_1 \frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]$$

$$= \frac{1.4}{0.4} \times 10^4 \times 1\left(10^{\frac{0.4}{1.4}} - 1\right) = 32,574\, kgf\, m/kg$$

ب- انضغاط أديباتي بمرحلتين:

$$p = \sqrt{10 \times 1} = 3.16$$

$$w = \frac{1.4}{0.4} \times 10^4 \times 1\left[\left(\frac{3.16}{1}\right)^{\frac{0.4}{1.4}} + \left(\frac{10}{3.16}\right)^{\frac{0.4}{1.4}} - 2\right] = 27,264\, kgf\, m/kg$$

ت- انضغاط أديباتي بثلاث مراحل:

$$\chi = \sqrt[3]{10} = 2.15$$

$$w = \frac{1.4}{0.4} \times 10^4 \times 1\left(2.15^{\frac{0.4}{1.4}} - 1\right) = 25,668\, kgf\, m/kg$$

ث- انضغاط إيزوترمي بمرحلة واحدة:

$$W = 10^4 \times 1 \times \ln\left(\frac{10}{1}\right) = 23,026\, kgf\, m/kg$$

نلاحظ من خلال هذا المثال أنه مع زيادة عدد مراحل الانضغاط تصغر قيمة العمل المصروف وتقترب من قيمة العمل المصروف في حالة الانضغاط الإيزوترمي.

مثال 11-10

نتيجة تجريب ضاغط مكبسي بمرحلة واحدة يعمل على ضغط هواء ذي شروط ابتدائية $p_1 = 1at, t_1 = 27°C$ حتى الضغط $p_2 = 5at$ وجد أن العمل المصروف يساوي $w_i = 23,300\, kgf\, m/kg$ ، احسب المردود الأديباتي والإيزوترمي للضاغط.

الحل:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{29.27 \times 300}{1 \times 10^4} = 0.878\, m^3/kg$$

العمل المصروف في حالة الانضغاط الأديباتي المثالي:

$$w_{ok} = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1.4}{0.4} \times 1 \times 10^4 \times 0.878 \times \left[\left(\frac{5}{1} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right] = 17,940\, kgf\, m / kg$$

$$\eta_{ad} = \frac{w_{ok}}{w_i} = \frac{17,940}{23,300} = 0.77$$

العمل المصروف في حالة الانضغاط الإيزوترمي:

$$w_{oi} = R T_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = 29.27 \times 300 \times \ln \left(\frac{5}{1} \right) = 14,132\, kgf\, m / kg$$

$$\eta_{iso} = \frac{14,132}{23,300} = 0.606$$

مثال 11-11:

يضغط الهواء في ضاغط بوليتروبي مثالي خماسي المراحل من $p_1 = 1.003\, bar$ و $t = 0°C$ حتى $p_6 = 98\, bar$ ، أس البوليتروب لجميع مراحل الانضغاط واحد ويساوي $n = 1.2$ وكذلك نسبة ازدياد الضغط واحدة لجميع المراحل. برد الهواء بين المراحل حتى درجة الحرارة البدائية له. والمطلوب:

أ- مثل عمل الضاغط المكبسي خماسي المراحل على مخطط (T, s)،

ب- العمل النظري اللازم لتشغيل الضاغط،

الحل:

أ- نسبة ازدياد الضغط في مرحلة انضغاط واحدة:

$$\chi = \sqrt[5]{\frac{p_{z-1}}{p_1}} = \sqrt[5]{\frac{98}{1.003}} = 2.5$$

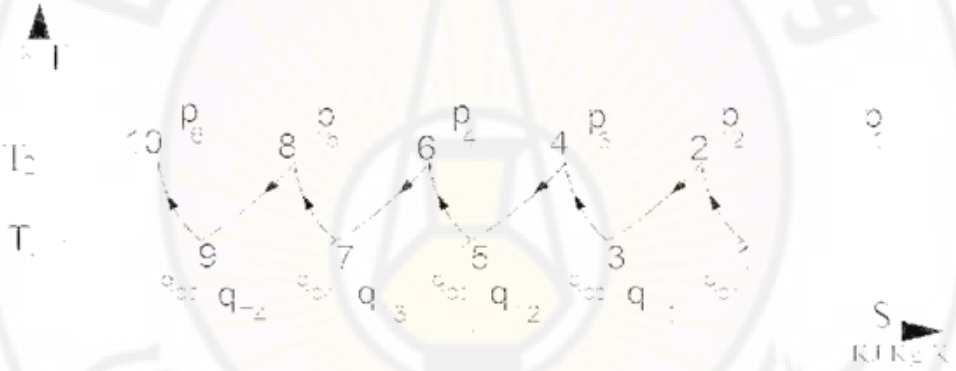
قيمة الضغط في نهاية المرحلة الأولى:

$$p_2 = \chi\, p_1 = 2.5 \times 1.003 = 2.51\, bar$$

نرسم على مخطط (T,s) النقطة (1) وبالاستعانة بقيمة أس البوليتروب $n = 1.2$ ننشئ النقطة (2) وهكذا حتى نصل للنقطة (١٠). وذلك بعد أن نقوم بتحديد قيم الإيزوبارات:

$$p_4 = \chi^2\, p_1 = 2.5^2 \times 1.003 = 6.27\, bar$$
$$p_6 = \chi^3\, p_1 = 2.5^3 \times 1.003 = 15.7\, bar$$
$$p_8 = \chi^4\, p_1 = 2.5^2 \times 1.003 = 39\, bar$$
$$p_{10} = \chi^5\, p_1 = 2.5^5 \times 1.003 = 98\, bar$$

على نفس الشكل واضح مجموع كميات الحرارة المطروحة من الهواء خلال عمليات الانضغاط الخمسة سواء في المبردات البينية أم في قمصان الضاغط الشكل (11-11).



الشكل (11-11) تابع للمثال (11-11)

ب- قيمة العمل النظري اللازم لتشغيل الضاغط خماسي المراحل (العلاقة 25-11).

11-8: الضواغط العنفية (التوربينية):

تملك هذه الضواغط حجوما وأوزانا أقل من الضواغط المكبسية وذلك من أجل الإنتاجية الكتلية نفسه، أضف إلى ذلك أنها تؤمن تدفقا مستمرا من الغاز المضغوط دون أي تذبذب بالتدفق وذلك بسبب غياب الحركة الترددية كما أنه لا تجري عملية مزج بين زيت التزييت المستخدم لتزييت عناصر الضاغط المكبسي مع الغاز المراد ضغطه.

تعطي الضواغط العنفية ضغوطا عالية نسبيا وهي تستعمل في مجالات متعددة في الهندسة الحرارية (لضخ الهواء إلى غرف الاحتراق في العنفات الغازية) وكذلك في هندسة التبريد (آلات التبريد البخارية، آلات التبريد الهوائية،...).

يبين الشكل (11-12) مقطعا في ضاغط عنفي (توربيني) وفيما يلي نشرح طريقة عمله.



الشكل (11-12): مقطع في ضاغط عنفي (توربيني)

يركب على المحور (1) القرص (2) الذي تثبت عليه الريش ذات الشكل الانسيابي الملتوي. المحور مع القرص والريش يشكلون الجزء الدوار من الضاغط. يدخل الهواء على طول محور الآلة باتجاه السهم إلى الريش حيث يجري ضغطه وزيادة سرعته ويذهب الهواء بعدها إلى الجزء الثابت (الديفوزور) الذي يزداد مقطعه في اتجاه سير الهواء، في هذا الأخير تتناقص سرعة الهواء وتتحول طاقته الحركية إلى طاقة كامنة للضغط وتترافق هذه العملية بازدياد في الضغط ثم ينتقل الهواء عبر القنال الثابت (3) إلى المرحلة التالية.

إذا افترضنا أن الانضغاط يتحقق وفق الأديبات عندها فإنه يمكن تمثيل هذه العملية على مخطط (T,s) الشكل(11-13) بالخط (1←2). في الواقع وبسبب السرعات العالية والاحتكاك بين جزئيات الغاز المراد ضغطه وجدران الأسطوانة فإن عملية الانضغاط تجري مع انحراف كبير عن الخط الشاقولي ويمثلها الخط (1←2') أي أن الأنتروبي يزداد. وعندها فإن العمل الفعلي المصروف على انضغاط الغاز يمكن تحديده بالعلاقة:

$$w_i = i_1 - i_2 \qquad (26\text{-}11)$$



الشكل (11-13): تمثيل عملية الانضغاط على مخطط (T,s)

بيانيا قيمة العمل الفعلي تمثله المساحة(2`-3-4-6-2`) وكما نلاحظ فهو أكبر من العمل الأديباتي (النظري) بمقدار المساحة (2`-2-5-6-2`) ، هذه الزيادة بالمساحة تعبر عن عمل قوى الاحتكاك.من أجل وصف عمل الضواغط العنفية تم إدخال مفهوم المردود النسبي الداخلي للضاغط الذي يأخذ بعين الاعتبار الضياع على احتكاك الغاز داخل الضاغط والتي تصف انحراف عملية الانضغاط الفعلية عن المثالية. إذا افترضنا عملية الانضغاط المثالية هي أديباتية فإن هذا المعامل ندعوه بالمردود الأديباتي وهو عبارة عن: نسبة العمل في عملية الانضغاط الأديباتية w_{ad} إلى العمل الفعلي للضاغط w_i ونرمز له بالرمز التالي η_{ad} :

$$\eta_{ad} = \frac{w_{ad}}{w_i}$$

أو :

$$\eta_{ad} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2'}} \qquad (27\text{-}11)$$

للغازات المثالية وعلى اعتبار $c_p = const.$ فإن:

$$\eta_{ad} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{2'}} \qquad (28\text{-}11)$$

تتراوح قيمة $\eta_{ad} = 0.65 - 0.75$ وبالتالي من معرفة قيمة η_{ad} وبدلالة العلاقة (28-11) يمكننا إيجاد النقاط الممثلة لحالة الغاز النهائية مع وجود احتكاك:

$$i_{2'} = i_1 + \frac{i_2 - i_1}{\eta_{ad}}$$

وبدلالة i_1 و $i_{2'}$ يمكن حساب العمل الفعلي في نهاية الانضغاط من العلاقة (26-11).

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

مسائل غير محلولة

1-11

يسحب ضاغط مثالي أحادي المرحلة $100\,m^3/h$ من الهواء عند شروط بدائية $p_1 = 1\,bar$ و $t_1 = 27°C$ أما الضغط في نهاية عملية الانضغاط $p_2 = 8\,bar$. حدد استطاعة المحرك الكهربائي النظرية على محور الضاغط وتدفق مياه التبريد إذا علمت أن درجة حرارتها ازدادت بمقدار $\Delta t = 13°C$. أجري الحساب من أجل عمليات الانضغاط التالية: إيزوترمية – أديباتية – بوليتروبية $(n = 1.2)$. الحرارة النوعية للماء $c_w = 4.18\,kJ/kgK$.

الجواب: الانضغاط الإيزوترمي $N = 5.8\,kW, \dot{m}_w = 382\,kg/h$

الانضغاط الأديباتي $N \approx 7.9\,kW, \dot{m}_w = 0$

الانضغاط البوليتروبي $N = 6.9\,kW, \dot{m}_w = 191.2\,kg/h$

2-11

يضغط الهواء تارة في ضاغط وحيد المرحلة وتارة أخرى في ضاغط ثنائي المرحلة فإذا علمت أن البارامترات البدائية كانت $p_1 = 1\,bar$ و $t_1 = 20°C$ أما الضغط النهائي $p_2 = 9\,bar$ وأن أس البوليتروب $n = 1.2$ حدد:

أ- النسبة المئوية لانخفاض العمل المصروف على عملية الانضغاط في الضاغط ثنائي المرحلة إذا علمت أن الضغط المرحلي (بين المرحلتين) $p = 3\,bar$ وأن عملية تبريد الهواء بعد عملية الانضغاط في المرحلة الأولى تمت حتى درجة الحرارة البدائية $t_1 = 20°C$.

ب- درجة حرارة الهواء النهائية لكلتا الحالتين t_2', t_2''

الجواب: أ) بمقدار 12.7%

ب) $t_1' = 213°C, t_2'' = 104°C$

3-11

يضغط الأزوت وفق بوليتروب $n = 1.15$ من الضغط $p_1 = 1.02\,bar$ و $t_1 = 20°C$ حتى الضغط $p_2 = 9.5\,bar$. حدد إنتاجية الضاغط الحجمية منسوبة إلى

الشروط البدائية إذا علمت أن استطاعة المحرك الكهربائي على محور الضاغط تبلغ $42\,kW$.

الجواب: $\dot{V} = 536.7\,m^3/h$

4-11

يضغط هواء في ضاغط وحيد المرحلة من الحالة $p_1 = 1\,bar$ و $t_1 = 20°C$ حتى الحالة $p_2 = 6\,bar$ و $t_2 = 85°C$. نتيجة لتخفيض فعالية التبريد للضاغط ازداد العمل النظري المصروف على الضاغط بمقدار 15%. حدد درجة حرارة الهواء في نهاية عملية الانضغاط بعد انخفاض فعالية التبريد.

الجواب: $t = 198°C$

5-11

الإنتاجية الحجمية لضاغط هوائي أحادي المرحلة $\dot{V} = 800\,m^3/h$. يقوم الضاغط بضغط الهواء من $p_1 = 1\,bar$ و $t_1 = 20°C$ حتى الضغط $p_2 = 6\,bar$ وذلك وفق انضغاط بوليتروبي بأس $n = 1.35$. بهدف توفير الطاقة الكهربائية تم استبدال المحرك الكهربائي بآخر استطاعته أقل بـ 21% من الأول. كم يجب أن يكون تدفق مياه التبريد كي تبقى الإنتاجية الحجمية للضاغط نفسها وكذلك الضغط الأعظمي للهواء وذلك بعد عملية الاستبدال.

الجواب: قبل الاستبدال $\dot{m}_w = 2,342\,kg/h$

بعد الاستبدال $\dot{m}_w = 521\,kg/h, t_2 = 97°C$

6-11

حدد كمية الحرارة الكلية المطروحة من قمصان ضاغط مثالي هوائي ثنائي المرحلة والمبرد البيني إذا علمت أنه بعد مرحلة الانضغاط الأولى تجري عملية تبريد للهواء المضغوط حتى درجة حرارة الدخول البدائية. بارامترات الهواء البدائية $p_1 = 1\,bar$ و $t_1 = 20°C$ أما الضغط بعد المرحلة الثانية $p_4 = 9\,bar$. تتم عملية الانضغاط لكلتا المرحلتين وفق عملية بوليتروبية بأس $n = 1.3$ كما أن $t_3 = t_4$. التدفق الكتلي للهواء عبر الضاغط $\dot{m}_{air} = 12\,kg/\min$.

الجواب: $Q_{air} = 2,490 kJ/\min, Q = 4.15 kW$

7-11

أوجد العمل النظري اللازم لتشغيل ضاغط مؤلف من مرحلة واحدة أو ثلاث مراحل أو أربع مراحل إذا كانت شروط السحب واحدة للحالات الثلاثة السابقة وهي $T_1 = 300 K, p_1 = 1 at$، قيمة الضغط النهائي $p_2 = 125 at$، دليل البوليتروب لجميع المراحل $n = 1.2$. حدد قيمة العمل من أجل حجم هواء قدره $1 m^3$ وأوجد قيمة درجة الحرارة النهائية في حالة استعمال ضواغط مؤلفة من مرحلة واحدة أو ثلاث أو أربع مراحل.

الجواب: حالة مرحلة واحدة $T_2 = 670.8 K, w_p = 741.6 kJ/kg$

حالة ضاغط ثلاثي المراحل

$$T_2 = 553.7 K, w_p = 553.7 kJ/kg, \frac{\Delta w_p}{w_p} = 25.3\%$$

حالة ضاغط رباعي المراحل

$$T_2 = 366.8 K, w_p = 534.7 kJ/kg, \frac{\Delta w_p}{w_p} = 27.8\%$$



وقل رب زدني علما
Damascus University

الفصل الثاني عشر

دورات الآلات البخارية

- مبدأ عمل الآلة البخارية
- دورة كارنو لبخار الماء
- دورة رانكين
  - تأثير رفع الضغط البدائي (قبل الدخول للعنفة)
  - تأثير تحميص البخار الداخل إلى العنفة
  - تأثير تخفيض ضغط التكاثف p_2
- دورة رانكين الحقيقية
- الدورة مع التحميص المرحلي للبخار
- العنفات
- الدورة البخارية الغازية
- مسائل غير محلولة

جامعة دمشق
Damascus University

وقل رب زدني علما
Damascus University

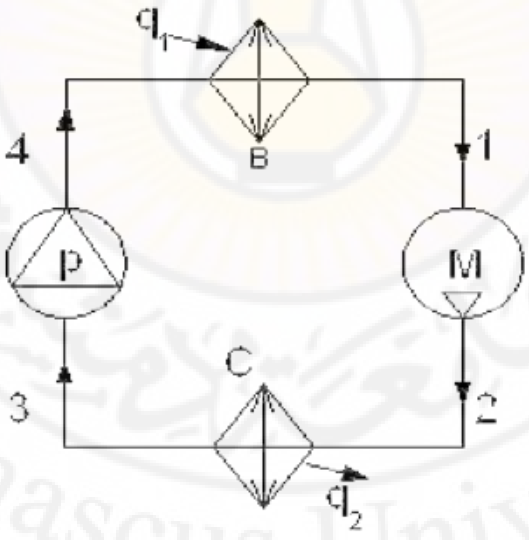
الفصل الثاني عشر

دورات الآلات البخارية

تستخدم الالات البخارية لتحويل الحرارة إلى عمل ميكانيكي. جسم التشغيل في هذه الآلات هو بخار الماء، فالماء متوافر بكثرة في الطبيعة ويتمتع بمواصفات ترموديناميكية جيدة ومن أهم هذه المواصفات تضاعف الحجم النوعي للماء مئات المرات عند تحوله إلى بخار (عند التحول التام للماء إلى بخار مشبع جاف عند ضغط $p = 10 bar$ فإن الحجم النوعي يزداد بحدود 200 مرة) وهذا يعطي إمكان الحصول على قيمة كبيرة للعمل المفيد عند تمدد البخار.

12-1: مبدأ عمل الآلة البخارية

الشكل التوضيحي للآلة البخارية مبين في الشكل(١٢ – ١) وتعمل هذه الآلة على النحو التالي:



الشكل (12-1)

يكتسب الماء الداخل إلى المرجل (B) عند $p_4 = p_B$ كمية الحرارة q_1 (في العملية الإيزوبارية 4←1) فيتشكل بخار يغادر المرجل عند $p_1 \approx p_4$ إلى المحرك

البخاري حيث يتمدد أديباتيا حتى الحالة (2) حيث $p_1 > p_2$ منجزاً عملاً قدره w ، يرسل البخار المشبع المغادر للمحرك ببارامترات النقطة (2) إلى المكثف (C) حيث ينبذ كمية الحرارة q_1 إلى الوسط المحيط (مياه التبريد). عملية التكاثف تتم عند ضغط ثابت أي $p_3 = p_2$. يدخل ناتج التكاثف إلى جهاز رفع الضغط (P) الذي يؤمن إغلاق الدورة أي إعادة جسم التشغيل إلى حالته البدائية (ماء ببارامترات النقطة 4) ويتجه الماء من بعدها إلى المرجل (B) وتتكرر الدورة.

في حال كون الآلة البخارية تعمل حسب الدورة المفتوحة فإن البخار الخارج من المحرك بالحالة (2) ينطلق إلى الجو ويستغنى في هذه الحالة عن المكثف (C) وجهاز رفع الضغط (P).

2-12: دورة كارنو لبخار الماء

في الشكل (2-12) تظهر مخططات (p,v) و (T,s) و (i,s) لدورة كارنو المحققة في الآلة العنفية البخارية ذات الشكل التوضيحي المبين في الشكل(1-12)



الشكل (2-12): مخططات (p,v) و (T,s) و (i,s) لدورة كارنو

في الدورة المدروسة يخرج البخار من المرجل مشبعا جافا $(\chi_1 = 1)$ وبالتالي فإن حالة البخار بعد المحرك الأديباتي (العنفة) هي بخار مشبع رطب $(\chi_2 < 1)$. كما أن حالة البخار الداخل إلى جهاز رفع الضغط هي أيضا بخار مشبع رطب $(0 < \chi_3 < \chi_2)$ أما الحالة (4) عند مدخل المرجل فهي ماء مشبع $(\chi_4 = 0)$ وهكذا فإن الدورة المدروسة مؤلفة من عمليتين إيزوباريتين (4←1) و (2←3) (هما في الوقت نفسه عمليتان إيزوترميتان)، وعمليتين أديباتيتين هما (1←2) و (3←4) (١ ← ٢). العمل المفيد

للدورة تمثله المساحة (1-4-3-2-1) على مخططي (p,v) و (T,s) والمردود الحراري لهذه الدورة يتحدد بالعلاقة (5-3) (من الجزء الأول):

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}$$

كمية الحرارة المطروحة خلال كامل الدورة بيانيا تساوي المساحة (2-3-5-6-2) على مخطط (T,s)، وطول القطعة المستقيمة $i_2 - i_3$ على محور i بالنسبة لمخطط (i,s) وتحليليا:

$$|q_2| = i_2 - i_3$$

كمية الحرارة المكتسبة خلال كامل الدورة بيانيا تساوي المساحة (4-1-6-5-4) على مخطط (T,s)، وطول القطعة المستقيمة $i_1 - i_4$ على محور i بالنسبة لمخطط (i,s) وتحليليا:

$$q_1 = i_1 - i_4$$

$$\eta_{tc} = 1 - \frac{i_2 - i_3}{i_1 - i_4} \qquad (1\text{-}12)$$

العمل المفيد في هذه الدورة على مخططي (p,v) و (T,s) تمثله مساحة الدورة (1-2-3-4-1)

ويمكن استنتاج علاقة المردود الحراري لدورة كارنو البخارية باستخدام مخطط (T,s):

$$\eta_t = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1}$$

$$|q_2| = T_2(s_2 - s_3)$$

$$q_1 = T_1(s_1 - s_4)$$

$$\eta_{tc} = \frac{T_1(s_1 - s_4) - T_2(s_2 - s_3)}{T_1(s_1 - s_4)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \qquad (2\text{-}12)$$

مثال 12-1:

ينجز $1kg$ بخار ماء دورة كارنو . أوجد المردود الحراري لهذه الدورة إذا علمت أن ضغط البخار عند مدخل العنفة $p_1 = 20bar$ أما الضغط عند مخرج العنفة فهو $p_2 = 0.2bar$ علما بأن كسر جفاف البخار الداخل إلى العنفة $\chi_1 = 1$ ، ثم مثل عمل هذه الدورة على مخطط (T,s) و (i,s).

الحل

يحسب المردود الحراري لدورة كارنو المباشرة من العلاقة (12-2):

$$\eta_{tC} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

حيث T_2 درجة حرارة المنبع البارد $[K]$ وهو هنا المكثف، من جداول بخار الماء الواردة في الملحق –I– نجد:

$$p_1 = 20bar \Rightarrow t_{s1} = 212.37°C = 485.37\,K$$

T_1 درجة حرارة المنبع الساخن $[K]$ وهو هنا المرجل، من جداول بخار الماء الواردة في الملحق –I– نجد:

$$p_2 = 0.2bar \Rightarrow t_{s2} = 60.08°C = 333.08\,K$$

وبالتالي: $$\eta_{tC} = 1 - \frac{333.08}{485.37} = 0.313$$

أما التمثيل على (T,s) و (i,s) فهو مبين بالشكل (12-2).

12-3: دورة رانكين

على الرغم من أن المردود الحراري لدورة كارنو له قيمة أعظمية بالمقارنة مع غيرها من الدورات العاملة في المجال نفسه لدرجتي الحرارة إلا أنها لا تستخدم في الصناعة، فوجود ضواغط كبيرة يخفض (يقلل) العمل المفيد للدورة كما أن عملية انضغاط البخار المشبع الرطب فيها من الخطورة ما يكفي لعدم العمل بهذه الدورة (إمكان حصول المطرقة المائية).

اقترح في أواسط القرن التاسع عشر العالم رانكين آلة حرارية تعمل على الدورة المغلقة ولها الشكل التوضيحي (12-1) نفسه ولكن حالة البخار بعد خروجه من المرجل غير محددة (يمكن أن يكون مشبعاً $(\chi_1 \le 1)$ وفي الغالب بخاراً محمصاً). وعليه فإن الحالة (2) بعد المحرك (العنفة) قد تكون بخاراً محمصاً. أما نهاية التبريد الإيزوباري في المكثف فهي ماء مشبع $(\chi_3 = 0)$ وعليه فإن جهاز رفع الضغط هنا هو مضخة ماء وليس ضاغطاً. تظهر في الشكل (12-3) مخططات (p,v) و (T,s) و (i,s) لدورة

رانكين المثالية المشروحة أعلاه والموافقة لحالة البخار المحمص بعد المرجل (النقطة 1) والبخار المشبع الرطب بعد العنفة (النقطة 2) بسبب عدم قابلية الماء للانضغاط فإن العمل الذي تستهلكه المضخة صغير إلى حد الإهمال عند مقارنته بعمل العنفة كما أن النقطتين (3) و (4) على مخططي (T,s) و (i,s) المرسومين بالمقياس منطبقتان. أما مخطط (p,v) فهو توضيحي (غير حسابي ومرسوم بمقياس مشوه) ولولا ذلك لانطبقت النقطتان (4) و (5) عليه.



الشكل (12-3): مخططات (p,v) و (T,s) و (i,s) لدورة رانكين

كمية الحرارة المطروحة خلال كامل الدورة بيانيا تساوي المساحة (2-3-7-8-2) على مخطط (T,s) وطول القطعة المستقيمة $(i_2 - i_3)$ على محور i بالنسبة لمخطط (i,s) وتحليليا:

$$|q_2| = i_2 - i_3$$

كمية الحرارة المكتسبة خلال كامل الدورة بيانيا تساوي المساحة (4-7-8-1-6-5-4) على مخطط (T,s) وطول القطعة المستقيمة $(i_1 - i_4)$ على محور i بالنسبة لمخطط (i,s) وتحليليا:

$$|q_1| = i_1 \quad i_4$$

العمل المفيد لهذه الدورة على مخططي (p,v) و (T,s) تمثله مساحة الدورة (1-2-3-4-5-6-1) أما على مخطط (i,s) فيمثله طول القطعة المستقيمة $(i_1 - i_2)$ على محور i وذلك بعد إهمال العمل المصروف في المضخة.

لنوجد المردود الحراري لهذه الدورة:

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = \frac{w_t}{q_1}$$

$$\left.\begin{array}{l} |q_2| - i_2 - i_3 \\ q_1 = i_1 - i_4 \end{array}\right\} \Rightarrow w_o - q_1 - |q_2| - (i_1 - i_4) - (i_2 - i_3)$$

ولكن $i_3 = i_4$: $w_o = i_1 \quad i_2$ (3-12)

وهو عمل العنفة وبالتالي:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_4} \qquad (4\text{-}12)$$

كما هو ملاحظ من العلاقة (4-12) فإن المردود الحراري لدورة رانكين يتعلق بإنتاليبي البخار قبل العنفة وبعدها وإنتاليبي الماء الداخل إلى مولد البخار أي أن البارامترات المؤثرة في قيمة المردود الحراري لدورة رانكين هي ضغط البخار p_1 (قبل العنفة) ودرجة حرارته t_1 وضغط البخار p_2 في نهاية عملية التمدد الأديباتي (بعد العنفة).

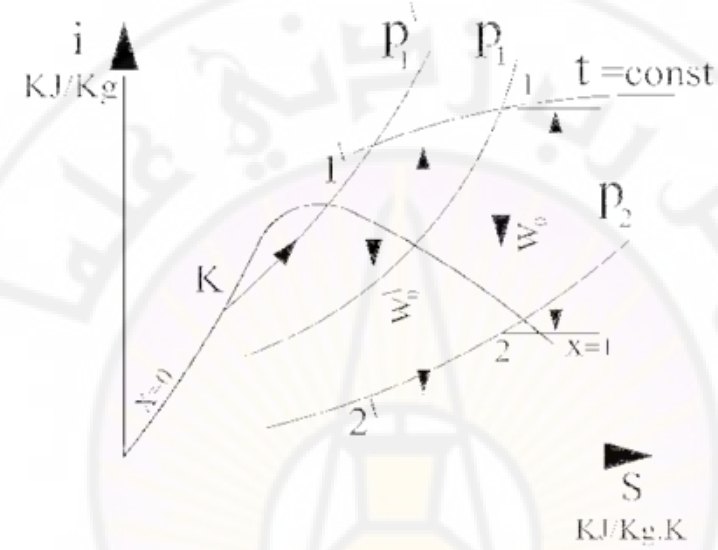
كما رأينا فإنه بواسطة الآلة العنفية البخارية يمكن تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية ومن ثم تحويلها إلى طاقة كهربائية، وفي الوقت الراهن ونظراً للجهود المبذولة في ميادين توفير الطاقة فإنه من المفيد لنا رفع فعالية (المردود الحراري) محطة توليد الطاقة والذي وجدناه في العلاقة (4-12). نلاحظ في العلاقة الأخيرة أن فعالية الدورة الترموديناميكية تتعلق ببارامترات البخار قبل الدخول للعنفة (p_1, t_1) وخلفها (p_2, t_2). لندرس تأثير كل من البارامترات الثلاثة التالية (p_1, t_1, p_2) في المردود الحراري لدورة الآلة العنفية البخارية...

1-3-12: تأثير رفع الضغط البدائي (قبل الدخول للعنفة)

يظهر تأثير رفع الضغط البدائي من p_1 إلى p_1' في المردود الحراري للدورة والذي يمكن متابعته على دورة رانكين المثالية الممثلة بالشكل (4-12) على مخطط (i,s) مع بقاء قيمة الضغط p_2 ودرجة الحرارة t_1 نفسها.

نجد من المخطط أنه مع ازدياد قيمة الضغط p_1' يتزايد معه العمل المفيد w_o' أما كمية الحرارة المعطاة خلال الدورة تتناقص حتى q_1' الأمر الذي يؤدي بالنتيجة إلى ازدياد قيمة المردود الحراري للدورة مع ازدياد قيمة الضغط قبل العنفة p_1 .

إن زيادة قيمة الضغط البدائي (قبل الدخول للعنفة) له آثار سلبية، حيث انه بنتيجة التمدد الأدبياتي للبخار المحمص ذي الضغط الأعلى $p_1' > p_1$ نحصل على بخار مشبع رطب كسر جفافه أقل مقارنة مع حالة البخار الذي ضغطه أدنى ($\chi_1' < \chi_1$)، أي أن كمية الماء ضمن الخليط أكبر وهذا يؤدي إلى تآكل أسرع لشفرات العنفة.



الشكل (12-4): تأثير رفع الضغط البدائي (قبل الدخول للعنفة) في المردود الحراري لدورة رانكين المثالية

12-3-2: تأثير تحميص البخار الداخل إلى العنفة

يظهر رفع درجة حرارة البخار الداخل إلى العنفة من t_1 إلى t_1' تأثيرا بالغا على قيمة المردود الحراري. موضح على الشكل (12-5) دورة رانكين المثالية على مخطط (i,s) مع بقاء قيمة كل من p_1 و p_2 بدون تعديل.

نلاحظ من المخطط أنه مع زيادة درجة حرارة البخار الداخل إلى العنفة حتى t_1' فإن العمل المفيد للدورة يزداد حتى w_0' ويترافق ذلك مع زيادة بكمية الحرارة المفقودة (المطروحة) حتى q_1'، علما بأن الزيادة في العمل المفيد للدورة أكبر نسبيا من تغير كمية الحرارة المطروحة، بالنتيجة يزداد المردود الحراري للدورة $\eta_t' > \eta_t$ وبالتالي فإن زيادة درجة حرارة البخار الداخل للعنفة يزيد من كفاءة (اقتصادية) الدورة الحرارية.

مثال 12-2:

أوجد قيم المراديد الحرارية لدورات رانكين المثالية التي لها الضغط نفسه قبل الدخول للعنفة $p_1 = 100bar$ والضغط نفسه $p_2 = 0.05bar$ بعد العنفة ولكنها تملك قيم مختلفة لدرجات حرارة الدخول للعنفة هي على التوالي: $450,500,550,600°C$ مع تمثيلها على مخطط (T,s).



الشكل (12-5): تأثير تحميص البخار الداخل إلى العنفة في المردود الحراري لدورة رانكين المثالية

الحل:

من الجداول الموجودة في الملاحق لدينا من أجل الحالة المعلوم فيها $p_1 = 100bar, t_1 = 450°C$ فإن:

$$p_1 = 100bar, t_1 = 450°C \Rightarrow \begin{cases} s_1 = 6.416kJ/kgK \\ i_1 = 3,239kJ/kg \end{cases}$$

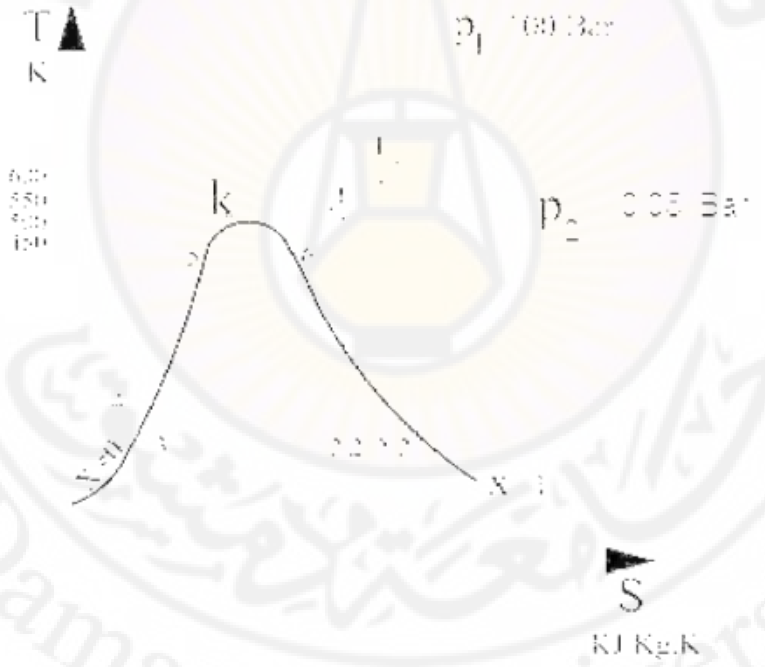
$$p_2 = 0.05bar \Rightarrow \begin{cases} s' = 0.4761kJ/kgK \\ s'' = 8.393kJ/kgK \\ \chi_2 = \dfrac{s_2 - s''}{s' - s''} = \dfrac{6.416 - 8.393}{0.4761 - 8.393} = 0.75 \\ i_2 = i' + \chi_2(i'' - i') = 1,955kJ/kg \end{cases}$$

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_{2s}} = \frac{3,239 - 1,955}{3,239 - 137,83} = 0.414$$

وبصورة مشابهة يمكن أن نوجد المرادید الحرارية للدورات الباقية:

$$t_1 = 450°C \quad \rightarrow \quad \eta_t = 0.414$$
$$t_1 = 500°C \quad \Rightarrow \quad \eta_t = 0.421$$
$$t_1 = 550°C \quad \Rightarrow \quad \eta_t = 0.428$$
$$t_1 = 600°C \quad \Rightarrow \quad \eta_t = 0.437$$

كما نلاحظ من جدول النتائج أنه بزيادة درجة حرارة البخار الداخل إلى العنفة فإن مردود دورة رانكين المثالية يتزايد. يبين الشكل (12-6) التمثيل لدورات رانكين السابقة على مخطط (T,s).



الشكل (12-6): تابع للمثال (12-2)

12-3-3: تأثير تخفيض ضغط التكاثف p_2

يؤدي تخفيض ضغط البخار بعد العنفة من p_2 وحتى p_2' إلى زيادة المردود الحراري لمحطة توليد الطاقة، ويظهر على الشكل (12-7) دورة رانكين المثالية في جملة الإحداثيات (i,s) مع بقاء قيمة كل من p_1, t_1 بدون تعديل.

نجد من المخطط أنه مع تخفيض الضغط في المكثف من p_2 وحتى p_2' فإن عمل الدورة يزداد بصورة كبيرة ويزداد معه بنسبة ليست بكبيرة كمية الحرارة المطروحة q_2' أضف إلى ذلك أن زيادة العمل المفيد أكبر من زيادة كمية الحرارة المطروحة وبالنتيجة يزداد المردود الحراري ($\eta_t' > \eta_t$). غير أن تخفيض ضغط التكاثف محدود بدرجة حرارة المصدر البارد وهذا يؤدي إلى زيادة تدفق مياه التبريد ويزيد بالتالي من أبعاد المكثف[7].



الشكل (12-7): تأثير تخفيض ضغط التكاثف p_2 في المردود الحراري لدورة رانكين المثالية

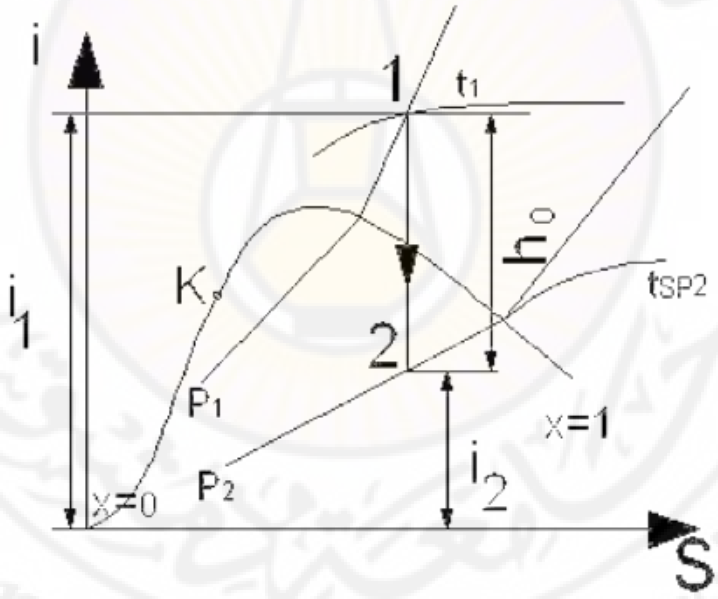
إن استمرار تخفيض الضغط في المكثف غير مجد بسبب أنه عند وجود تخلخل كبير يزداد الحجم النوعي للبخار القادم من العنفة باتجاه المكثف الأمر الذي يؤدي إلى زيادة في أبعاد المكثف والمراحل الأخيرة من العنفة هذا من جهة، ومن جهة أخرى عند

---

[7] يجعلون عادة الضغط في المكثف بحدود 0,03-0,05 bar الأمر الذي يوافق درجة حرارة إشباع 24-33°C ومن البديهي عندئذ أن تكون درجة حرارة مياه التبريد أخفض من القيم المذكورة كي تضمن إتمام عملية تكاثف البخار الخارج من العنفة وطرح حرارته.

انخفاض كبير في الضغط ضمن المكثف نحصل على درجات حرارة بخار منخفضة، فعند ضغط $0.02bar$ تكون درجة حرارة البخار $17.2°C$ الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض الفرق بين درجة حرارة البخار ضمن المكثف ودرجة حرارة مياه التبريد المستخدمة في عملية تكثيف بخار الماء وهذا الأمر يؤدي إلى زيادة في أبعاد المكثف أيضا.

يمكن إيجاد المردود الحراري لدورة رانكين بسهولة بوساطة مخطط (i,s). لهذا الغرض نجد النقطة (1) بوساطة البارامترات المعطاة p_1, t_1 ، الشكل (12-8). ثم نسقطها على المحور i فنجد i_1 ، بعد ذلك نرسم من النقطة (1) مستقيما موازيا للمحور i (عملية تمدد أديباتي عكوس للبخار) حتى التقاطع مع الإيزوبار الموافق للضغط في المكثف p_2 فنحصل على النقطة (2).



الشكل (12-8): إيجاد المردود الحراري لدورة رانكين بوساطة مخطط (i,s)

بإسقاط النقطة (2) على المحور i نجد الإنتالبي النهائي i_2. عند تقاطع الإيزوبار p_2 مع المنحنى الحدي الأعلى نجد درجة الحرارة t_{SP2}، ومنها نجد $i_4 = i'_{p_2} = c_{p_w} t_{SP2}$ (علماً بأن $c_{p_w} = 1 kcal/kg\,\deg$).

وهكذا نجد جميع القيم اللازمة لحساب المردود الحراري من مخطط (i,s)، فالقطعة (2-1) تقيس كمية الحرارة المتحولة إلى طاقة ميكانيكية أي الفرق $i_1 - i_2$، ويرمز لها بالرمز h_u وتسمى الهبوط الحراري المتاح:

$$h_u = i_1 - i_2 \qquad (5\text{-}12)$$

كما نرى فإن الهبوط الحراري المتاح يساوي العمل الذي نحصل عليه من العنفة خلال دورة حرارية كاملة أي العمل المفيد w_u للآلة كلها فيما إذا أهملنا عمل المضخة أي:

$$w_u = i_1 - i_2$$

مثال 12-3

حدد بمساعدة مخطط (i,s) المردود الحراري للآلة العنفية البخارية العاملة وفق دورة رانكين المثالية إذا علمت أن البارامترات البدائية للبخار قبل العنفة $p_1 = 30bar$ و $\chi_1 = 0.9$ أما ضغط البخار في المكثف $p_2 = 5bar$.

الحل

بمساعدة مخطط (i,s) نجد نقطة تقاطع الإيزوبار $p_1 = 30bar$ و $\chi_1 = 0.9$ وذلك للحصول على النقطة (1) الواصفة للحالة البدائية للبخار:

$$i_1 = 2.620kJ/kg$$

وبما أن الدورة مثالية فإن عملية التمدد في العنفة إيزوانتروبية أي $s_1 = s_2 = const.$ نجد النقطة (2) من تقاطع خط $s = const.$ المنشأ من النقطة (1) مع الإيزوبار $p_2 = 5bar$ نجد: $i_2 = 2.320kJ/kg$

انظر الشكل(12-9) وبالتالي فإن عمل التمدد النوعي في العنفة:

$$w_i = i_1 - i_2 = 2.620 - 2.320 = 300kJ/kg$$

ومن جداول بخار الماء المشبع (الملحق -1-) وبدلالة الضغط $p_2 = 5bar$ نجد قيمة إنتالبي الماء المشبع في الحالة (3) قبل الدخول إلى المضخة والمنطبقة عمليا على الحالة (4) بعد الخروج من المضخة:

$$p_2 = 5bar \quad \Rightarrow \quad i' = 640.1kJ/kg$$

وبالتالي فإن المردود الحراري لدورة رانكين المثالية هو:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{q_1} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_4} = \frac{300}{2{,}620 - 640.1} = 0.15$$



الشكل (12-9): تابع للمثال (12-3)

مثال 12-4:

حدد المردود الحراري للآلة العنفية البخارية العاملة وفق دورة رانكين المثالية إذا علمت أن ضغط البخار ودرجة حرارته قبل الدخول للعنفة المثالية هما على التوالي $p_1 = 100bar$ و $t_1 = 530°C$ أما ضغط البخار في المكثف $p_2 = 0.04bar$.

الحل

من جداول بخار الماء المشبع (الملحق -1-) نجد أنه بمعلومية $p_1 = 100bar$ و $t_1 = 530°C$:

$$\left.\begin{matrix} p_1 = 100bar \\ t_1 = 530°C \end{matrix}\right\} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = 3{,}449kJ/kg \\ s_1 = 6.6949kJ/kgK \end{cases}$$

$$p_2 = 0.04bar \Rightarrow \begin{cases} s' = 0.4255kJ/kgK \\ s'' = 8.473kJ/kgK \\ r = 2{,}433kJ/kg \\ t_2 = 30°C \end{cases}$$

$$\chi_2 = \frac{s_{y_2} - s'}{s'' \quad s'} = \frac{6.6949 - 0.4225}{8.473 \quad 0.4225} = 0.78$$

$$i_3 = i_3(1-\chi_3) + \chi_3 i'' = 121 \times (1-0.78) + 0.78 \times 2,560 = 2,007\, kJ/kg$$

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_4} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_{p_2}} = \frac{3,449 - 2,007}{3,449 - 121} = 0.429$$

4-12: دورة رانكين الحقيقية

إن عملية التمدد الفعلية للبخار في العنفة ليست عكوسة وذلك لأن تمدد البخار في العنفة الحقيقية يجري مع وجود جملة ضياعات واحداها احتكاك البخار مع ريش العنفة فتتحول الطاقة المصروفة على الاحتكاك إلى حرارة التي يعود البخار ويكتسبها من جديد مع استمرار عملية تمدده، لهذا فإن عملية تمدد البخار فعليا ليست عكوسة وبالتالي فإن الحالة النهائية للبخار الخارج من العنفة الحقيقية يختلف موقعه عن حالة البخار الخارج من العنفة المثالية، فالحرارة التي اكتسبها البخار أثناء مروره على ريش العنفة تجعله يكتسب حرارة الناتجة من الاحتكاك وبالتالي يخرج من العنفة مع ازدياد في الإنتروبي. عملية التمدد هذه مبينة على مخطط (i,s) بالخط المبين (1-2') بالشكل (10-12) وبالنتيجة نكتب:



الشكل (10-12): دورة رانكين الحقيقية على مخطط (i,s)

$$s_{2'} > s_2 = s_1$$

$$i_{2'} > i_2$$
$$\chi_{2'} > \chi_2$$
$$w'_u < w_u$$

يمكن التعبير عن الضياعات الحاصلة في العنفة الحقيقية بإدخال مفهوم مردود العنفة الداخلي النسبي ونرمز له بالرمز η_{ui}:

$$\eta_{ui} = \frac{w'_u}{w_u} = \frac{i_1 - i_{2'}}{i_1 - i_2} \qquad (6\text{-}12)$$

وتتراوح قيمته بين 0.9 0.85.

5-12: الدورة مع التحميص المرحلي للبخار

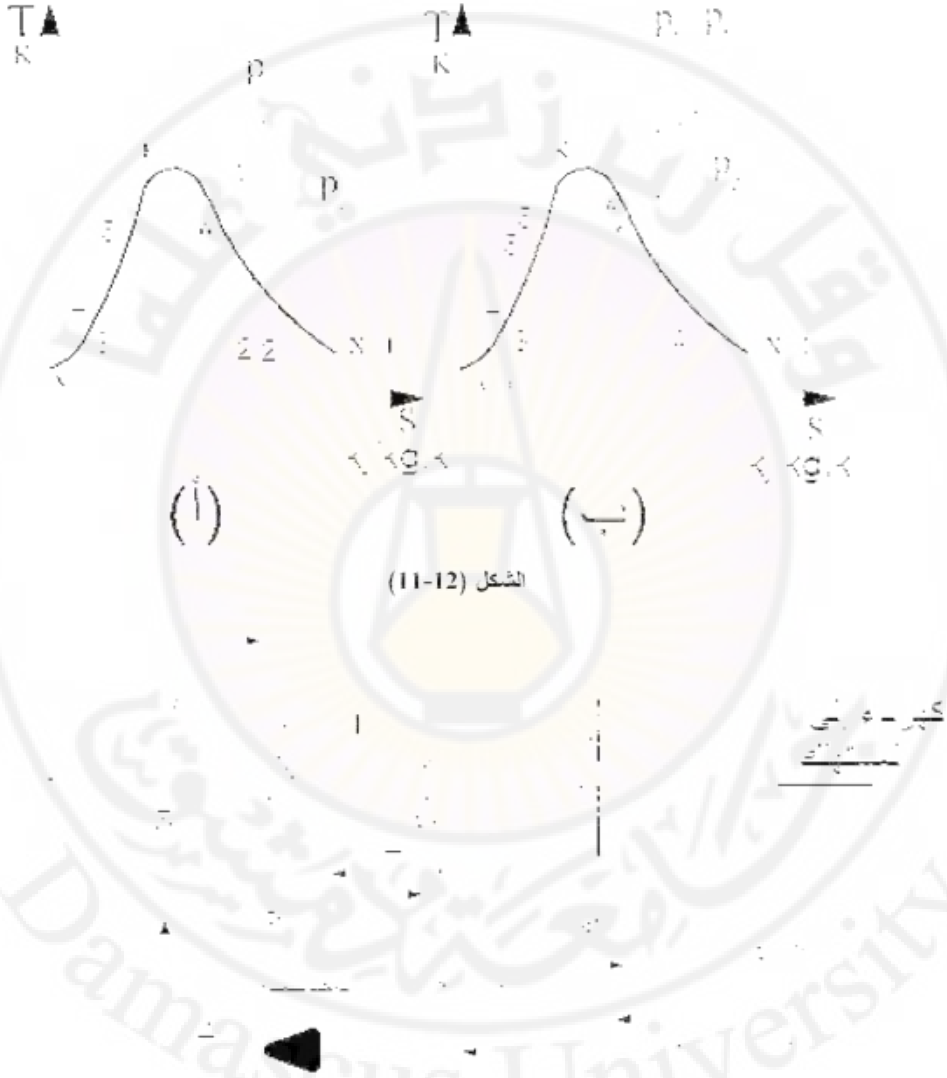
كما شرحنا أعلاه فإنه عند جريان البخار برطوبة عالية (χ منخفضة) ضمن العنفة فإن ذلك يسيء لعمل العنفة وبالتالي يخفض من قيمة المردود النسبي للتوربين وبدوره يؤدي ذلك إلى انخفاض فعالية الدورة η_t من أجل العنفات الحديثة فإن كسر الجفاف المسموح به للبخار يجب أن لا يقل عن $\chi = 0.86 - 0.88$.

وكما وجدنا سابقا فإنه من الطرائق المتبعة لتخفيض رطوبة البخار عند المخرج من العنفة هو تحميصه، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة η_t وفي الوقت نفسه تتحرك النقطة الممثلة لحالة البخار عند المخرج من العنفة نحو اليمين على مخطط (T,s) (النقطة '2 تقع على يمين النقطة (2)، انظر الشكل (12-11-أ)).

نحن توصلنا أيضا إلى أنه عند رفع ضغط البخار قبل العنفة مع بقاء درجة حرارة دخوله للعنفة t_1 وضغطه بعد العنفة p_2 ثابتين فإن المردود الحراري للدورة يزداد ولكن يترافق ذلك بانخفاض كسر جفاف البخار الخارج من العنفة وكذلك انخفاض المردود النسبي الداخلي للعنفة: $\chi_{2'} < \chi_2$

وللخروج من هذه المسألة كان الأحرى الاستمرار برفع درجة حرارة التحميص (التنقيط على الشكل (12-11-ب)) ولكن كما رأينا سابقا إن إمكانية رفع درجة حرارة التحميص مقرونة بخواص معدن ريش العنفة و العناصر الأخرى.

يعد استخدام التحميص المرحلي للبخار من الطرائق المتبعة من أجل تخفيض رطوبة البخار ويمكن تلخيص مبدأ العمل للآلة العنفية البخارية مع تحميص مرحلي (أو كما يقال أحياناً مع تحميص ثانوي) المبينة بالشكل (12-12) على النحو التالي:

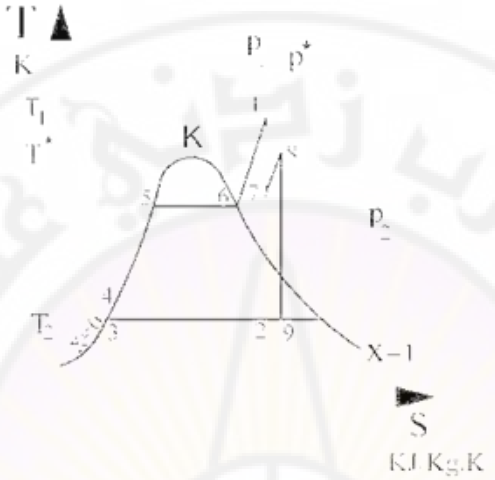


الشكل (12-11)

الشكل (12-12): مبدأ عمل الآلة العنفية البخارية مع تحميص مرحلي (أو مع تحميص ثانوي)

بعد خروج تيار البخار وإنجازه العمل في العنفة البخارية نتيجة تمدده حتى الضغط $p' > p_2$ يرسل إلى محمص إضافي (متوضع على سبيل المثال في ممر غازات

المرجل)، حيث ترتفع درجة حرارته من جديد حتى t° ومن ثم يرسل إلى العنفة التي يتمدد فيها حتى الضغط p_2 ، وكما نلاحظ على مخطط (T,s) المبين بالشكل (12-13) أن رطوبة البخار النهائية قد انخفضت: $\chi_9 > \chi_3$



الشكل (12-13): تمثيل دورة الآلة العنفية البخارية مع تحميص ثانوي على مخطط (T,s)

من الواضح أن هذه الدورة يمكن اعتبارها مؤلفة من دورتين مستقلتين: دورة رانكين العادية ممثلة بالنقاط (1-6-5-3-2-1) ودورة إضافية ممثلة بالنقاط (2-9-8-7-2) حيث العملية (7-8) تتم بثبوت الضغط p° .

يعطى المردود الحراري للدورة الحرارية مع التحميص الثانوي للبخار بالعلاقة:

$$\eta_t = \frac{(i_1 - i_2) + (i_8 - i_9)}{(i_1 - i_4) + (i_8 - i_7)} \qquad (7\text{-}12)$$

مع إهمال الطاقة المصروفة على عمل المضخة لصغرها مقارنة مع الطاقة الناتجة من العنفة. يبين الشكل (12-14) دورة التحميص الثانوي حتى درجة حرارة $T^{\circ} = T_1$ ممثلة على مخطط (i,s).

6-12: العنفات

تدعى أيضا محركات بريش، تقوم بتحويل طاقة تيار البخار أو الماء أو الغاز المار عبر فوهة الجهاز والمحور المركبة عليه الريش العاملة إلى طاقة ميكانيكية. تصنف العنفات حسب:



الشكل (12-14): تمثيل دورة الآلة العنفية البخارية مع تحميص ثانوي على مخطط (T,s)

١- طبيعة جسم التشغيل: عنفات بخارية - غازية - مائية.

٢- عدد المراحل: عنفات بمرحلة واحدة، وبعدة مراحل.

٣- توزيع تمدد البخار بين الشفرات المتحركة والشفرات الثابتة:

أ- عنفات الفعل: في هذه العنفات يحدث كل الانخفاض في الضغط في الفوهات الثابتة ويبقى الضغط ثابتا أثناء انسياب البخار خلال الشفرات المتحركة.

ب- عنفات رد الفعل: تمدد البخار فيها يتم جزئيا في الفوهات وجزئيا في الشفرات المتحركة.

٤- جريان البخار:

أ- العنفات المحورية: وفيها تكون خطوط التيار على سطوح دورانية أسطوانية (أي تبقى خطوط التيار على مسافة ثابتة من محور الآلة)، وهي الأكثر انتشاراً.

ب- العنفات القطرية: وفيها تكون خطوط التيار في مستو متعامد على محور الآلة.

ه- طريقة البناء:

أ- عنفات ذات أقراص: تكون فيها الشفرات مثبتة على محيط قرص أو دولاب.

ب- عنفات طبلية: تكون الريش فيها مثبتة على محيط طبلية.

عادة ما تكون عنفات الفعل مكونة من أقراص أو دواليب أما عنفات رد الفعل فمكونة من طبلية.

تتكون العنفة من جزء ثابت (ندعوه الثابت) وعناصر متحركة (ندعوها الدوار).

يبين الشكل (12-15) مقطع في عنفة بخارية بمرحلة واحدة.

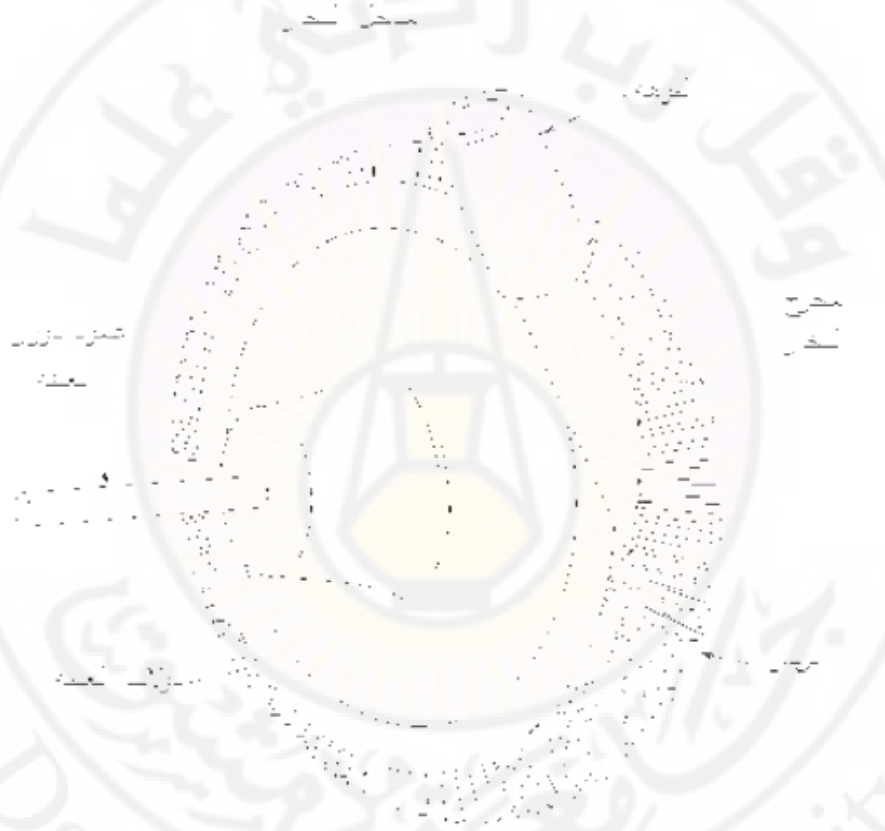
بداية تتحول الطاقة الحرارية للبخار إلى طاقة حركية أي إلى سرعة وذلك أثناء تمدد البخار في مجرى مصمم لهذه الغاية بحيث يخرج منه بسرعة عالية واتجاه معين. في المرحلة الثانية تتحول الطاقة الحركية للبخار إلى طاقة لتدوير دولاب العنفة المثبت عليه ريش العنفة بشكل منحنيات خاصة تتغير خلاله قيمة سرعة البخار واتجاهها.

مبدأ عمل العنفة البخارية وحيدة المرحلة: البخار الخارج عبر الفوهة بسرعة c_1 يعبر بين ريش الجزء الدوار للدولاب. يخرج بعدها من أقنية الجزء الدوار بسرعة c_2. القوة الطاردة المركزية الناشئة عن الحركة المنحنية للبخار بين ريش العنفة تؤدي إلى دوران الدولاب وبالتالي الديسك ومحور العنفة.

12-7: الدورة البخارية الغازية

أدى البحث المستمر عن مرادود حرارية أعلى إلى تعديلات إضافية للمحطات التقليدية. تتضمن هذه التعديلات دراسة دورة حرارية للغاز تتوضع فوق دورة حرارية للبخار والتي تدعى بالدورة المشتركة غاز -بخار . ولهذه الدورة مردود حراري أعلى من كل دورة

على حدة. تعمل الدورة الحرارية للعنفة الغازية عند درجات حرارة أعلى من تلك لدورات البخار . درجة حرارة المائع عند مدخل العنفة البخارية حوالي 620°C لمحطات التوليد البخارية الحديثة وأعلى من 1,150°C لمنشآت التوليد الغازية ويعود السبب في إمكانية الحصول على درجة الحرارة العالية في العنفات الغازية للتطور بتبريد ريش العنفة وطلائها بمواد مقاومة لدرجات الحرارة العالية كالسيراميك.



الشكل (12-15): شكل توضيحي لعنفة بخارية

تتم عملية التمدد في العنفة على مرحلتين متتاليتين:

الدورة المزدوجة عبارة عن دورة مركبة تستخدم لتحقيقها جسمي تشغيل في آن واحد: غازات الاحتراق وبخار الماء (وقد يكون الزئبق والماء). في الدورة الغازية درجة حرارة الغازات عند المدخل إلى العنفة الغازية يصل حتى 1,150°C بينما درجة حرارة بخار الماء المحمص تصل حتى 650°C – 600 فيما درجة حرارة الماء في المكثف في

المجال 35°C – 30، بهذه الصورة فإن هبوط درجة الحرارة في الدورة المركبة أكبر بكثير مقارنة مع كل دورة على حدة[*]. الأمر الذي يؤدي إلى زيادة المردود الحراري للدورة المركبة.

يبين الشكل (12-16) المخطط الأولي لعمل محطة بخارية غازية بعنفتين منفصلتين إحداهما بخارية والأخرى غازية بينما يظهر على الشكل (12-17) الدورة الترموديناميكية الموافقة للشكل التوضيحي السابق على مخطط (T,s). يتلخص مبدأ عملها على النحو التالي:

يضغط الهواء الجوي ضمن الضاغط الأديباتي (1) (العملية 1'←2') ويرسل إلى حجرة الاحتراق لمولد البخار ② والعاملة بالوقود الغازي أو السائل حيث تجري عملية الاحتراق عند ضغط ثابت. تتوزع الحرارة المنتشرة عن احتراق الوقود جزئيا للحصول على بخار الماء المحمص والجزء الآخر يتحول إلى عمل مفيد في العنفة الغازية ③(العملية 3'←4') حيث يجري تمدد لمنتجات الاحتراق القادمة من موقد مولد البخار. توجه نواتج الاحتراق المتمددة بعد العنفة الغازية حتى الضغط الجوي إلى مبادل حراري استرجاعي ④ (مسخن مائي) حيث نقوم بتبريده (العملية 4'←1') قبل أن نطرده إلى الجو. البخار المحمص الناتج من مولد البخار (الخط 5-6-1) يرسل إلى العنفة البخارية المثالية (5) حيث يتمدد فيها وفق العملية 1←2، يرسل البخار الرطب الخارج من العنفة البخارية إلى المكثف ⑥ حيث يتكاثف بالكامل ليتحول إلى ماء (العملية 2←3)، يرسل بعدها المتكاثف المتشكل وعن طريق المضخة ⑦ إلى المسترجع الحراري (4) الذي يقوم بتسخينه من جراء الحرارة التي تعطيها غازات نواتج الاحتراق المرسلة من بعد العنفة الغازية (العملية 4←5) يتابع سيره إلى مولد البخار ليتحول إلى بخار محمص.

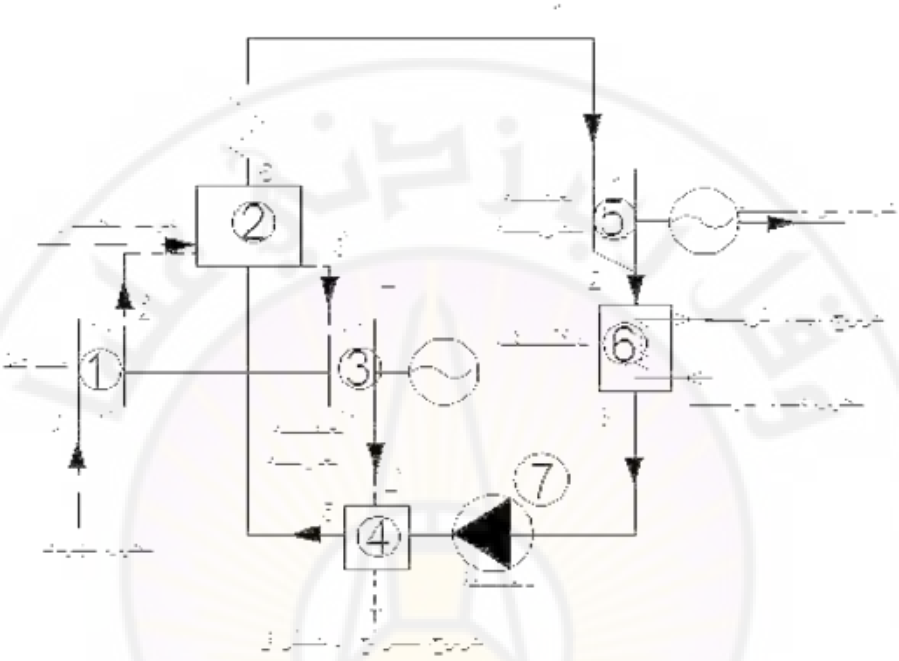
كما نلاحظ من الشكل (12-17) أن دورة عمل المحطة المشتركة تتألف من دورتين: غازية (1'-4'-3'-2'-1') وبخارية (1-6-5-4-3-2-1).

---

[*] قد تتحقق الدورتين الغازية والبخارية بدورة واحدة، عندها يكون جسم التشغيل عبارة عن خليط من غازات نواتج الاحتراق وبخار الماء. يعمل الخليط ضمن عنفة واحدة (عنفة غازية–بخارية) وتسمى الدورة عندها بالدورة الغازية–البخارية والذي اقترحها الأكاديمي خريستيا نوفيتشا.

العمل المفيد للدورة البخارية:

$$w_{osteam} = i_1 - i_2 \qquad (8\text{-}12)$$



الشكل (12-16): المخطط الأولي لعمل محطة بخارية غازية



الشكل (12-17): الدورة الترموديناميكية الموافقة للشكل التوضيحي (12-16) على مخطط (T,s)

عند إنشاء الدورة البخارية الغازية يجب أن تأخذ بعين الاعتبار أنه نتيجة لعدم تساوي قيم السعات الحرارية للغاز والماء فإن مخطط (T,s) للدورة الغازية لا ينتمي إلى $1kg$ بل لتلك الكمية من الغاز m الموافقة لكمية $1kg$ من الماء.

يتم حساب عدد كيلوغرامات الغاز m الموافق لـ $1kg$ من الماء من الموازنة الحرارية للمبادل الحراري الاسترجاعي بالعلاقة:

$$m(i_{4'}-i_{3'})=i_5-i_4 \quad \Rightarrow \quad m=\frac{i_5-i_4}{i_{4'}-i_{3'}} \tag{9-12}$$

العمل المفيد للدورة الغازية:

$$w_{ug}=m[(i_{3'} \quad i_{4'}) \quad (i_{2'} \quad i_{1'})] \tag{10-12}$$

كمية الحرارة التي يكتسبها جسما التشغيل في كلا الدورتين:

$$q_1=m(i_{3'}-i_{2'})+(i_1-i_5) \tag{11-12}$$

وبهذه الصورة فإن المردود الحراري للدورة البخارية الغازية (الدورة المشتركة) المدروسة يعطى بالعلاقة التالية:

$$\eta_t=\frac{w_{osncom}+w_{ug}}{q_1}=\frac{(i_1-i_2)+m[(i_{3'}-i_{4'})-(i_{2'}-i_{1'})]}{m(i_{3'}-i_{2'})+(i_1-i_5)}$$

مثال 12-5

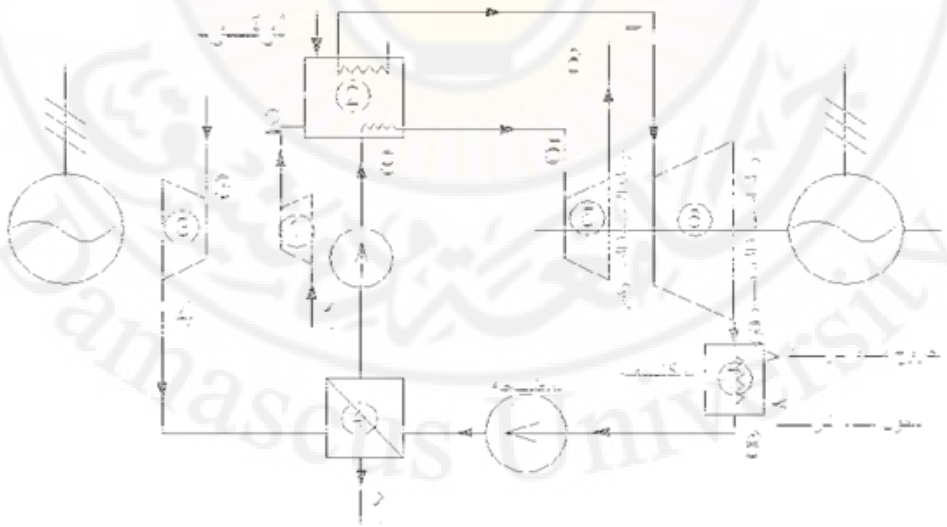
يبين الشكل (12-18) المخطط الرمزي لمحطة بخارية غازية بينما يظهر على الشكل (12-19) تمثيل عمل هذه الدورة المثالية للمحطة المشتركة على مخطط (T,s) تعمل هذه المحطة على النحو الآتي: يضغط الهواء الجوي ببارامترات النقطة (1) بواسطة ضاغط أدياباتي (1) حتى النقطة (2) وفق العملية (1←2)، يرسل بعدها الهواء المضغوط إلى جهاز الاحتراق لمحمص مولد البخار (2) حيث يتم فيه احتراق الوقود، القادم من خزان الوقود. عملية الاحتراق تمثلها العملية (2←3)، تعطي غازات نواتج الاحتراق الناتجة في البداية جزء من حرارتها من أجل تسخين المياه (الدائرة في إطار مستقل) إلى درجة حرارة الغليان. ترسل بعدها الغازات إلى العنفة الغازية (3) وفق بارامترات الحالة (3) حيث تتمدد فيها أدياباتيا منجزة عملا مفيدا (العملية 3←4). ترسل

الغازات الخارجة بعدها (الحالة 4) إلى مسخن غازي أولي (4) (يعمل على غازات نواتج الاحتراق) تسخن فيه أبخرة الماء المتكاثفة القادمة من المكثف (7) حتى درجة حرارة الغليان ببارامترات الحالة (9). بعدها تطرح الغازات إلى الجو الخارجي (الوسط المحيط) (الحالة 1) وتتكرر الدورة من أجل الغاز . توجه المياه المغلية (الحالة 9) الخارجة من المسخن الغازي الأولي إلى محمص البخار (2) حيث يتحمص الأخير (الحالة 5) (وفق العملية 9←5)، ليدخل بعدها إلى العنفة البخارية ذات الضغط العالي (5) ويخرج وفق الحالة (6) (العملية 5←6) ويوجه من جديد إلى المحمص ويكتسب كمية من الحرارة من غازات حجرة الاحتراق (الحالة 7) (العملية 6←7) ويرسل إلى العنفة البخارية ذات الضغط المنخفض (6) ويخرج وفق (الحالة 8) (العملية 7←8) ويتكاثف البخار الخارج في المكثف (7) وتغلق دورة البخار . والمطلوب:

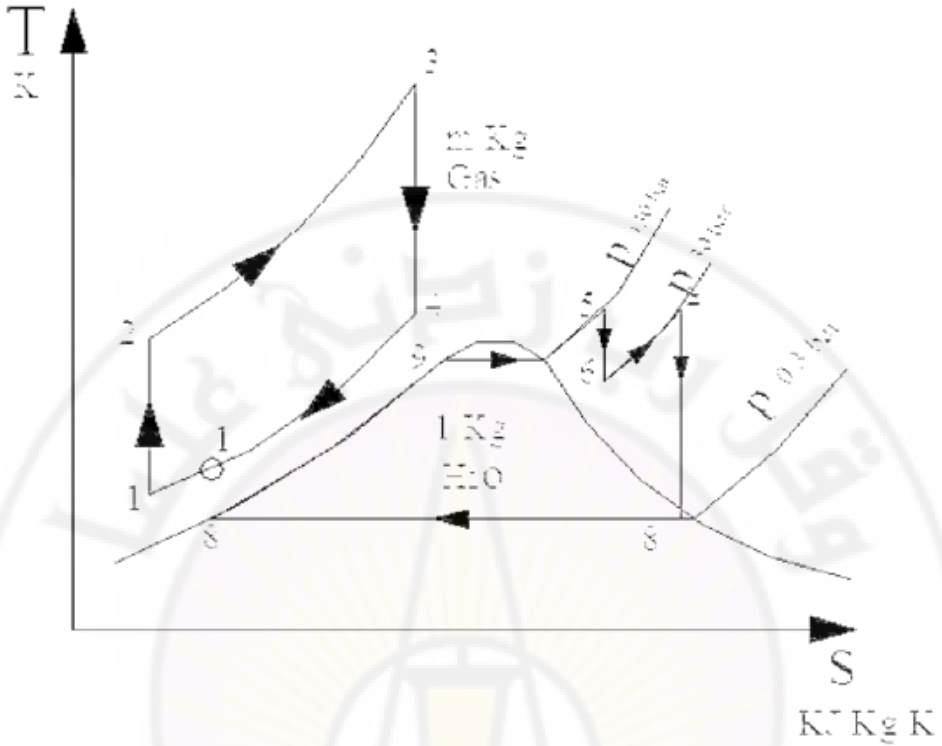
حدد المردود الحراري للدورة المركبة المثالية (بخارية-غازية) وقارنه مع مردود دورة كارنو العاملة في نفس مجال درجتي الحرارة العظمى والدنيا علما بأنه معطى:

بارامترات الغاز :

$$p_1 = 1bar, t_1 = 20°C, t_4 = 120°C, t_3 = 800°C, \lambda = \frac{p_2}{p_1} = 8$$



الشكل (12-18): المخطط الرمزي لمحطة بخارية غازية، تابع للمثال 12-5



الشكل (12-19): الدورة المثالية لمحطة الدورة المشتركة على مخطط (T,s)

بارامترات الماء وبخاره:

$$p_5 = 130bar,\ p_6 = p_7 = 30bar,\ p_8 = 0{,}03bar,\ t_7 = t_5 = 565°C$$

اعتبر عند الحل بأن الغاز له صفات الهواء وأن الحرارة النوعية للهواء ثابتة وكذلك أهمل العمل المصروف على عمل المضخة.

الحل

نقوم بداية بتحديد درجة الحرارة في النقطتين (2) و (4) الموافقتين لحالة الهواء في الآلة العنفية الغازية:

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 293\times 8^{\frac{0{,}4}{1{,}4}} = 531K$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow T_1 = T_3\frac{T_1}{T_2} = 1{,}073\frac{293}{531} = 592\,K$$

بكتابة معادلة الموازنة الحرارية للمسخن الغازي الأولي:

$$m(i_4 - i_{3'}) - i_9 - i_8$$

حيث m كمية الغاز المارة بالآلة الغازية بالنسبة لـ $1kg$ ماء يدور بدارة البخار:

$$m = \frac{i_9 - i_8}{i_4 - i_{3'}} = \frac{i_9 - i_8}{c_p(T_4 - T_{3'})} = \frac{1,532 - 101}{1,005(592 - 392)} = 7,153$$

المردود الحراري:

$$\eta_t = \frac{m[(i_3 - i_4) - (i_2 - i_1)] + (i_5 - i_6) + (i_7 - i_8)}{m(i_3 - i_2) + (i_5 - i_6) + (i_7 - i_8)}$$

$$= \frac{\begin{array}{l} 7,153 \times 1,005[(1,073 - 592) + (531 - 293)] \\ + (3,506 - 3,061) + (3,604 - 2,200) \end{array}}{7,153 \times 1,005(1,073 - 531) + (3,506 - 1,502) + (3,604 - 3,061)}$$

$$= 0,561$$

المردود الحراري لدورة كارنو العاملة في مجال درجتي الحرارة $T_8 = 293K$ (المنبع البارد) و $T_3 = 1,073K$ (المنبع الساخن) هو:

$$\eta_{tC} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_8}{T_3} = 1 - \frac{293}{1,073} = 0,723$$

وبالتالي:

$$\frac{\eta_t}{\eta_{tC}} = 0,78$$

تتم عملية نقل الحرارة من غازات نواتج الاحتراق إلى بخار الماء عن طريق مبادل حراري تعتبر الدورة الغازية في هذا المخطط مفتوحة (لأن غازات نواتج الاحتراق تطرد إلى الوسط الخارجي) بينما للبخار تعد مغلقة (طبيعة جسم التشغيل في الدورة المغلقة لا ينحصر بالماء بل قد يكون CO_2).

مسائل غير محلولة

1-12

حدد المردود الحراري للآلة العنفية البخارية العاملة وفق دورة رانكين المثالية إذا علمت أن بارامترات دخول البخار إلى العنفة $p_1 = 60bar$ و $t_1 = 500°C$ أما الضغط في المكثف $p_2 = 0.05bar$.

الجواب: $\eta_t = 0.4$

2-12

حدد المردود الحراري للآلة العنفية البخارية العاملة وفق دورة رانكين علما بأن بارامترات دخول البخار إلى العنفة هي $p_1 = 30bar$ و $T_1 = 773K$. أجري الحساب من أجل الحالات النهائية الثلاث التالية للضغط p_2 :

$$p_2 = 2bar, p_{2'} = 0.4bar, p_{2''} = 0.04bar$$

الجواب: $\eta_t = 0.237, \eta_{t'} = 0.308, \eta_{t''} = 0.382$

وكما نلاحظ فإن المردود الحراري يزداد مع انخفاض الضغط في نهاية عملية تمدد البخار في العنفة.

3-12

ماذا سيحل بالمردود الحراري للآلة العنفية البخارية إذا بقي الضغط خلف العنفة ثابتا ومساويا لـ $p_2 = 0.05bar$ ودرجة حرارة البخار قبل العنفة بقيت ثابتة أيضا ومساوية لـ $T_1 = 823K$ بينما تغير الضغط قبل العنفة من $p_1 = 30bar$ وحتى $p_{1''} = 90bar$. استعن بمخطط (i,s) لبخار الماء.

الجواب: يزداد المردود بمقدار 4.1%

4-12

بكم مرة يجب أن نخفض كمية الماء اللازم لتبريد مكثف الآلة العنفية البخارية العاملة وفق دورة رانكين وذلك عندما تتغير حالة البخار خلف العنفة من القيم التالية $p_2 = 0.5bar$ و $\chi_2 = 0.06$ إلى القيم التالية $p_{2'} = 0.05bar$ و $\chi_{2'} = 0.15$. افترض

أن مياه التبريد في المكثف في الحالتين الأولى والثانية تسخن حتى درجة حرارة الإشباع.
درجة حرارة دخول مياه التبريد إلى المكثف $t_{w1} = 288\,K$ وضغطها $p_w = 1bar$.

الجواب: ينخفض بمقدار 3.54 مرة

5-12

إلى أية درجة حرارة T_1 يجب أن نسخن البخار في آلة العنفة البخارية كي نغير من كسر الجفاف للبخار الخارج من العنفة (في نهاية عملية التمدد الأديباتي) من $\chi_2 = 0.78$ وحتى $\chi_2 = 0.88$. كيف سيتغير المردود الحراري للدورة.

بارامترات الدورة $p_1 = 30bar, T_1 = 595\,K, p_2 = 0.05bar$.

الجواب: يجب زيادة درجة حرارة البخار حتى $T_1 = 853\,K$ وعندها فإن المردود سيزداد من $\eta_t = 0.352$ وحتى $\eta_t = 0.39$. انظر الشكل (12-20)



الشكل (12-20): تابع للمسألة (12-5)

6-12

حدد المردود للآلة العنفية البخارية العاملة وفق دورة رانكين علما بأن درجة حرارة البخار الداخل للعنفة $t_1 = 500°C$ والضغط في المكثف $p_2 = 0.04bar$. أجري الحساب من أجل الحالات البدائية التالية للضغط: $p_1 = 50 - 100 - 150 - 200bar$.

الجواب: $\eta_t = 0.4 - 0.424 - 0.436 - 0.445$.

7-12

حدد المردود الحراري للآلة العنفية البخارية العاملة وفق دورة رانكن إذا علمت أن بارامترات البخار عند مدخل العنفة $p_1 = 50 bar$ أما الضغط في المكثف (عند مخرج العنفة البخارية) $p_2 = 0.04 bar$. أجري الحساب للحالات التالية معتبراً أن البخار قبل العنفة يملك قيم كسر الجفاف التالية: $\chi_1 = 0.9$ ، $\chi_1 = 1.0$ ، بالنسبة للحالة الثالثة اعتبر أن البخار الداخل للعنفة هو بخار محمص درجة حرارته $t_1 = 450°C$.

الجواب: $\eta_t = 0.376$ ، $\eta_t = 0.351$ ، $\eta_t = 0.347$

8-12

توصف حالة بخار الماء الداخل إلى العنفة البخارية بـ $p_1 = 170 bar$ و $t_1 = 550°C$ ، يتمدد بعدها أديباتياً في المرحلة الأولى للعنفة حتى تصبح درجة حرارته $t_1 = 350°C$. يوجه البخار بعدها إلى محمص ثانوي يعطى للبخار فيه كمية من الحرارة حتى ترتفع درجة حرارته إلى $t_1 = 520°C$ ثم يتمدد بعدها في المرحلة الثانية للعنفة حتى الضغط المطبق في المكثف $p_2 = 0.04 bar$ والمطلوب: حدد المردود الحراري للدورة بوجود تحميص ثانوي للبخار ، حدد حالة البخار النهائية عند خروجه من العنفة، مثّل الدورة على مخططي (T,s) و (i,s).

الجواب: $\eta_t = 0.462$، $\chi_2 = 0.06$

9-12

إلى أية درجة حرارة يجب تسخين البخار في المحمص الثانوي حتى يصبح كسر جفافه في نهاية التمدد الأديباتي في جزء العنفة ذات الضغط المنخفض $\chi_2 = 0.9$ وذلك عند ضغط في المكثف $p_2 = 0.04 bar$ ، علماً بأن ضغط البخار في جزء الضغط العالي من العنفة $p_1 = 15 bar$.

الجواب: يجب تسخين البخار حتى $t_1 = 536°C$


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الثالث عشر

دورات آلات التبريد

- معلومات عامة عن آلات التبريد
- آلات التبريد الضاغطية
  - آلة التبريد الضاغطية الهوائية
  - دورة آلة التبريد البخارية
  - الدورة النظرية لآلة التبريد البخارية
  - الدورة الفعلية لآلة التبريد البخارية (في منطقة البخار المشبع الرطب)
  - تبريد سائل وسيط التبريد قبل صمام التمدد
  - الدورة الفعلية لآلة التبريد البخارية مع سحب بخار مشبع جاف
  - آلة تبريد بخارية مع مبادل حراري استرجاعي
- المضخة الحرارية
- آلات التبريد القاذفة للبخار
  - مبدأ العمل، إجراء العمل النظري والمعامل الحراري
  - خواص عمل آلات التبريد القاذفة البخارية عند عملها على أجسام تشغيل مختلفة
- آلات التبريد الامتصاصية
  - مخطط ومبدأ عمل آلة التبريد الامتصاصية
  - مخطط (ل.ا.ت)
- الأنبوبة الإعصارية
  - لمحة تاريخية
  - مزايا وعيوب الأنبوبة الإعصارية
  - تعريفات هامة (البارامترات المميزة)
  - تصنيفات الأنبوبة الإعصارية
    - الأنبوبة الإعصارية ذات الجريان المتعاكس

- الأنبوبة الإعصارية وحيدة الجريان
- مسائل غير محلولة

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الثالث عشر

دورات آلات التبريد

13-1: معلومات عامة عن آلات التبريد

الغاية الأساسية من التبريد الاصطناعي هو تبريد الأجسام إلى درجة حرارة أخفض من درجة حرارة الوسط المحيط والمحافظة عليها في حالة مبردة ولفترات زمنية طويلة، والأجهزة التي تساعدنا على تحقيق غايتنا ندعوها بآلات التبريد.

تعرف آلة التبريد بأنها الآلة التي تستخدم لتخفيض درجة حرارة فراغ محدود عن طريق صرف طاقة. في هذه الآلة ينجز جسم التشغيل (وسيط التبريد) دورة مغلقة ينقل خلالها كمية من الحرارة من الوسط المراد تبريده إلى الوسط المحيط (ماء أو هواء) أي ينجز دورة تبريدية (في الات التبريد تتحقق الدورة العكسية).

لنقل الحرارة من جسم ذي درجة حرارة منخفضة إلى وسط درجة حرارته أعلى يلزم حسب قانون الترموديناميك الثاني صرف طاقة.

وبحسب شكل هذه الطاقة نميز :

١- آلات التبريد التي تعمل مع صرف عمل ميكانيكي (آلات التبريد الضاغطية بشقيها الهوائية والبخارية)

٢- آلات التبريد التي تعمل مع صرف حرارة (آلات التبريد الإمتصاصية والقاذفة للبخار)

لقد دخلت آلات ومحطات التبريد في جميع فروع الصناعة ولا سيما تلك المتعلقة بعمليات خزن وحفظ المنتجات الغذائية سريعة التلف – في وسائل النقل (البري والبحري والجوي) – في أجهزة تكييف الهواء – في الطب والمعادن وغيرها من الصناعات الأخرى.

سنقوم في هذا الفصل بدراسة تفصيلية لمبدأ عمل آلات التبريد الضاغطية (وهي الأكثر انتشارا) مع إعطاء لمحة عن مبدأ عمل آلات التبريد القاذفة للبخار والأنابيب الإعصارية و آلات التبريد الامتصاصية.

13-2: آلات التبريد الضاغطية

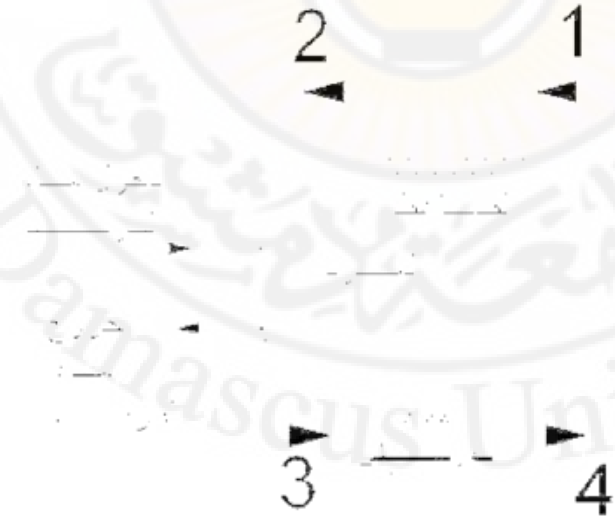
وتقسم حسب طبيعة جسم التشغيل إلى:

أ- آلات تبريد ضاغطية هوائية: جسم التشغيل فيها هو الهواء الذي لا يغير حالته الطورية خلال الدورة التبريدية.

ب- آلات تبريد ضاغطية بخارية: وفيها يغير جسم التشغيل (أمونيا – فريونات...) حالته الطورية من سائل إلى بخار خلال الدورة الواحدة. وتمتاز أجسام التشغيل في الآلات الضاغطية البخارية بأن درجة حرارة غليانها عند الضغط الجوي منخفضة جدا. (على سبيل المثال درجة حرارة غليان الأمونيا تساوي 33.5°C- أما غليان الفريون R12 فهي 30°C- وذلك عند ضغط قريب من الضغط الجوي).

13-2-1: آلة التبريد الضاغطية الهوائية:

تم اختراع هذه الآلة على يد العالم الأمريكي غاري عام (1845) مستخدما كفعل تبريدي تمدد الهواء المضغوط. إن المخطط التوضيحي لهذه الآلة مبين على الشكل (13-1) أما مبدأ العمل فهو على النحو التالي:



الشكل (13-1): الشكل التوضيحي لآلة تبريد ضاغطية هوائية

جسم التشغيل (الهواء) الخارج من حجرة التبريد ببارامترات النقطة (1) يدخل إلى الضاغط حيث تتم عملية انضغاطه حتى الضغط $p_2 = p_k$ وتزداد من جراء ذلك درجة حرارته حتى T_2 . نفترض عملية الانضغاط النظرية أديباتية (العملية 1←2 على الشكل (2-13)).



الشكل (2-13): تمثيل دورة عمل آلة التبريد الهوائية[1] على مخطط (p,v) و (T,s)

الهواء الساخن بعد الضاغط ببارامترات النقطة (2) يرسل إلى المبرد (مبادل حراري) حيث تجري فيه عملية تبريد لهذا الهواء وذلك بثبوت الضغط $p_k = const.$ (العملية 2←3) (الوسط المستخدم في عملية التبريد إما الهواء المحيط أو مياه التبريد) وتنخفض من جراء ذلك درجة حرارته حتى T_3 . الهواء المبرد ببارامترات النقطة (3) يدخل إلى الممدد التوربيني حيث تتم عملية تمدده وفق الأديبات (3←4) وتنخفض خلاله درجة حرارة الهواء إلى درجة حرارة النقطة (4) ويدخل هذا الهواء البارد إلى الحجرة المبردة حيث يسخن فيها من جراء اكتسابه كمية من الحرارة من المواد الموجودة فيها (عملية التسخين تتم بثبوت الضغط $p_2 = p_0 = const.$) (العملية 4←1) ومن ثم تتكرر الدورة من جديد.

[1] من الآن فصاعداً سوف نعتمد على تسميتها آلات التبريد البخارية أو الهوائية.

إذا اعتبرنا الهواء (جسم التشغيل) غازاً مثالياً فإن عمل دورة آلة التبريد الهوائية سيمثل على مخططي (p,v) و (T,s) كما في الشكل (13-2).

لتحديد الفعالية الترموديناميكية لآلات التبريد الهوائية ندخل مفهوم معامل التبريد الذي نرمز له بـ ε وهو بالتعريف نسبة كمية الحرارة q_{2} التي يكتسبها جسم التشغيل خلال الدورة إلى العمل المصروف w لإنجاز هذه الدورة:

$$\varepsilon = \frac{q_{2}}{|w|} \tag{1-13}$$

خلال المناقشات القادمة سنعتبر $c_p = const.$.

q_{2}: كمية الحرارة التي اكتسبها الهواء خلال الدورة (ندعوها بالإنتاجية التبريدية) وهي: كمية الحرارة في العملية الإيزوبارية (4←1) وتقاس على مخطط (T,s) بالمساحة (4-1-b-a-4):

$$q_{2} = i_1 - i_4 = c_p (T_1 - T_4) \tag{2-13}$$

w: العمل المصروف لإنجاز الدورة وهو المجموع الجبري لعملي التمدد والانضغاط في الممدد والضاغط.

العمل المصروف في الضاغط:

$$|w_c| = i_2 - i_1 = c_p (T_2 - T_1) \tag{3-13}$$

عمل التمدد والذي حصلنا عليه في الممدد:

$$w_{3\,4} = i_3 - i_4 = c_p (T_3 - T_4) \tag{4-13}$$

وبالتالي العمل اللازم صرفه لتحقيق الدورة بيانيا يساوي على مخطط (p,v) المساحة (1-4-3-2-1) أي مساحة الدورة، وتحليليا:

$$w = c_p (T_2 - T_1) - c_p (T_3 - T_4) \tag{5-13}$$

$$\varepsilon = \frac{c_p (T_1 - T_4)}{c_p (T_2 - T_1) - c_p (T_3 - T_4)} = \frac{T_1 - T_4}{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)} \tag{6-13}$$

بما أن العملية (1←2) أديبانية وكذلك العملية (3←4) إذا يمكن كتابة:

$$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad , \quad \frac{T_3}{T_4}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

بما أن الأطراف اليمنى متساوية إذاً:

$$\frac{T_2}{T_1}=\frac{T_3}{T_4} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_2-T_3}{T_1-T_4}=\frac{T_2}{T_1}=\frac{T_3}{T_4} \tag{7-13}$$

والشكل النهائي لعلاقة معامل التبريد ε لآلة التبريد الهوائية هو :

$$\varepsilon=\frac{T_1}{T_2-T_1}=\frac{T_4}{T_3-T_4} \tag{8-13}$$

بتقسيم البسط والمقام على T_4 :

$$\varepsilon=\frac{1}{\frac{T_3}{T_4}-1}$$

ولكن في عملية التمدد الأديباتي 3←4 نجد:

$$\frac{T_3}{T_4}=\left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\varepsilon=\frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}-1} \tag{9-13}$$

أي أن معامل التبريد للدورة السابقة يتعلق فقط بنسبة الضغطين $\frac{p_2}{p_1}$:

p_1 : الضغط قبل الضاغط (بعد الممدد التوربيني)،

p_2 : الضغط بعد الضاغط (قبل الممدد التوربيني).

واضح من الشكل (13-3) أن كمية الحرارة التي يكتسبها جسم التشغيل في دورة كارنو العكسية (1-4'-3-2'-1) (العاملة بين درجة حرارة مياه التبريد T_3 ودرجة الحرارة اللازمة لتبريد جسم التشغيل T_4) هي أكبر من تلك لدورة آلة التبريد الهوائية (1-2-3-4-1).

بيانياً لدينا: $(a\text{-}4\text{-}1\text{-}b\text{-}a) < (4'\text{-}a\text{-}b\text{-}a\text{-}4')$

أما العمل المصروف لتحقيق دورة آلة التبريد الهوائية (دورة لورنس) بيانياً هو أكبر من ذلك المصروف في دورة كارنو العكسية:

$$(1\text{-}2'\text{-}3\text{-}4'\text{-}1) < (1\text{-}2\text{-}3\text{-}4\text{-}1)$$



الشكل (13-3): تمثيل دورة عمل آلة تبريد هوائية ودورة كارنو على مخطط (T,s)

كذلك نلاحظ من الشكل نفسه أن كمية الحرارة المطروحة في دورة كارنو أصغر مما هي عليه في دورة لورنس: $(2\text{-}3\text{-}a\text{-}b\text{-}2) < (4'\text{-}1\text{-}b\text{-}a\text{-}4')$

يعطى معامل التبريد لدورة كارنو العكسية وللمجال نفسه لدرجات الحرارة لدورة آلة التبريد الهوائية (انظر العلاقة 5- 11 من الجزء الأول):

$$\varepsilon_c = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

حيث T_1 درجة حرارة المنبع البارد،

T_2 درجة حرارة المنبع الساخن.

وبالنتيجة فإن معامل التبريد لدورة كارنو العكسية أكبر من معامل التبريد لدورة آلة التبريد الهوائية $\varepsilon > \varepsilon_{'}$.

كما ذكرنا فإن آلات التبريد الهوائية كانت الأولى في الحصول على التبريد الاصطناعي أما حاليا فهي لا تستخدم على نطاق واسع وذلك بسبب انخفاض الحرارة النوعية للهواء الأمر الذي يؤدي عند استعماله كوسيط تبريد إلى استخدام كميات كبيرة (حجوم كبيرة) منه بالمقارنة مع وسائط التبريد المستخدمة في آلات التبريد البخارية وذلك من أجل الإنتاجية التبريدية نفسها. فالحجوم الكبيرة من الهواء الدائر في آلة التبريد تجعلها كبيرة الحجم الأمر الذي يزيد من سعرها ويتسبب بظهور صعوبات إضافية عند الاستثمار.

مثال 13-1

يخرج الهواء من غرفة التبريد لآلة تبريد هوائية بضغط $p_1 = 1bar$ ودرجة حرارة $t_1 = -10°C$ متجها إلى الضاغط الأديباتي حيث يرفع ضغطه حتى $p_2 = 5bar$ ومن ثم يتجه إلى مبرد الهواء فيبرد عند $p = const.$ وتنخفض درجة حرارته إلى $t_3 = 10°C$ ، من بعدها يدخل الهواء إلى أسطوانة الممدد حيث يتمدد بصورة أديباتية حتى قيمة الضغط البدائي المطبق في حجرة التبريد ويكتسب فيها الهواء الحرارة من المواد المراد تبريدها فيسخن فيها حتى $t_1 = -10°C$ ويسحبه من بعدها الضاغط والمطلوب:

أ- حدد درجة حرارة الهواء الداخل إلى حجرة التبريد t_4.

ب- حدد درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط t_2.

ت- العمل النظري المصروف لتحقيق الدورة.

ث- الإنتاجية التبريدية النوعية من أجل $1kg$ هواء.

ج- معامل التبريد مع التمثيل على مخطط (p,v) و (T,s).

اعتبر عند الحل $R_{air} = 287J/kgK$.

الحل

تمثيل الدورة على مخطط (p,v) و (T,s) مبين على الشكل (13-2).

من مخطط (p,v) أو (T,s) فإن بارامترات الهواء الداخل إلى حجرة التبريد تمثلها بارامترات النقطة (4):

$$\frac{T_4}{T_3}=\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \Rightarrow \quad T_4=283\left(\frac{1}{5}\right)^{0.286}=179\,K$$

درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط:

$$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \Rightarrow \quad T_2=263\left(\frac{5}{1}\right)^{0.286}=416\,K$$

العمل المصروف لإنجاز الدورة يساوي إلى الفرق بين العمل المصروف في الضاغط والعمل المفيد الذي نحصل عليه من الممدد التوربيني:

$$w_c=c_p\left(T_2-T_1\right)=\frac{k\,R}{k-1}\left(T_2-T_1\right)$$

$$=\frac{1.4\times 287}{0.4}\left(416-263\right)=153{,}688\,J/kg$$

أما العمل الذي نحصل عليه من الممدد التوربيني:

$$w_p=c_p\left(T_3-T_4\right)=\frac{k\,R}{k-1}\left(T_3-T_4\right)$$

$$=\frac{1.4\times 287}{0.4}\left(283-179\right)=104{,}468\,J/kg$$

وبالتالي عمل الدورة:

$$w=\left|w_c\right| \quad w_p=\frac{153{,}688-104{,}468}{1{,}000}=49.22\,kJ/kg$$

الإنتاجية التبريدية:

$$q_o=c_p\left(T_1-T_4\right)=\frac{1.4\times 287}{0.4\times 1{,}000}\left(263-179\right)=84.378\,kJ/kg$$

وبالتالي:

$$\varepsilon=\frac{q_o}{w}=\frac{84.378}{49.22}=1.71$$

13-2-2: دورة آلة التبريد البخارية

لاقت آلات التبريد البخارية في الوقت الحالي انتشارا واسعا. في هذه الآلات تستخدم أجسام تشغيل درجة حرارة غليانها عند الضغط الجوي منخفضة وأكثر هذه السوائل استخداما كان الأمونيا ونظرا لكونه غازا ساما بدأ التوجه إلى استخدام سوائل أخرى كالفريونات التي تحمل الصيغة الكيميائية العامة:

$$C_m H_x F_y Cl_z$$

حيث C الكربون، H الهيدروجين، F الفلور، Cl الكلور. إن تسمية الفريونات مشتقة من كلمة "Refrigerant" (البرد) وعادة يرمز إلى الفريون برمز مختصر بدلاً من كتابة الصيغة الكيماوية وعلى سبيل المثال الفريون (12) رمزه R12 بينما صيغته الكيميائية CCl_2F_2 والفريون (22) رمزه R22 صيغته الكيميائية $CHClF_2$ وهكذا.

يدل رمز الفريون على المعلومات التالية:

١- يرمز الرقم الأول من اليمين (الآحاد) إلى عدد ذرات الفلور في المركب.

٢- يرمز الرقم الثاني من اليمين (العشرات) إلى عدد ذرات الهيدروجين مضافاً إليه واحد.

٣- يرمز الرقم الثالث من اليمين (المئات) إلى عدد ذرات الفحم منقوص منه واحد.

٤- يكون عدد ذرات الكلور ضمن الفريون بحيث يحقق الصيغة التالية:

$$C_n(H,Cl,F) - 2n + 2 \qquad (10\text{-}13)$$

كمثال نأخذ الفريون R13 بتطبيق الملاحظات المذكورة أعلاه نجد عدد ذرات الهيدروجين يساوي الصفر $(H-0)$، عدد ذرات الفلور يساوي $(F-3)$، عدد ذرات الكربون $(n=1)$، عدد ذرات الكلور $(2n+2=2\times1+2=4)$ أي $H+F+Cl=4$، عدد ذرات الكلور يساوي الواحد والصيغة الكيميائية لوسيط التبريد R13 هي CF_3Cl.

يبين الجدول (13-1) البارامترات الفيزيائية لبعض وسائط التبريد.

على اعتبار أن جسم التشغيل في هذه الآلات يغير من حالته الطورية من سائل إلى بخار وبالعكس خلال الدورة الواحدة لذلك لا يمكن أن نفترضه غازاً مثالياً وبالتالي لا يمكن أن نستخدم علاقات الغاز المثالي في إيجاد بارامترات نقاط الدورة هنا.

تستخدم في الحسابات الترموديناميكية لآلات التبريد البخارية جداول ومخططات وسائط التبريد المستخدمة في هذه الآلات (كما هو الحال في بحث بخار الماء) والتي تم إنشاؤها لكل وسيط تبريد وأكثر هذه المخططات انتشاراً مخططا $(i,\log p)$ (يرمز له أحيانا (p,h) وعليه تمثل قيم الضغط p على محور التراتيب وقيم الإنتالبي h على محور السينات) و (T,s).

إن الميزة الأساسية لمخطط $(i,\log p)$ هي أن كميات الحرارة في العمليات الإيزوبارية تقاس عليه بأطوال القطع المستقيمة الأفقية (كما سنرى ذلك فيما بعد)، (بينما يبقى كل ما ذكر عن مخطط (T,s) لبخار الماء صحيحاً لوسائط التبريد).

الجدول (13-1): البارامترات الفيزيائية لبعض وسائط التبريد

وسيط التبريد	رمزه الكيميائي	درجة حرارة الغليان عند $p-1bar$ $[°C]$	درجة الحرارة الحرجة $[°C]$	درجة حرارة التجمد عند $p-1bar$ $[°C]$	الضغط الحرج $[bar]$
أمونيا	NH_3	-33.7	132.4	-77.7	109.5
ثاني أكسيد الكبريت	SO_2	-10.1	157.2	-75.2	76.4
ثاني أكسيد الكربون	CO_2	-78.9	31.35	-56.6	71.6
الفريون 12	CF_2Cl_2	-30.6	111.5	-155	40
الفريون 22	CHF_2Cl	-43.7	96	-160	–

يقسم المنحنيين الحديين $\chi = 0$ (سائل مشبع لوسيط التبريد) و $\chi = 1$ (بخار مشبع جاف لوسيط التبريد) مخطط $(i, \log p)$ إلى ثلاثة مناطق:

١- منطقة السائل: الواقعة على يسار $\chi = 0$ ومحور i.

٢- منطقة البخار المشبع الرطب لوسيط التبريد المحصورة بين $\chi = 0$ و $\chi = 1$ وفيها ينطبق الإيزوبار على الإيزوترم.

٣- منطقة البخار المحمص: الواقعة على يمين $\chi = 1$. انظر الشكل (13-4).



الشكل (13-4): مخطط $(i, \log p)$

ونبين فيما يلي الخطوط الرئيسية الموجودة على مخطط $(i, \log p)$ (الإيزوبارات والإيزوترمات والإيزوخورات وخطوط ثبوت الأنتروبي والأنتالبي مع خطوط كسر الجفاف). الأشكال(13-5) وحتى الشكل (13-9):

١- خطوط ثبوت الإنتروبي $s = const.$ الذي يقدر بـ $[kJ/kgK]$: وهي خطوط قطرية مع ميل ناحية الاتجاه الرأسي، الشكل (13-5).

٢- خطوط ثبوت الضغط $p = const.$ الذي يقدر بـ $[bar]$: وتمثل على مخطط $(i, \log p)$ بمستقيمات أفقية موازية لمحور الإنتالبي، الشكل (13-6).

٣- خطوط ثبوت الإنتالبي $i = const.$ وتمثل على مخطط $(i, \log p)$ بمستقيمات شاقولية موازية لمحور $\log p$ ويقدر بـ $[kJ/kg]$، الشكل(13-6).

٤- خطوط ثبوت درجة الحرارة $t = const.$ يكون لها شكل خطوط مستقيمة شاقولية في منطقة السائل لتصبح أفقية منطبقة على الإيزوبارات في منطقة البخار المشبع الرطب، ثم تأخذ شكلاً منحنياً باتجاه الأسفل في منطقة البخار المحمص، الشكل (13-6). تقدر واحدة قياس درجات الحرارة بـ [°C].

الشكل (13-5): خطوط ثبوت الانتروبي $s = const.$

الشكل (13-6): خطوط ثبوت درجة الحرارة وثبوت الضغط وخطوط ثبوت الانتالبي

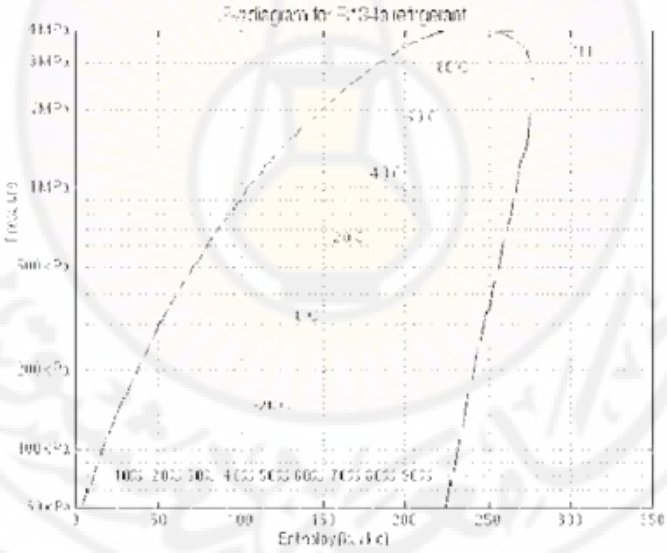
٥- خطوط ثبوت الحجم النوعي $v = const.$ ، واحدته $\left[m^3 / kg\right]$: وهي على شكل منحنيات تقريبا أفقية في منطقة البخار المحمص مع زاوية ميل بسيطة بالاتجاه الرأسي، الشكل (13-7).

٦- خطوط ثبوت كسر الجفاف $\chi = const.$ وهي مبينة في الشكل (13-8)، جميع هذه الخطوط تنطلق من النقطة الحرجة (k) وهي محصورة بين قيمتين حديتين لـ χ هما $\chi = 0$ المنحني الحدي الأدنى (يمثل حالات السائل المشبع لوسيط التبريد)، والمنحنى الحدي الأعلى $\chi = 1$ (ويمثل حالات البخار المشبع الجاف) لوسيط التبريد.

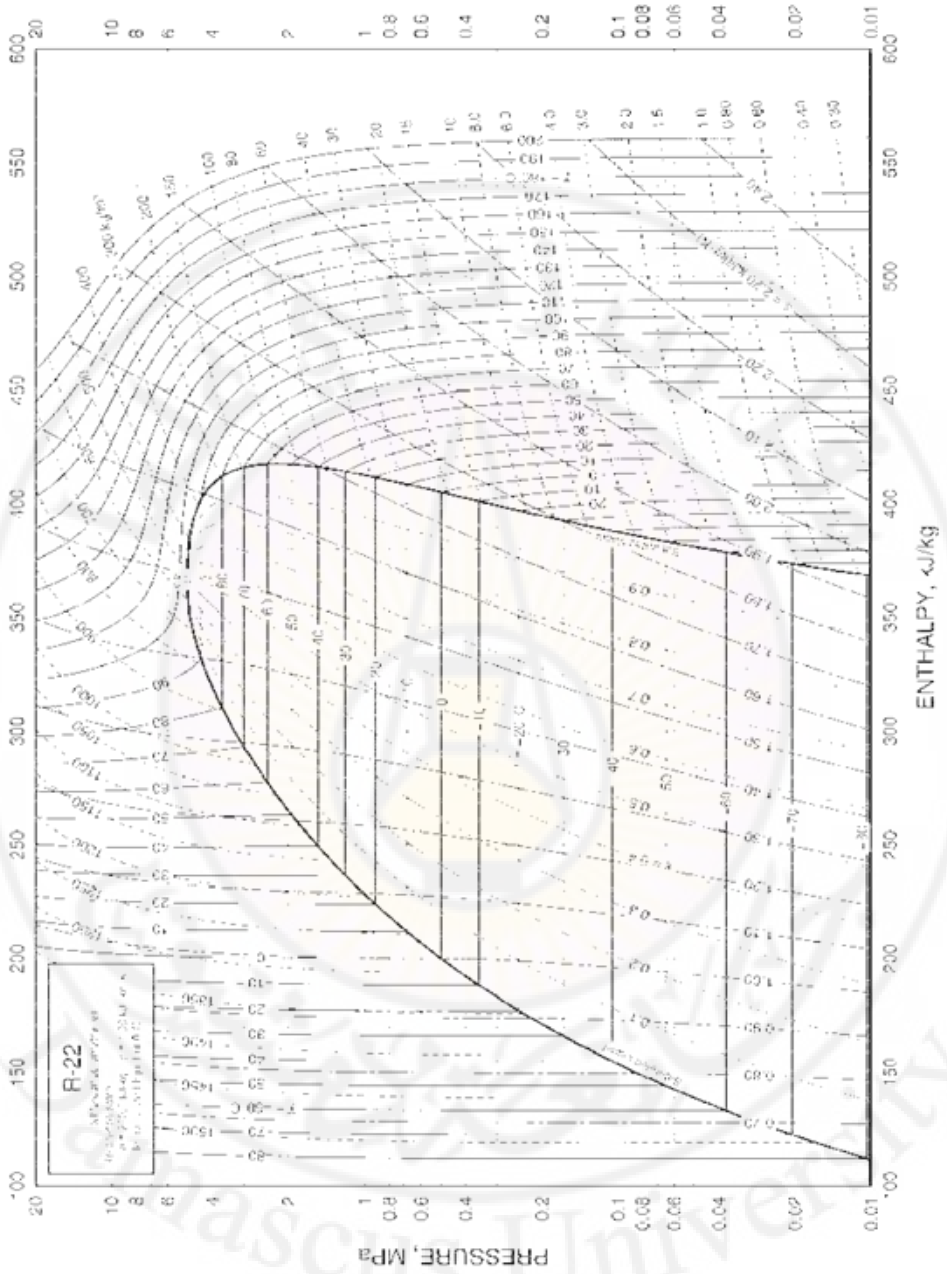
يبين الشكل (13-9) بعض الخطوط السابقة على مخطط $(i, \log p)$ لوسيط التبريد R134a وذلك بمقياس معين، أما الشكل (13-10) فيظهر عليه مخطط $(i, \log p)$ بكامل خطوطه لوسيط التبريد R22. أما مخططات $(i, \log p)$ لوسائط تبريد أخرى (R717:الأمونيا، R134a) فهي مبينة في الملحقين -4- و -5-.

الشكل (13-7): خطوط ثبوت الحجم النوعي $v = const.$

الشكل (13-8): خطوط كسر الجفاف على مخطط $(i, \log p)$



الشكل (13-9): بعض الخطوط على مخطط $(i, \log p)$ لوسيط التبريد R134a

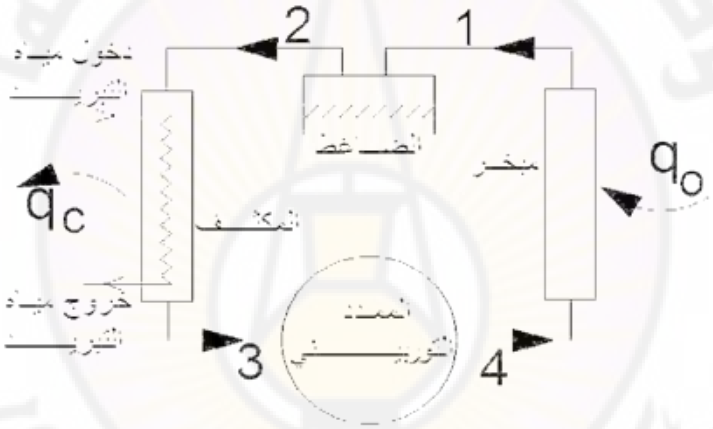


الشكل (13-10): مخطط $(i, \log p)$ لـ R22

3-2-13: الدورة النظرية لآلة التبريد البخارية

تجري هذه الدورة في منطقة البخار المشبع الرطب لوسيط تبريد لا على التعيين وذلك مع وجود ممدد توربيني ويبين الشكل (13-11) آلة تبريد بسيطة مؤلفة من مبخر وضاغط ومكثف وممدد توربيني بينما يظهر على الشكل (13-12) تمثيل دورة العمل على مخطط (T,s) و $(i,\log p)$. يتم عمل هذه الدورة على النحو التالي:

البخار الرطب الخارج من المبخر بمارامترات النقطة (1) يدخل إلى الضاغط حيث ينضغط بثبوت الأنتروبي حتى النقطة (2) لتصبح بارامترات الغاز p_c, T_c . لتحقيق عملية الانضغاط هذه نحتاج إلى صرف قدرة ميكانيكية w_c .



الشكل (13-11): مخطط توضيحي لآلة تبريد بخارية

من ثم يتجه البخار المضغوط إلى المكثف حيث يتكاثف عند ضغط ودرجة حرارة ثابتين العملية (2←3) مع حدوث انتقال حراري من جسم التشغيل الساخن إلى الوسط المحيط الأبرد. يدخل وسيط التبريد السائل الخارج من المكثف إلى الممدد التوربيني حيث يتم تمدده بثبات الإنتروبي وبالتالي نحصل على عمل مفيد (العملية 3←4). نتيجة العملية (3←4) ينخفض كل من ضغط ودرجة حرارة سائل وسيط التبريد إلى T_o و p_o ، يتجه المزيج المكون من السائل والبخار الخارج من الممدد إلى المبخر حيث يقوم وسيط التبريد بامتصاص الحرارة من الوسط المراد تبريده عن طريق تبخر السائل عند ضغط p_o ودرجة حرارة T_o ثابتين.

من الشرح السابق نلاحظ أن الدورة مؤلفة من عمليتين بثبوت الإنتروبي (1←2) و (3←4)، وعمليتين بثبوت الضغط إحداهما في المبخر (4←1) والأخرى في المكثف (2←3) (وهما في الوقت نفسه عمليتان بثبوت درجة الحرارة لأن كلتا العمليتين تقعان بكاملهما في منطقة البخار المشبع الرطب)، فالدورة السابقة هي دورة كارنو العكسية ومعامل التبريد لهذه الآلة يحدد كالتالي:

$$\varepsilon = \frac{q_e}{|w|} = \frac{q_e}{|q_c| - q_e} \qquad (11\text{-}13)$$



الشكل (13-12): تمثيل دورة عمل آلة تبريد بخارية على مخطط (T,s) و $(i,\log p)$

q_e : كمية الحرارة التي اكتسبها وسيط التبريد في المبخر (الإنتاجية التبريدية) خلال العملية الإيزوبارية (الإيزوترمية) 4←1.

تتحدد الإنتاجية التبريدية من أجل $1kg$ وسيط تبريد بيانيا بالمساحة (4-1-b-a-4) على مخطط (T,s) وطول القطعة المستقيمة (4-1) على مخطط $(i,\log p)$ أما تحليليا فتحسب:

$$q_e = T_e(s_1 - s_4) = i_1 - i_4 \qquad (12\text{-}13)$$

q_c كمية الحرارة التي فقدها وسيط التبريد في المكثف (العملية الإيزوبارية – الإيزوترمية: 2←3)، بيانيا تمثلها المساحة (2-3-a-b-2) على المخطط (T,s) وطول القطعة (2-3) على مخطط $(i,\log p)$ وتحسب تحليليا بالعلاقة:

$$|q_c| = i_2 - i_3 = T_c\,(s_2 - s_3) \qquad (13\text{-}13)$$

يمثل عمل الضاغط بيانياً بالمساحة (1-2-3-5-1) على مخطط (T,s) وبطول القطعة الأفقية (1-2) على المخطط $(i,\log p)$ أما عمل الممدد التوربيني تمثله المساحة (3-4-5-3) على مخطط (T,s) وطول القطعة الأفقية (3-4) على $(i,\log p)$، عمل الدورة تمثله مساحة الدورة (1-4-3-2-1) على مخطط (T,s) وبالتالي معامل التبريد:

$$\varepsilon = \frac{q_w}{|w|} = \frac{Area:(4-1-b-a-4)}{Area:(1-2-3-4-1)}$$

$$\varepsilon = \frac{T_w\,(s_1 - s_4)}{(T_w - T_c)(s_1 - s_4)} = \frac{T_w}{T_w - T_c} \qquad (14\text{-}13)$$

والتي سبق واستخرجناه في الجزء الأول من كتاب الترموديناميك (انظر 5-11).

تتميز آلة التبريد البخارية بالمقارنة مع آلة التبريد الهوائية بمجموعة من المواصفات الايجابية على رأسها:

- معامل تبريدها أكبر من الهوائية
- كبر الإنتاجية التبريدية النوعية الذي يؤدي بدوره إلى انخفاض التدفق الحجمي لوسيط التبريد وبالتالي إلى انخفاض حجوم الآلة.

مثال 13-2

يبين الشكل (13-11) المخطط التوضيحي لآلة التبريد البخارية العاملة على الأمونيا ضمن منطقة البخار المشبع الرطب مؤلفة من ضاغط ومكثف وممدد توربيني ومبخر. بفرض $t_c = 20°C, t_w = -10°C$ وأن كسر الجفاف للبخار الخارج من الضاغط $\chi_2 = 1$ وعند الخروج من المكثف $\chi_3 = 0$ والمطلوب:

١- حساب كسر الجفاف للنقطتين (1) و (4).

٢- الإنتاجية التبريدية النوعية لهذه الآلة q_w.

٣- كمية الحرارة المطروحة في المكثف q_c.

٤- العمل المصروف في الدورة.

٥- معامل التبريد.

الحل:

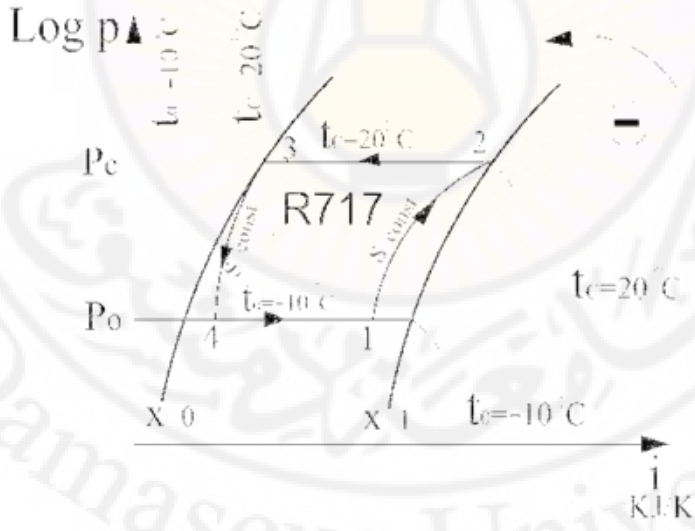
يمكن حل المثال إما باستخدام الجداول (انظر الملحق -7-) أو باستخدام مخططات وسائط التبريد (انظر الملحق -4-) وذلك تبعاً لنوع وسيط التبريد المستخدم في آلة التبريد (انظر الملحقين -5- و -6- للفريون R134a والشكل 13-10 والملحق -8- للفريون R22) أو باستخدام الجداول والمخططات معاً. فيما يلي نشرح طريقة حل المثال باستخدام مخططات وجداول وسيط التبريد (الأمونيا). نقوم بداية بتمثيل النقاط الأربعة للدورة على مخطط ($t, \log p$) لوسيط التبريد R717 بدلالة المعطيات الموجودة معنا، انظر الشكل (13-13):

النقطة (2): تحدد من تقاطع $t_c = 20°C$ و $\chi_2 = 1$.

النقطة (3): تحدد من تقاطع $t_c = 20°C$ و $\chi_3 = 0$.

النقطة (1): تحدد من تقاطع $t_o = -10°C$ و $s_1 = s_2$.

النقطة (4): تحدد من تقاطع $t_o = -10°C$ و $s_4 = s_3$.



الشكل (13-13): تابع للمثال (13-2)

بالنتيجة نرسم الجدول التالي موضحين فيه قيم البارامترات لوسيط التبريد في النقاط الأربعة للدورة:

$s\left[kJ/kgK\right]$	$i\left[kJ/kg\right]$	$t\left[°C\right]$	البارامترات
8.565	1,570.36	-10	1
8.565	1,699.50	20	2
4.515	512.38	20	3
4.515	504.07	-10	4

يمكن تحديد بارامترات النقطتين (1) و (4) إما بواسطة جداول الأمونيا المشبعة (انظر الملحق -7-) وباستخدام العلاقات (8-10 وحتى 8-13) كون النقطتين تقعان في منطقة البخار المشبع الرطب للأمونيا، أو من مخطط $(i,\log p)$. لما كانت الحالتين (1) و (4) لبخار الأمونيا المشبعة الرطبة واقعتين على الإيزوترم $t_1 = t_4 = -10°C$ إذا ومن الجداول نجد:

$$t_1 = t_4 = -10°C \Rightarrow \begin{cases} i' - 372.75\,kJ/kg \\ i'' = 1{,}669.15\,kJ/kg \\ s' = 4.016\,kJ/kgK \\ s'' - 8.94\,kJ/kgK \end{cases}$$

$$s_1 - s_2 - s' + \chi_1(s'' - s') \Rightarrow \chi_1 - \frac{s_1 - s'}{s'' - s'} - \frac{8.565 - 4.016}{8.94 - 4.016} - 0.92$$

$$s_4 = s_3 = s' + \chi_4(s'' - s') \Rightarrow \chi_4 = \frac{s_4 - s'}{s'' \quad s'} = \frac{4.515 - 4.016}{8.94 \quad 4.016} = 0.1$$

تستخدم العلاقتين التاليتين من أجل تحديد قيمتي الأنتالبي في النقطتين (1) و (4):

$$i_1 = i' + \chi_1(i'' - i') = 372.75 + 0.92(1{,}669.15 - 372.75) = 1{,}570.36\,kJ/kg$$

$$i_4 = i' + \chi_4(i'' - i') = 372.75 + 0.1(1{,}669.15 - 372.75) = 540.07\,kJ/kg$$

الإنتاجية التبريدية النوعية (العلاقة 13-12):

$$q_o = 1{,}570.36 - 504.07 = 1{,}066.29\,kJ/kg$$

الحرارة المطروحة في المكثف إلى مياه التبريد (العلاقة 13-13):

$$|q_c| = i_2 - i_3 = 1{,}699.5 - 512.38 = 1{,}187.12\,kJ/kg$$

ملاحظة:

بما أن العمليتين الإيزوباريتين (2←3) و (4←1)، انظر الشكل (13-12)، تقعان بكاملهما في منطقة البخار المشبع الرطب للأمونيا وبما أن الإيزوبار ينطبق على الإيزوترم في هذه المنطقة لذا يمكن عند الحل اعتبار أن كلا من العمليتين (2←3) و (4←1) هما عمليتان إيزوترميتان أيضاً، أي يمكن أن نطبق قوانين العملية الإيزوترمية (8-25) عليهما.

الإنتاجية التبريدية:

$$q_o = T_o(s_1 - s_4) = 263(8.565 - 4.515) = 1,065.15 kJ/kg$$

الحرارة المطروحة في المكثف من وسيط التبريد الأمونيا الساخنة إلى الوسط المحيط (ماء أو هواء أو وسيط تبريد آخر):

$$|q_c| = T_c(s_2 \quad s_3) = 293(8.565 \quad 4.515) = 1,186.65 kJ/kg$$

العمل المصروف لتحقيق الدورة:

$$w = |q_c| - q_o = 1,187.12 - 1,065.15 = 121.97 kJ/kg$$

معامل التبريد:

$$\varepsilon = \frac{q_o}{w} = \frac{1,065.15}{121.97} = 8.733$$

يمكن التحقق من صحة قيمة معامل التبريد الناتجة من العلاقة (13-14) وعندها:

$$\varepsilon = \frac{T_o}{T_c - T_o} = \frac{263}{293 - 263} = 8.767$$

ملاحظة :

يمكن حل المثال بالشروط المعطاة بمساعدة جداول الأمونيا المشبعة R717 بالكامل والموجودة في الملحق -7- وبالاستعانة بعلاقات البخار المشبع (8-11) وحتى (8-13).

مثال 13-3:

أعد حل المثال 13-2 وللمعطيات نفسها بعد استبدال وسيط التبريد الأمونيا بـ R22.

الحل:

نقوم أولاً بتحديد أنتالبي النقاط (1)، (2)، (3)، (4) بالاستعانة بمخطط $(i, \log p)$ للوسيط R22 المبين بالشكل (13-10)، ويظهر على الشكل (13-14) تمثيل الدورة على هذا المخطط.

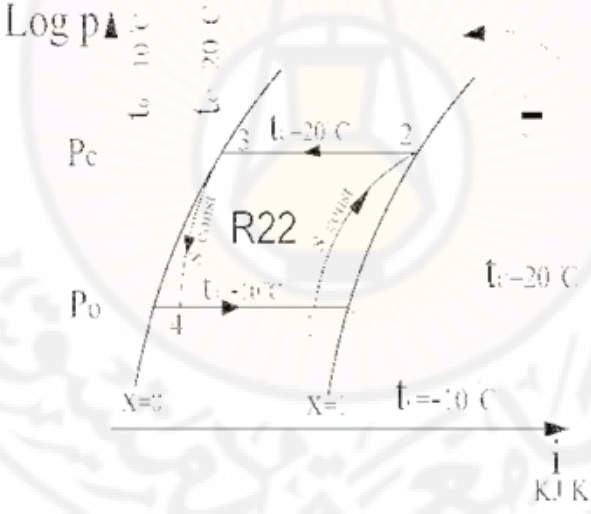
النقطة	1	2	3	4
$i[kJ/kg]$	390	410	227.5	221.25

١- يمكن تحديد كسر الجفاف مباشرة من المخطط:

$$\chi_4 = 0.14, \chi_1 = 0.95$$

٢- الإنتاجية التبريدية:

$$q_o = i_1 - i_4 = 390 - 221.25 = 168.75 kJ/kg$$



الشكل (13-14): تابع للمثال (13-3)

٣- الحرارة المطروحة في المكثف:

$$q_c = |i_3 - i_2| = |227.5 - 410| = 182.5 kJ/kg$$

٤- العمل المصروف لتحقيق الدورة:

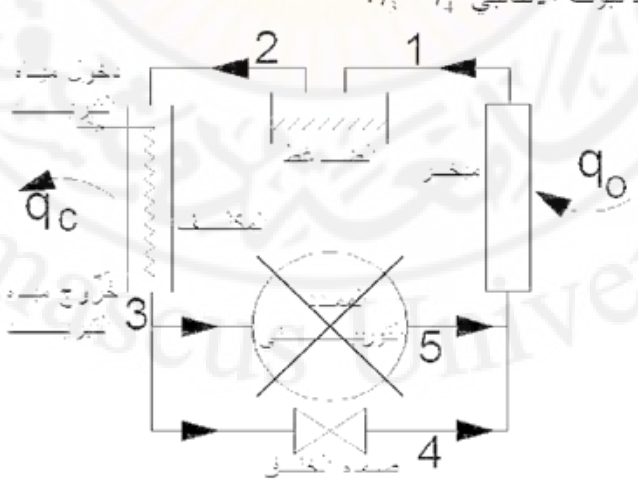
$$w = |q_c| - q_o = 13.75\,kJ/kg$$

$$\varepsilon = \frac{q_o}{w} = \frac{168.75}{13.75} = 12.273$$

ملاحظة: يمكن حل المثال باستخدام جداول أبخرة الفريون R22 الموجودة في الملحق -8-

13-2-4: الدورة الفعلية لآلة التبريد البخارية (في منطقة البخار المشبع الرطب)

إن صعوبة صناعة الممدد التوربيني المخصص لتمدد سائل وسيط التبريد في منطقة البخار المشبع الرطب وانخفاض قيمة العمل المفيد الذي نحصل عليه من الممدد بالمقارنة مع العمل المبذول في الضاغط، يعدان سببان كافيان لاستبدال الممدد التوربيني بصمام تمدد الذي يمتاز أيضا بصغر حجمه مقارنة مع الممدد. في الشكل (13-15) يظهر مخطط توضيحي لآلة التبريد البخارية مع صمام تمدد بينما يبين الشكل (13-16) تمثيل دورة عمل هذه الآلة في منطقة البخار المشبع الرطب على مخططي (T,s) و $(i,\log p)$. كما هو واضح في هذا الشكل فإن عملية الخنق لا تتم بثبوت الإنتروبي كما هو الحال في الممدد التوربيني فالتمدد لا يتم وفق العملية (3←5) بل عن طريق عملية الخنق اللاعكوسة التي تبدأ بالنقطة (3) وتنتهي بالنقطة (4): 3←4. النقطتان (3) و (4) تقعان على خط ثبوت الأنتالبي $i_3 - i_4$.



الشكل (13-15): الشكل التوضيحي لآلة التبريد البخارية الفعلية



الشكل (13-16): تمثيل دورة عمل آلة تبريد بخارية فعلية على مخطط (T,s) و $(i,\log p)$

إن تمثيل عملية الخنق عبر خانق وحيد يمكن أن يتم اصطلاحيا على مخطط (T,s) كمجموع عمليتين: تمدد أديباتي مثالي (3←5) (إذا أهملنا الاحتكاك) حتى الضغط $p_4 = p_3$ تليها عملية تسخين إيزوباري حتى الحالة (4)، وحيث أن عدم تمثيل عملية الخنق (3←4←5) لا يعيق الحسابات فهي لا تمثل في غالبية المراجع. من الشكل(13-16) نلاحظ أن الإنتاجية التبريدية في الحالة مع خانق انخفضت بمقدار Δq_0 مقارنة مع وجود ممدد توربيني. كذلك فقد ضاع العمل المفيد في الممدد وأصبح العمل المستهلك في الدورة مساويا لعمل الضاغط (المساحة 1-6-3-2-1 بدلا من المساحة 1-2-3-5-1)، وعليه فإن معامل التبريد للآلة مع وجود صمام تمدد بعد الأخذ في الحسبان العلاقة (13-11):

$$q_0 = q_{1-4} = q_{0'} = i_1 - i_4$$

$$q_c = q_{2-3} = q_{0''} = |i_2 - i_3| = i_2 - i_3$$

$$\varepsilon = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_3 + i_4 - i_1}$$

وإذا أخذنا في الحسبان أن $i_3 = i_4$ نكتب:

$$\varepsilon = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1} = \frac{i_1 - i_4}{|w_c|} \qquad (15\text{-}13)$$

بنتيجة الخنق فإن عمل التمدد لا يطرح من تيار وسيط التبريد بل يتحول إلى حرارة احتكاك، حرارة الاحتكاك يمتصها وسيط التبريد مما يؤدي إلى زيادة كسر جفافه في العملية (3←4) مقارنة مع العملية (3←5) (في حال وجود ممدد توربيني) الأمر الذي يؤدي إلى ضياع بالإنتاجية التبريدية للدورة: المساحة (b-5-4-c-b) $= \Delta q_{ev}$ وذلك على مخطط (T,s)، وكما ورد أعلاه بأن $i_3 = i_4$ لهذا فإن عمل التمدد $w = i_3 - i_5$ يساوي بالقيمة $\Delta q_{ev} = i_4 - i_5$، وبهذه الصورة فإن انخفاض الإنتاجية التبريدية للدورة من جراء عملية الخنق اللاعكوسة تمثله المساحة (b-5-4-c-b). لمّا كانت الإيزوبارات في منطقة السائل على مخطط (T,s) تتوضع على المنحني الحدي الأدنى $\chi = 0$ عندها عملية تغير الحالة (3←6) (عملية تسخين سائل غير مشبع بعملية إيزوبارية عند p_c) و (4←6) (عملية غليان إيزوبارية لسائل مشبع عند الضغط p_e) تترافقان باكتساب كمية الحرارة نفسها:

$$\Delta q = i_3 - i_6 = i_4 - i_6$$

لهذا فإن المساحتين الواقعتين تحت العمليتين متساوية أي أن المساحة (a-6-4-c-a) مساوية للمساحة (a-6-3-b-a). وبما أن ضمنهما المساحة (a-6-5-b-a) مشتركة فإن المساحة (6-3-5-6) تساوي للمساحة (b-5-4-c-b) أي أن عمل التمدد يساوي أيضاً للمساحة (6-3-5-6)، وبالتالي الإنتاجية التبريدية للدورة انخفضت بمقدار ضياع الخنق $\Delta q_{ev} = i_4 - i_5$ الذي يساوي لعمل الممدد w_e.

معامل التبريد للدورة بوجود صمام تمدد (خنق) أقل من معامل التبريد لدورة كارنو المحققة في نفس مجال درجتي الحرارة:

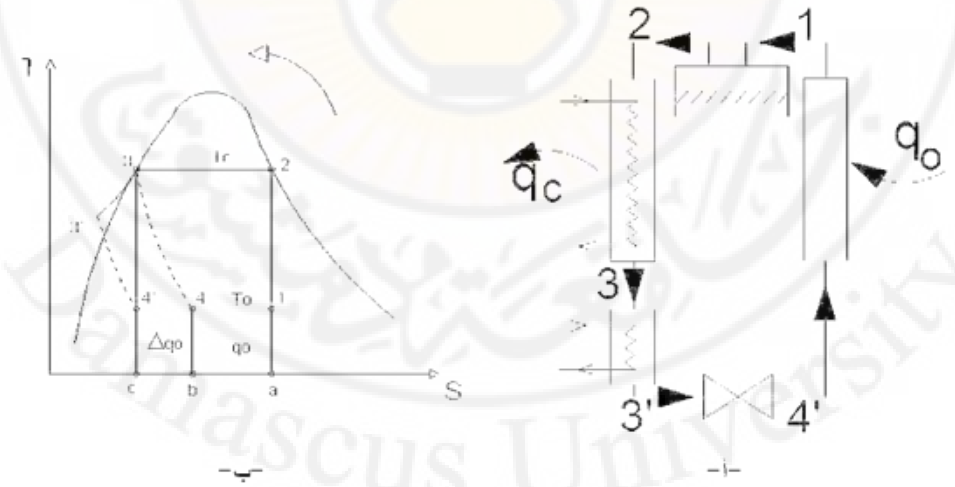
$$\varepsilon - \frac{q_{ev} - \Delta q_{ev}}{w_c + w_p} < \frac{q_{ev}}{w_c} - \varepsilon_c \qquad (16\text{-}13)$$

كما وجدنا سابقاً فإن معامل التبريد لدورة كارنو العكسية يتعلق فقط بدرجتي حرارة الغليان والتكاثف بينما معامل التبريد للدورة بوجود خنق يتعلق أيضاً بخواص جسم التشغيل.

5-2-13: تبريد سائل وسيط التبريد قبل صمام التمدد

من أجل تخفيض الضياعات اللاعكوسة بسبب الخنق يستخدمون مبردا لسائل وسيط التبريد قبل صمام التمدد وبعد المكثف. إن تخفيض درجة حرارة سائل وسيط التبريد إلى درجة حرارة أخفض من درجة حرارة التكاثف t_c يمكن أن تتم ضمن المكثف نفسه أو في مبادل حراري مستقل (عكس التيار)، الشكل (13-17-أ)، (في حال استخدام وسائط تبريد من الفريونات يمكن عندها تبريد سائل وسيط الفريون عن طريق أبخرة الفريون الباردة الخارجة من المبخر وعندها نطلق عليه تسمية مبادل حراري استرجاعي كما سنرى ذلك في الفقرة: 13-2-7). يجب أن نشير إلى أن تبريد سائل وسيط التبريد قبل صمام الخنق يؤدي دوما إلى تخفيض الضياعات الناتجة عن الخنق . يبين الشكل (13-17-ب) عملية زيادة تبريد لسائل وسيط التبريد على مخطط (T,s) (العملية الإيزوبارية 3←3') نتيجة عملية زيادة التبريد ينخفض إنتالبي سائل وسيط التبريد قبل صمام الخنق وينخفض من جراء ذلك التحول الطوري الغير مفيد في عملية الخنق وتزداد الإنتاجية التبريدية بمقدار المساحة (4'-4-b-c-4) حيث:

$$\Delta q_o = i_3 - i_{3'} = i_4 - i_{4'} = \text{المساحة } (4'\text{-}4\text{-}b\text{-}c\text{-}4)$$



الشكل (13-17): زيادة تبريد سائل وسيط التبريد بعد المكثف باستخدام مبادل حراري مستقل

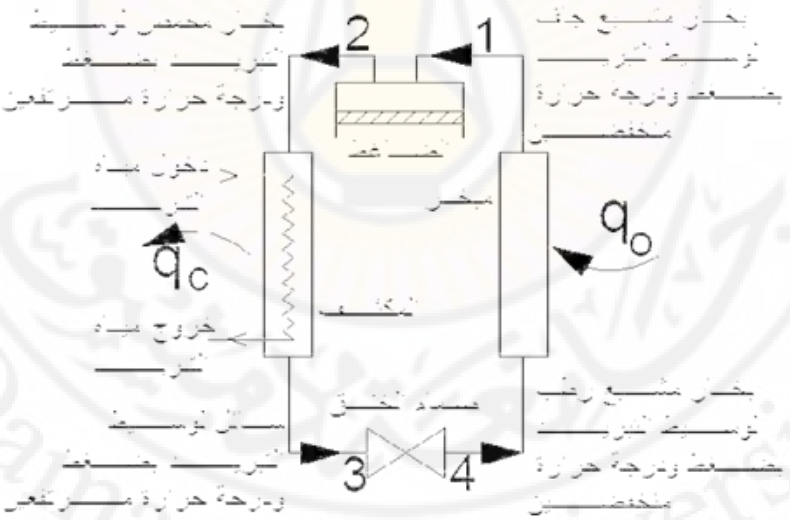
معامل التبريد للدورة مع زيادة تبريد للسائل قبل دخوله صمام الخنق $\varepsilon_{,,}$ سيزداد مقارنة مع عناصر الدورة نفسها ولكن من دون وجود للمبادل الحراري بعد المكثف:

$$\varepsilon = \frac{q_{,,} + \Delta q_{,,}}{w_{,}} > \frac{q_{,,}}{w_{,}} = \varepsilon \qquad (17\text{-}13)$$

وذلك لأن عملية زيادة تبريد سائل وسيط التبريد قبل صمام الخنق أدت فقط إلى زيادة الإنتاجية التبريدية $q'_{,,} = q_{,,} + \Delta q_{,,}$ بينما بقي العمل المصروف في الضاغط نفسه لكلا الدورتين $w_{,}$ مع زيادة تبريد للسائل أو بدون زيادة.

6-2-13: الدورة الفعلية لآلة التبريد البخارية مع سحب بخار مشبع جاف:

في الشكل (13-18) يظهر مخطط توضيحي لهذه الآلة مع تمثيلها على مخططي (T,s) و $(i,\log p)$، انظر الشكل (13-19)، يتلخص مبدأ عمل دورة هذه الآلة على النحو التالي:



الشكل (13-18): المخطط التوضيحي لآلة التبريد البخارية مع سحب بخار مشبع جاف

يمتص الضاغط بخار وسيط التبريد (المشبع الجاف) عند درجة حرارة منخفضة أقل من درجة حرارة الغرفة المبردة ويضغطه أديباتياً حتى الضغط الموافق لدرجة حرارة

الإشباع التي تزيد قليلا على درجة حرارة مياه التبريد، في مخطط (T,s) هذا الانضغاط يوافق الأدبيات (1←2).



الشكل (13-19): تمثيل دورة عمل الة التبريد البخارية مع سحب بخار مشبع جاف على مخطط (T,s) و $(i,\log p)$

من الضاغط يذهب البخار المحمص لوسيط التبريد إلى المكثف حيث يفقد تحميصه ويتكاثف عند ضغط ثابت p_c (2←3) معطيا بذلك لمياه التبريد (أو للهواء الجوي) حرارة تحميصه والحرارة الكامنة لتشكيل البخار . خلافا للآلة النظرية لا يذهب سائل وسيط التبريد إلى الممدد التوربيني بل إلى صمام التمدد مما يؤدي إلى انخفاض في قيمة ضغطه ودرجة حرارته في حين يكون الإنتالبي في نهاية عملية الخنق (بعد صمام التمدد) مساويا لقيمة الإنتالبي قبل الصمام (النقطتان (3) و(4) تقعان على نفس خط $i = const.$).

بعد الخروج من صمام التمدد يدخل البخار المشبع الرطب لوسيط التبريد ببارامترات النقطة (4) إلى المبخر ويكتسب فيه كمية الحرارة q_o من الوسط المراد تبريده فيجف البخار الرطب (النقطة 1) إيزوباريا عند الضغط p_o (1←4).

معامل التبريد لهذه الدورة:

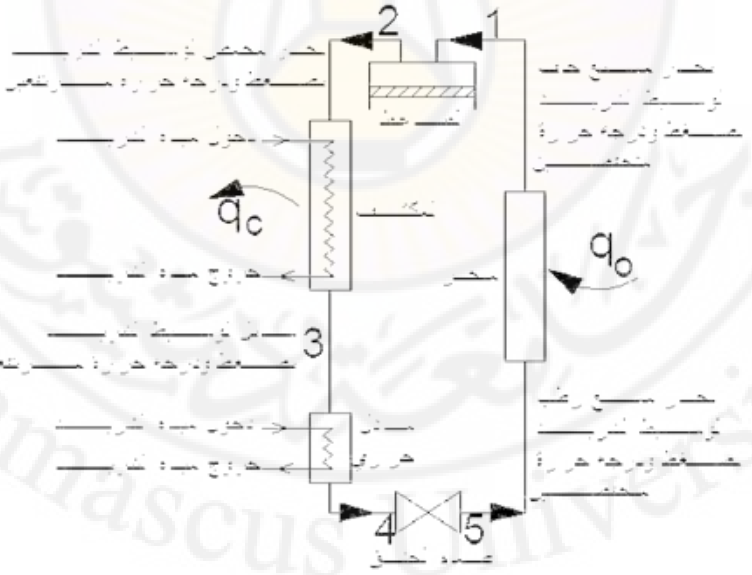
$$\varepsilon = \frac{q_o}{|w|} = \frac{q_o}{|q_c| - q_o}$$

$$\varepsilon = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1} \qquad (18\text{-}13)$$

كما نلاحظ من مخطط $(i, \log p)$ أن كمية الحرارة التي يكتسبها وسيط التبريد خلال الدورة (الإنتاجية التبريدية للآلة) بيانيا تساوي إلى طول القطعة المستقيمة (1-4). كمية الحرارة التي يطرحها وسيط التبريد في المكثف بيانيا تساوي إلى طول القطعة المستقيمة (2-3) وبالتالي الفرق في طول القطعتين السابقتين يمثل العمل اللازم صرفه لتحقيق عمل الدورة.

يمكن أن نزيد معامل التبريد للدورة السابقة إذا أجرينا بعض التعديلات:

١- عن طريق زيادة تبريد سائل وسيط التبريد الخارج من المكثف وقبل الدخول لصمام التمدد وذلك بزيادة سطح التبادل الحراري للمكثف نفسه أو عن طريق استخدام مبادل حراري إضافي موجود بعد المكثف كما هو مبين بالشكل (20-13)، أما التمثيل على مخططي (T, s) و $(i, \log p)$، فمبينان بالشكل (21-13).



الشكل (13-20): زيادة تبريد سائل وسيط التبريد الخارج من المكثف وذلك عن طريق استخدام مبادل حراري اضافي

وكما نلاحظ من الشكل فإن الإنتاجية التبريدية للمبخر في هذه الحالة قد ازدادت بمقدار المساحة المهشرة Δq_{o} بينما عمل الضاغط بقي كما هو ومعامل التبريد لهذه الحالة (انظر الفقرة 13-2-5):

$$\varepsilon = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1} \qquad (18\text{-}13)$$



الشكل (13-21): تمثيل زيادة تبريد سائل وسيط التبريد على مخطط (T,s) و $(i,\log p)$

٢- عن طريق تحميص البخار الداخل إلى الضاغط وذلك بزيادة سطح التبادل الحراري للمبخر ذاته أو باستخدام مسخنات إضافية على الأنابيب الواصلة بين المبخر والضاغط أو إضافة فاصل سائل بعد المبخر وقبل الدخول إلى الضاغط بتخفيض سرعة البخار المشبع الرطب لوسيط التبريد الأمر الذي يؤدي إلى تساقط قطرات سائل وسيط التبريد إلى أسفل الفاصل ويعاد بعدها إلى المبخر ويتابع البخار المشبع الجاف طريقه إلى الضاغط. إن الانتقال بشروط السحب من النقطة (1) إلى (1') يؤدي إلى زيادة التأثير التبريدي بمقدار Δq_{o} والممثلة بالمساحة (a-b-1'-1-a) على مخطط (T,s) من جهة كما أنه يؤدي إلى زيادة عمل الضاغط بمقدار Δw وتمثلها المساحة (-1'-1-2'-2) من جهة أخرى، يبين الشكل (13-22) تمثيل عمل الدورة على مخطط (T,s) و $(i,\log p)$.



الشكل (13-22): تمثيل زيادة تحميص البخار الخارج من المبخر على مخطط (T,s) و $(i,\log p)$

أثبتت التجارب أن زيادة التحميص تعمل على زيادة العمل المصروف في الضاغط ولكن العملية هذه مفيدة للتخلص من أية قطرات مائع لوسيط التبريد قبل دخوله الضاغط واحداث الصدمة الهيدروليكية.

ملاحظة:

عند شروط العمل الحقيقية لآلة التبريد البخارية ومن أجل ضمان الاستثمار الأمثل لعمل الضاغط والعمل الطبيعي لأنظمة التحكم والشروط المثلى للحصول على التبريد الاصطناعي فإنهم يجعلون الضاغط يقوم بسحب بخار محمص لوسيط التبريد وليس بخاراً مشبعاً جافاً (كما هو الحال في الدورة النظرية لآلة التبريد البخارية مع سحب بخار مشبع جاف) يتراوح مقدار التحميص:

للأمونيا R717: $\Delta T = 5 - 10\,K$

للفريون R22: $\Delta T = 20 \quad 30\,K$

مثال 13-4:

لدينا آلة تبريد ضاغطة بخارية بمرحلة واحدة مع سحب بخار مشبع جاف تعمل على R22، الإنتاجية التبريدية لهذه الآلة $Q = 20{,}000\,kcal/h$ مبينة بالشكل (13-19).

إذا كانت درجة غليان وسيط التبريد $t_o = -15°C$ ودرجة حرارة التكاثف $t_c = 30°C$ ودرجة حرارة وسيط التبريد قبل صمام التمدد $t - 25°C$ لأنه توجد زيادة تبريد قدرها $5°C$ تتم داخل المكثف احسب:

أ- الإنتاجية التبريدية النوعية لكل $1kg$ من وسيط التبريد.

ب- كمية الحرارة المطروحة في المكثف لكل $1kg$ من وسيط التبريد.

ت- الاستطاعة النظرية اللازمة لضغط $1kg$ من وسيط التبريد.

ث- معامل التبريد النظري.

ج- تدفق وسيط التبريد الدائر في الة التبريد.

ح- الاستطاعة النظرية المستهلكة في الضاغط.

خ- الحمل الحراري للمكثف.

مثل عمل هذه الآلة على مخطط $(i, \log p)$.

الحل:

نقوم أولاً بتحديد إنتالبي النقاط (1)، (2)، (3)، (4)، (5) بالاستعانة بمخطط $(i, \log p)$ للوسيط R22 المبين بالشكل (13-10) ونملأ قيم الإنتالبي وفق الجدول التالي:

الحالة	1	2	3	4	5
$i[kJ/kg]$	400	437.5	240	232.5	232.5

التمثيل مبين بالشكل (13-23).

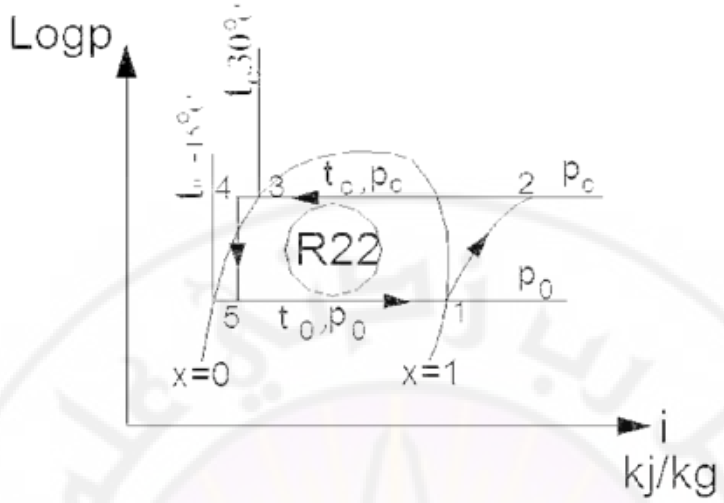
$$q_o = i_1 - i_5 = 400 - 232.5 = 167.5 kJ/kg$$

بما أن زيادة التبريد تتم ضمن المكثف نفسه فتكون كمية الحرارة المطروحة:

$$q_c = |i_4 \quad i_2| = |232.5 \quad 437.5| = 205 kJ/kg$$

$$w_c = i_2 - i_1 = 437.5 - 400 = 37.5 kJ/kg$$

$$\varepsilon = \frac{q_o}{q_c - q_o} = \frac{167.5}{205 - 167.5} = 4.667$$



الشكل (13-23): تابع للمثال (13-4)

$$in = \frac{Q_o}{q_o} = \frac{20{,}000 \times 4.1868}{167.5} = 499.92\,kg/h = 0.139\,kg/s$$

$$N = in\,w_c = 0.139 \times 37.5 = 5.21\,kW$$

$$Q_c = in\,q_c = 0.139 \times 205 = 28.495\,kW$$

مثال 13-5

لدينا آلة تبريد ضاغطة بخارية بمرحلة واحدة مع سحب بخار مشبع جاف تعمل على R12، الإنتاجية التبريدية لهذه الآلة الإنتاجية التبريدية لهذه الآلة $Q = 20{,}000\,kcal/h$ مبينة بالشكل (13-19). إذا كانت درجة غليان وسيط التبريد $t_o = -15°C$ ودرجة حرارة التكاثف $t_c = 30°C$ ودرجة حرارة وسيط التبريد قبل صمام التمدد $t = 25°C$ لأنه توجد زيادة تبريد قدرها $5°C$ تتم داخل مبادل حراري يقع بعد المكثف، انظر الشكل (13-20)، والمطلوب:

أ- نمثل عمل هذه الآلة على مخطط (T,s) و $(i,\log p)$،

ب- الإنتاجية التبريدية النوعية لكل $1kg$ من وسيط التبريد،

ت- كمية الحرارة المطروحة في المكثف لـ $1kg$ من وسيط التبريد،

ث- كمية الحرارة المطروحة في المبادل الحراري بعد المكثف لـ $1kg$ من وسيط التبريد،

ج- الاستطاعة النظرية اللازمة لضغط $1kg$ من وسيط التبريد.

ح- معامل التبريد النظري.

خ- تدفق وسيط التبريد المار في الدارة.

د- الاستطاعة النظرية المستهلكة في الضاغط.

ذ- الحمل الحراري الكلي للمكثف.

ر - احسب تدفق مياه التبريد اللازمة لتكثيف بخار وسيط التبريد في المكثف المائي إذا علمت أن مقدار ازدياد درجة حرارة الماء ضمن المكثف $\Delta t_w = 18°C$.

الحل:

التمثيل على مخطط (T,s) و $(i,\log p)$ مبين في الشكل (13-21).

نقوم بعد ذلك بتحديد قيم البارامترات المختلفة t,s,i,p في النقاط المميزة لآلة التبريد ونرتب النتائج في الجدول التالي:

النقطة	$t[°C]$	$p[bar]$	$i[kJ/kg]$	$s[kJ/kgK]$
1	-15	1.8259	281.56	2.3527
2		7.4806	307.2	2.3527
3	30	7.4806	163.61	1.8815
4	25	7.4806	158.64	1.8651
5	-15	1.8259	158.64	

نقوم الآن بحساب كميات الحرارة المكتسبة (في المبخر) والمطروحة (في المكثف والمبادل الحراري):

$$q_o = i_1 - i_5 = 281.56 - 158.64 = 123.92\,kJ/kg$$
$$|q_c| = i_2 - i_3 = 307.2 - 163.61 = 143.59\,kJ/kg$$
$$|q_{3,4}| = i_3 - i_4 = 163.61 - 158.64 = 4.97\,kJ/kg$$

الاستطاعة النظرية اللازمة لضغط $1kg$ من وسيط التبريد:

$$w_c = i_2 - i_1 = 307.2 - 281.56 = 25.64\,kJ/kg$$

معامل التبريد:

$$\varepsilon = \frac{q_o}{w} = \frac{122.92}{25.64} = 4.79$$

تدفق وسيط التبريد ضمن الدارة:

$$\dot{m} = \frac{Q_o}{q_o} = \frac{20{,}000 \times 4.1868}{122.92} = 681.2\,kg/h = 0.189\,kg/s$$

الاستطاعة النظرية المستهلكة في الضاغط:

$$N = \dot{m} w_c = 0.189 \times 25.64 = 4.85\,kW$$

الحمل الحراري المطبق على المكثف (المطروح من وسيط التبريد ضمن المكثف إلى مياه التبريد):

$$Q_c = \dot{m} q_c = 0.189 \times 148.56 = 28.1\,kW$$

لحساب تدفق مياه التبريد اللازمة لتبريد وتكاثف أبخرة وسيط التبريد القادمة من الضاغط إلى المكثف نكتب معادلة الموازنة الحرارية للمكثف:

كمية الحرارة التي تكتسبها مياه التبريد =| كمية الحرارة التي يفقدها وسيط التبريد ضمن المكثف|:

$$|Q_c| = |\dot{m}_w q_c| = \dot{m}_w c_{p_w} \Delta t_w$$

$\dot{m}_w$ تدفق مياه التبريد،

$\dot{m}_r$ تدفق وسيط التبريد.

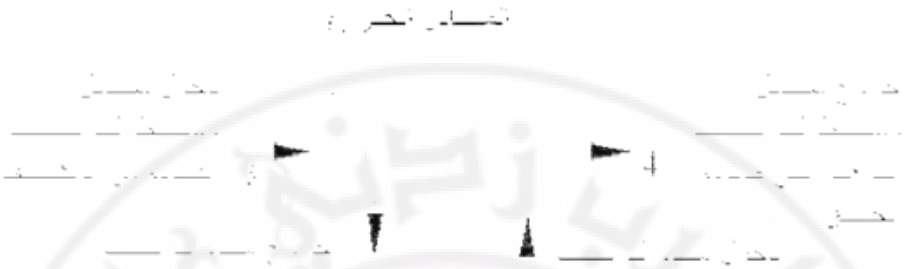
$$\dot{m}_w = \frac{Q_c}{c_{p_w} \Delta t_w} = \frac{28.1}{4.18 \times 18} = 0.37\,kg/s$$

يبين الشكل (13-24) رسماً توضيحياً للمبادل الحراري المتوضع خلف المكثف.

مثال 13-6:

لدينا آلة تبريد مؤلفة من مرحلة انضغاط واحدة تعمل على الأمونيا، الإنتاجية التبريدية لهذه الآلة $Q_o = 4{,}000\,W$ وتعمل ضمن شروط العمل التالية: درجة حرارة الغليان $t_o = -20°C$، درجة حرارة التكاثف $t_c = 30°C$، درجة حرارة سائل وسيط التبريد

قبل صمام التمدد مباشرة $t = 20°C$، درجة حرارة بخار سحب الضاغط $t = -5°C$ والمطلوب حساب:



الشكل (13-24): المبادل الحراري

أ- كمية وسيط التبريد الدوارة ضمن المرحلة،

ب- التدفق الحجمي للبخار الداخل إلى الضاغط في المرحلة الثانية،

ت- حجم الفراغ العامل لاسطوانة الضاغط إذا كان معامل تغذية الضاغط $\lambda = 0.66$،

ث- الاستطاعة النظرية للضاغط

ج- الاستطاعة البيانية للضاغط إذا كان مردود الضاغط البياني $\eta_i = 0.72$،

ح- الاستطاعة الفرملية للضاغط إذا كان المردود الميكانيكي له $\eta_m = 0.8$،

خ- استطاعة المحرك الكهربائي اللازم على فرض أن مردود النقل $\eta_t = 1$ ومردود المحرك الكهربائي $\eta_{el} = 0.9$،

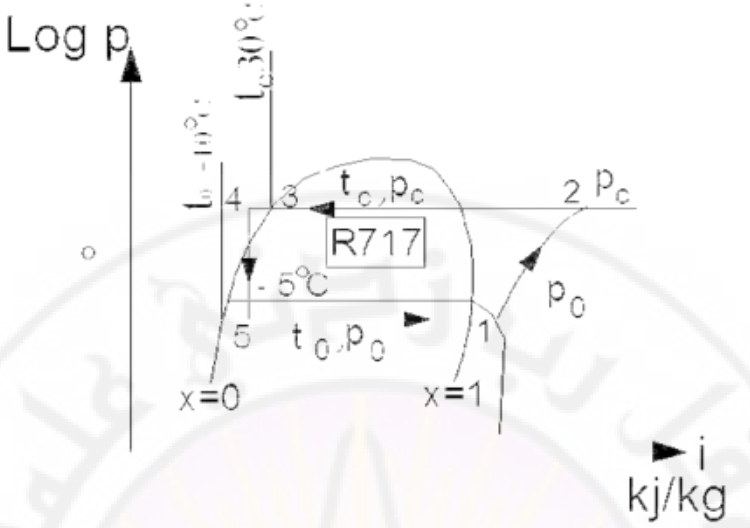
د- الحرارة المطروحة في المكثف،

ذ- المعامل التبريدي النظري،

ر- المعامل التبريدي الكهربائي.

الحل:

نقوم أولا بتحديد إنتالبي النقاط (1-2-3-4-5) بالاستعانة بمخطط $(i, \log p)$ للأمونيا الموجود في الملحق -4-. تمثيل هذه الدورة على مخطط $(i, \log p)$ مبين بالشكل (13-25)، بينما قيم الإنتالبي في النقاط المميزة للدورة فمدرجة في الجدول التالي:



الشكل (13-25): تابع للمثال (13-6)

النقطة	1	2	3	4	5
$i\,[kJ/kg]$	1,775	2,045	645	590	590

$$\dot{m} = \frac{Q_o}{q_o} = \frac{4}{1,775 - 590} = 3.38 \times 10^{-3}\ kg/s$$

من المخطط نجد: $v_1 = 0.7\ m^3/kg$

$$\dot{V} = \dot{m} v_1 = 2.363 \times 10^{-3}\ m^3/s$$

$$V_{stak} = \frac{\dot{V}}{\lambda} = 3.85 \times 10^{-3}\ m^3/s$$

$$N_c = \dot{m}(i_2 - i_1) = 0,9126\ kW$$

$$N_i = \frac{N_c}{\eta_i} = 1,2675\ kW$$

$$N_b = \frac{N_i}{\eta_m} = 1,5844\ kW$$

$$N_E = \frac{N_b}{\eta_t \eta_E} = 1.7604\,kW$$

$$Q_c = \dot{m} q_c = \dot{m} |i_2 - i_4| = 4.918\,kW$$

$$\varepsilon = \frac{q_o}{q_c - q_o} = 4.4$$

$$\varepsilon_c = \frac{Q_o}{N_E} = 2.2722$$

13-2-7: آلة تبريد بخارية مع مبادل حراري استرجاعي

كما ورد سابقاً فإن تبريد سائل وسيط التبريد الخارج من المكثف لا يتم فقط عن طريق مصدر خارجي (مياه تبريد أو هواء) بل ويمكن أن يتحقق بواسطة أبخرة وسيط التبريد المارة في الدارة نفسها والخارجة من المبخر . مثل هذه العملية يمكن تحقيقها ضمن مبادل حراري خاص يدخل إليه سائل وسيط التبريد القادم من المكثف وكذلك تدخل إليه أبخرة وسيط التبريد القادمة من المبخر ونتيجة التبادل الحراري بين هذين الوسطين فإن السائل الخارج من المبادل الحراري الاسترجاعي يبرد أما بخار وسيط التبريد الخارج فيتحمص. يظهر على الشكل (13-26) المخطط التوضيحي لآلة تبريد بخارية مع مبادل حراري استرجاعي وكذلك مبين مخطط عمل هذه الآلة على مخطط (T,s).



الشكل (13-26): الشكل التوضيحي لآلة تبريد بخارية مع مبادل حراري استرجاعي وتمثيلها على مخطط (T,s)

يؤدي التبادل الحراري الداخلي في مثل هذه الدورة من جهة إلى تخفيض درجة حرارة سائل وسيط التبريد الداخل إلى صمام التمدد (النقطة 3' بدلاً من 3) وبالتالي يؤدي ذلك إلى تخفيض ضياعات الخنق وزيادة في الإنتاجية التبريدية إلى قيمة المساحة (4'-4-b-c-4') $-\Delta q_o$ ومن جهة أخرى إلى تحميص البخار قبل الدخول للضاغط (النقطة

ابدلا من "1"، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة عمل الدورة بمقدار المساحة ("1-1-2-2"-"1") $-\Delta w$ وكذلك تزداد درجة حرارة الغاز في نهاية عملية الانضغاط $T_2 > T_{2'}$. لا ينصح باستخدام مثل هذه المبادلات الحرارية من أجل جميع وسائط التبريد فعلى سبيل المثال لا ينصح استخدامها مع الأمونيا (يجب أن لا تزيد درجة حرارة أبخرة الأمونيا المحمصة عن $5-10°C$ بينما يمكن تحميص أبخرة الفريون R22 و R12 إلى قيم أعلى تصل إلى $20-30°C$ الأمر الذي يسمح لنا استخدام المبادلات الحرارية الاسترجاعية مع هذه الوسائط وبالتالي تزداد الإنتاجية التبريدية لمثل هذه الدورات). تتحدد فعالية آلة التبريد مع مبادل حراري إسترجاعي كما ورد آنفا وذلك عن طريق تحديد معامل التبريد لذلك نقوم بتحديد الإنتاجية التبريدية النوعية:

(أ) $$q'_o = q_o + \Delta q_o = i_{1'} - i_4$$

كما نلاحظ فإن زيادة التحميص الحاصلة ضمن المبادل الحراري الاسترجاعي لم نستفد منها في الأثر التبريدي (أي لم يتم تحميصها من جراء الحرارة التي أخذتها من المواد الموجودة ضمن الحيز المراد تبريده، بل من جراء التبادل الحراري الذي حصل خارج المبخر في المبادل الحراري الاسترجاعي)، لذلك اقتصرت الزيادة في الإنتاجية التبريدية فقط على الزيادة الحاصلة عن زيادة تبريد سائل وسيط التبريد قبل الدخول إلى صمام الخنق، فبدلا من الدخول إلى المبخر ببارامترات النقطة (4)، يدخل سائل وسيط التبريد ببارامترات النقطة (4') وبالتالي فإن:

$$q'_o = q_o + \Delta q_o = (i_{1'} \quad i_4) + (i_4 \quad i_{4'})$$

كما هو معلوم من معادلة الموازنة الحرارية للمبادل الحراري الاسترجاعي:

كمية الحرارة التي يكتسبها بخار وسيط التبريد = | كمية الحرارة التي يفقدها سائل وسيط التبريد|:

$$|i_{3'} - i_3| = i_1 - i_{1'}$$

بالاستفادة من العلاقة الأخيرة يمكن كتابة العلاقة (أ) بشكلها النهائي:

$$q'_o = (i_{1'} - i_4) + (i_3 - i_{3'}) \Rightarrow$$
$$q'_o = (i_{1'} \quad i_4) + (i_1 \quad i_{1'}) = i_1 \quad i_4$$

عمل الدارة:

$$|w| = |q_c| - q''_o = (i_2 - i_3) - (i_1 - i_4) = i_2 - i_1$$

وبالتالي معامل التبريد:

$$\varepsilon = \frac{q''_o}{|w|} = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1} \qquad (19\text{-}13)$$

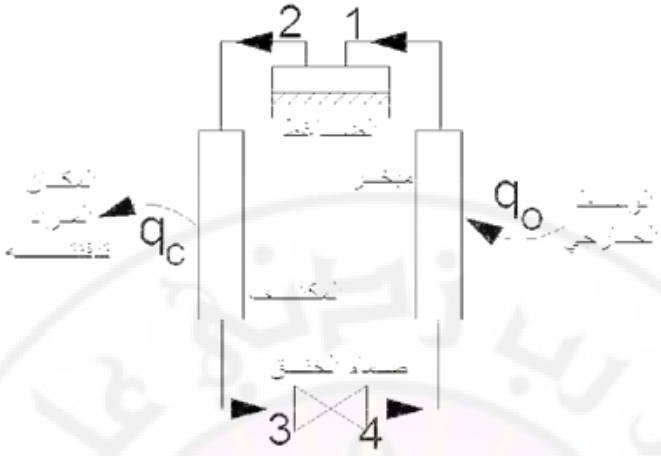
إن معامل التبريد للدارة بوجود مبادل حراري استرجاعي قد يكون أكبر أو أصغر أو مساويا لمعامل التبريد بدون وجود مبادل حراري ضمن آلة التبريد (فعالية هذه الطريقة تتعلق بالنسبة $\frac{\Delta q_o}{\Delta w_c}$ أي بالخواص الترموديناميكية لوسيط التبريد المستخدم)

13-3: المضخة الحرارية

نتيجة عمل آلة التبريد البخارية فإن الحرارة تنتقل إلى المنبع الساخن (الوسط الخارجي) عاملة على رفع درجة حرارته من هنا نشأت فكرة أنه يمكن استعمال دورة آلة التبريد البخارية بهدف التدفئة والتي ندعوها حينئذ بالمضخة الحرارية.

تعمل المضخة الحرارية على سحب الحرارة ليس من الفراغ المراد تبريده بل من الوسط المحيط وذلك عن طريق صرف طاقة في الدورة العكسية الأمر الذي يؤدي إلى رفع درجة حرارة الناقل الحراري (وسيط التبريد). يبين الشكل (13-27) نظام التدفئة باستخدام آلة التبريد حيث يقوم بخار وسيط التبريد القادم من صمام التمدد ببارامترات النقطة (4) بامتصاص الحرارة من الفراغ الموجود فيه مبخر آلة التبريد (الوسط الخارجي البارد) بعدها يخرج من المبخر ببارامترات النقطة (1) ليدخل إلى الضاغط الذي يقوم برفع ضغطه ودرجة حرارته حتى الحالة (2) ليدخل الوسيط بعدها إلى المكثف فيقوم بطرح الحرارة التي اكتسبها (بعد إضافة عمل الضاغط) إلى الفراغ المراد تدفئته (جو الغرفة على سبيل المثال). لتحديد مدى اقتصادية المضخات الحرارية تم إدخال مفهوم معامل التدفئة والذي يرمز له بـ β:

$$\beta = \frac{q_2}{w_c} = \frac{q_1 + w_c}{w_c} = \frac{q_1}{w_c} + 1 \qquad (20\text{-}13)$$



الشكل (13-27): الشكل التوضيحي للمضخة الحرارية

وكما هو معلوم $\varepsilon = \frac{q_1}{w_c}$ إذا: $\beta = 1 + \varepsilon$

نلاحظ من العلاقة الأخيرة أن معامل التدفئة دوما أكبر من الواحد لأن $\varepsilon > 1$.

تتراوح قيمة معامل التدفئة في المضخات الحرارية الحقيقية 5 – 3.

13-4: آلات التبريد القاذفة للبخار

13-4-1: مبدأ العمل، إجراء العمل النظري والمعامل الحراري

تنسب آلات التبريد القاذفة للبخار إلى مجموعة آلات التبريد التي تستخدم الطاقة الحرارية ولا ينفق فيها طاقة ميكانيكية إلا أنه من أجل تحقيق الدارة العكسية في الآلة القاذفة البخارية نفسها يتم تحويل الطاقة الحرارية إلى عمل ميكانيكي وبهذا الشكل تتضمن الآلة القاذفة البخارية مجموعة متسلسلة من الإجراءات المباشرة والمعكوسة.

غالبا ما يكون الجسم العامل في الآلة القاذفة البخارية الماء إلا أنه في بعض الأحيان عندما يراد الحصول على درجات حرارة منخفضة فتستعمل فريونات مختلفة كوسائط تبريد. يحبذ استعمال الماء كجسم عامل في الدارات العكسية بسبب رخصه وعدم ضرره، إلا أن استعمال الماء يحدد متطلبات خاصة بالنسبة للآلة تتعلق بالخواص الترموديناميكية له.

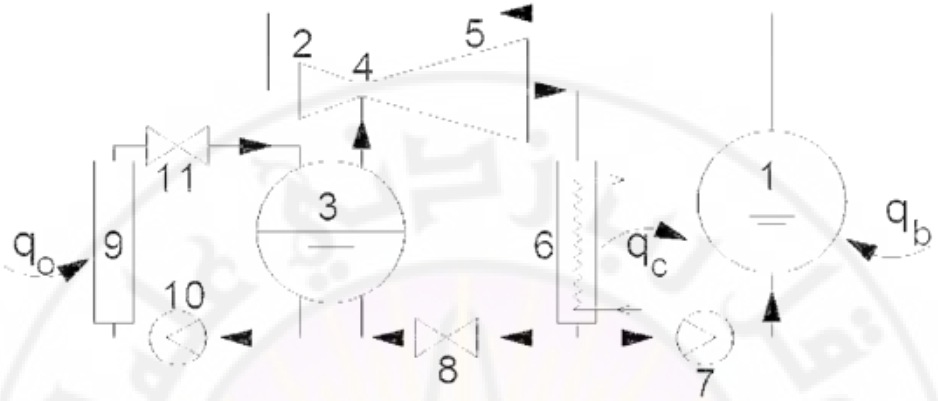
يتطلب الحصول على درجات حرارة أخفض من الصفر المئوي (أو قريبة منه) وجود تخلخل أو ضغط سالب في المبخر وعلى سبيل المثال يغلى الماء عند درجة حرارة صفر مئوية عند قيمة ضغط تساوي $611\,Pa$ كما يغلى عند درجات حرارة $-10°C \rightarrow -20$ عند ضغوط تساوي $284 - 127.2\,Pa$. عند قيم الضغوط هذه يأخذ الحجم النوعي لبخار الماء المشبع القيم $955 - 211.451\,m^3/kg$ على التوالي ومنه نرى أن حجم البخار الواجب مروره عبر المبخر كبير جدا. نتيجة لكبر حجوم البخار يستحيل عمليا استعمال الضواغط العادية المكبسية أو حتى الضواغط الطاردة المركزية. يتم دفع بخار الماء عبر المبخر باستخدام قاذف بخاري ذي مقاييس (أبعاد) صغيرة بسبب إمكان اعتماد سرعات عالية لبخار الماء.

يبين الشكل (13-28) مخططا مبدئيا لآلة التبريد القاذفة البخارية العاملة على الماء. يتجه البخار العامل من مولد البخار (1) إلى نفاثة القاذف (2) إذ تتحول ضمنها الطاقة الكامنة للبخار إلى طاقة حركية ذات سرعة عالية. تسبب هذه السرعة ضمن البوق توليد ضغط سالب (تخلخل) يؤدي إلى جذب الأبخرة الباردة القادمة من المبخر (3) حيث يتم اختلاط الأبخرة في الحجرة (4). يتجه خليط البخار (العامل والبارد) إلى الديفوزر (بوق ناشر) (5) حيث يرتفع فيه ضغط البخار على حساب انخفاض سرعته وبالتالي تتحقق عملية انضغاط البخار من ضغط التبخر p_o حتى قيمة الضغط في المكثف p. تتم عملية تكاثف البخار في المكثف (6) باستعمال الماء كسائل تبريد. تنقسم كمية الماء المتكاثفة في المكثف إلى جزأين يذهب الجزء الأول بوساطة مضخة (7) إلى مولد البخار (1) أما الجزء الآخر فيوجه إلى المبخر مرورا بصمام الخنق (8).

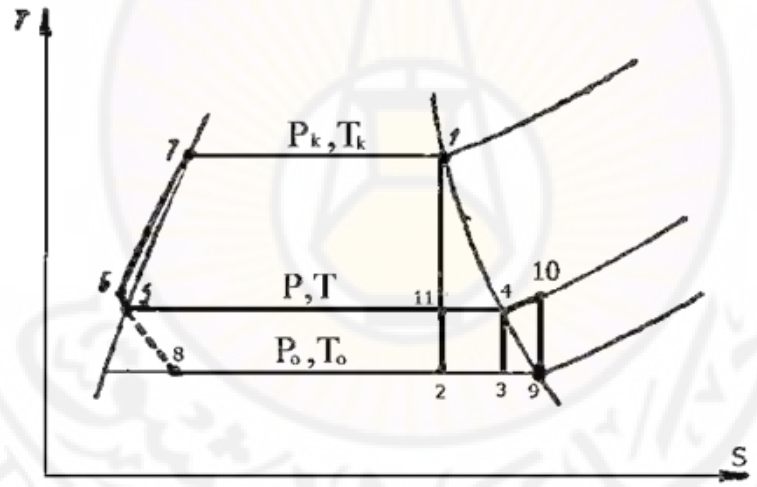
تتم عملية تبريد كتلة الماء الموجودة ضمن المبخر على حساب تشكل البخار إذ إن عملية تشكل البخار وكما هو معروف تتطلب نزع حرارة من الوسط المحيط (الماء في حالتنا) تعادل في قيمتها الحرارة الكامنة لتشكل البخار r عند قيمة الضغط p_o.

تسمى كمية الماء الموجودة ضمن المبخر والجاهزة للاستعمال لأغراض التبريد الماء العامل، يتم سحب الماء العامل من المبخر عبر مبادل حراري (9) (مستهلك البرودة) بوساطة مضخة (10) ومن ثم يعود الماء إلى المبخر ثانية عبر صمام الخنق (11).

يبين الشكل (13-29) الدورة النظرية لآلة التبريد القاذفة البخارية على مخطط (T,s).



الشكل (13-28): مخطط آلة التبريد القاذفة البخارية



الشكل (13-29): تمثيل دورة عمل آلة تبريد قاذفة بخارية على (T,s)

تمثيل الدورة النظرية لآلة التبريد القاذفة البخارية على مخطط (T,s):

يتمدد البخار العامل ذو الضغط p_k في النفاثة حتى الضغط p_o أديباتياً (الإجراء 1←2) يمتزج البخار المتمدد (النقطة 2) مع البخار القادم من المبخر (النقطة 9) حيث يتشكل لدينا مزيج بخاري رطب (النقطة 3). ينضغط المزيج في الديفوزر أديباتياً حتى الضغط p (الإجراء 3←4) ومن ثم يتكاثف جزء من البخار في المكثف (الإجراء

4←5). يطابق الإجراء الأدبياتي 5←6 عمل المضخة التي تقوم بضخ الماء المتكاثف إلى مولد البخار. يتم خنق الجزء الآخر من البخار (الإجراء 5←8) قبل دخوله إلى المبخر إلى الضغط p_o.

يمثل الإجراء 6←7 و 7←1 كلا من عمليتي تسخين الماء ومن ثم التبخر ضمن مولد البخار. مما سبق يمكننا أن نميز في آلة التبريد القاذفة البخارية دارتين: الدارة المباشرة وتتمثل بالنقاط (1-11-5-6-7-1) والدارة المعكوسة وتتمثل بالنقاط (8-5-10-9-8).

إذا افترضنا أنه يمر خلال المبخر $1kg$ من الجسم العامل فيلزم مرور $\alpha\, kg$ عبر مولد البخار إذ:

$$\alpha = \frac{G_{ws}}{G_{cs}} \qquad (21\text{-}13)$$

إذ G_{ws} كمية البخار العامل،

G_{cs} كمية البخار البارد.

يسمى المقدار α معامل الاستهلاك النوعي للبخار.

يمكننا أن نكتب بالنسبة للدورة النظرية ما يلي:

$$\alpha_t \left|w\right| = \left|w_o\right|$$

إذ w و w_o هما عمل الدورة النظرية المباشرة والعكسية:

$$\alpha = \frac{\left|w_o\right|}{\left|w\right|} = \frac{i_{10} - i_9}{(i_1 - i_{11}) - (i_6 - i_5)} \qquad (22\text{-}13)$$

يمكن وضع معادلة الميزان الحراري بالشكل:

$$(1+\alpha_t)q = q_o + \alpha_t\, q_h + \alpha_t\, q_p \qquad (23\text{-}13)$$

إذ $(1+\alpha_t)q = (1+\alpha_t)(i_4 - i_5)$ الحرارة المطروحة في المكثف،

$q_o = i_9 - i_8$ إنتاجية التبريد النوعية.

$\alpha_t\, q_p - \alpha_t\,(i_6 - i_5)$ المكافئ الحراري لعمل المضخة.

$\alpha_t\, q_h = \alpha_t\,(i_1 - i_6)$ الحرارة المقدمة في المولد.

يتحدد معامل التبريد للدورة العكسية بالعلاقة:

$$\varepsilon_r = \frac{q_o}{w_o} = \frac{i_6 - i_8}{i_{10} - i_6} = \frac{i_6 - i_8}{\alpha_r\left[(i_1 - i_{11}) - (i_6 - i_5)\right]} \qquad (24\text{-}13)$$

يمكن تقييم فاعلية الدورة المباشرة بالمعامل الحراري:

$$\eta_r = \frac{w}{q_o} = \frac{(i_1 - i_{11}) - (i_6 - i_5)}{i_1 - i_6} \qquad (25\text{-}13)$$

13-4-2: خواص عمل آلات التبريد القاذفة البخارية عند عملها على أجسام تشغيل مختلفة:

كما ذكرنا سابقا فإنه لا يمكننا استخدام الماء كجسم تشغيل في مثل هذه الآلات عندما نريد الحصول على درجات حرارة أخفض من الصفر لأن ذلك يتطلب كما وجدنا تخلخلاً أو ضغطاً سالباً في المبخر وبالتالي تزداد قيم الحجم النوعي ويتطلب ذلك حجوماً كبيرة لعناصر الآلة والتوصيلات، لهذا فإنه من المفيد في بعض الحالات استخدام أجسام تشغيل أخرى في آلات التبريد القاذفة البخارية مثل الأمونيا R717، الفريون R12، الفريون R11 وغيرها من المواد. عندها فإن المبخر يعمل كما لو كان يعمل في آلة تبريد ضاغطة بخارية أما الجسم الحامل للحرارة فيدور بين المبخر والمستهلك. إن أفضل استعمال لآلات التبريد القاذفة البخارية العاملة على R12 هو استخدامها في حقل تكييف الهواء إذ تكون درجة حرارة غليان وسيط التبريد R12 في مولد البخار غير مرتفعة نحو 70°C مما يمكن من استخدام مصادر تسخين ذات درجة حرارة أخفض مما هي عليه في حالة استخدام الماء، إن استعمال الفريونات المختلفة أو غاز النشادر يسمح بالحصول على درجات حرارة أخفض ضمن المبخر وعلى سبيل المثال يمكن الوصول إلى درجة حرارة قدرها 105°C في المبخر وذلك عند استعمال R22 دون الحاجة إلى استخدام طريقة تعدد المراحل.

13-5: آلات التبريد الامتصاصية

يكمن الفرق بين آلات التبريد الامتصاصية وآلات التبريد البخارية بأنه في آلات التبريد الامتصاصية يتم نقل الحرارة من الوسط المبرد ذي درجة الحرارة المنخفضة إلى

الوسط الخارجي ذي درجة الحرارة المرتفعة بصرف طاقة حرارية (كما هو الحال في آلة التبريد القاذفة للبخار)، بينما يتم في آلات التبريد الضاغطة البخارية بصرف طاقة ميكانيكية. بسبب اعتماد آلة التبريد الامتصاصية على الطاقة الحرارية انتشر استعمال هذا النوع من آلات التبريد في المنشآت الصناعية التي يوجد فيها فائض في الطاقة الحرارية. في الوقت الحاضر انتشر استعمال هذا النوع من آلات التبريد العاملة على الأمونيا مع الماء، والماء مع بروميد الليثيوم. إن استخدام دارة معينة لآلة التبريد الامتصاصية يتبع لنوعية المنبع الحراري بالإضافة إلى خواص المادة الماصة ووسيط التبريد المستخدمين.

13-5-1: مخطط ومبدأ عمل آلة التبريد الامتصاصية

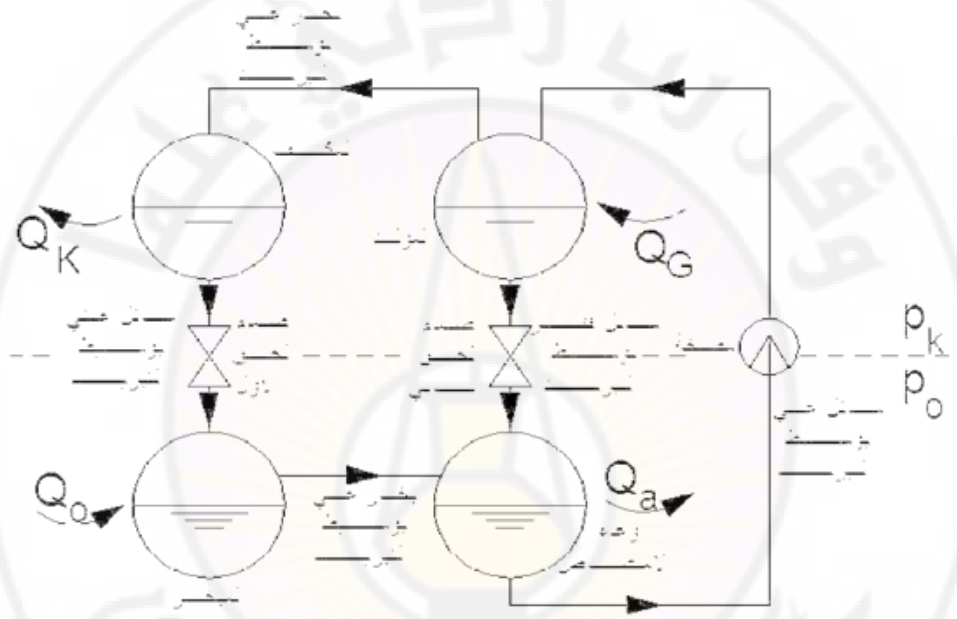
خلافا لآلات التبريد الضاغطة البخارية التي تنجز فقط دورة ترموديناميكية عكسية، فإنه في الآلات الامتصاصية كما هو الحال في الآلات القاذفة للبخار يتم الحصول على التبريد الاصطناعي بمساعدة الدورتين المباشرة والعكسية معا.

الإجراءات ودورات آلة التبريد الامتصاصية تتم بمساعدة محلول مؤلف كـ4من مركبين وأحيانا ثلاثة مركبات. إن الآلات الأكثر انتشارا هي الآلات التي تعمل على محلول ثنائي والذي يتألف من مادة ماصة ووسيط تبريد. وأكثر المحاليل انتشارا في الوقت الحاضر هي محلول الأمونيا مع الماء وكذلك محلول بروميد الليثيوم مع الماء. في الحالة الأولى تعدّ الأمونيا وسيط تبريد والماء مادة ماصة، أما في الحالة الثانية فيعدّ الماء وسيط تبريد وبروميد الليثيوم كمادة ماصة.

إذا كان محتوى وسيط التبريد في محلول الأمونيا مع الماء عاليا يسمى محلولا قويا (غنيا)، وإذا كان المحتوى قليلا يسمى محلولا ضعيفا. في محلول بروميد الليثيوم مع الماء فإن التركيز يدل على محتوى المحلول من بروميد الليثيوم (أي المادة الماصة).

أهم المتطلبات الأساسية التي يجب أن تتمتع بها المادة الماصة هي: أن ينحل فيها وسيط التبريد بشكل كامل وسريع، أن تكون درجة حرارة غليانها أكبر بكثير من درجة حرارة غليان وسيط التبريد. إن الانحلال المحدود لوسيط التبريد في المادة الماصة يؤدي إلى التقليل من إمكان الدورة الترموديناميكية المباشرة في الآلة، كما أن التقليل من فرق

درجتي حرارة الغليان الطبيعية للمادة الماصة ووسيط التبريد يجر وراءه ضرورة تعقيد مخطط الآلة ويؤدي إلى ضياعات إضافية لاعكوسة في الدورة الفعلية المباشرة. وبالتالي فكلما زاد الفرق بين درجتي حرارة الغليان المذكورتين كان تصميم آلة التبريد الامتصاصية أبسط. المخطط المبسط لآلة التبريد الامتصاصية ذات التأثير المستمر موضح على الشكل (13-30).



الشكل (13-30): المخطط المبسط لآلة التبريد الامتصاصية ذات التأثير المستمر

الآلة تعمل كما يلي:

يتم في المولد غليان المحلول الغني (بوسيط التبريد) على حساب إعطاء حرارة Q_G من مصدر خارجي. يتم إجراء الغليان عند ضغط ثابت p_K وتناقص مستمر لتركيز المحلول وارتفاع درجة حرارة غليانه. البخار المتشكل من وسيط التبريد والمادة الماصة يدخل إلى المكثف حيث يتم تكثيفه نتيجة طرحه لكمية الحرارة Q_K إلى المصادر ذات درجة حرارة الوسط المحيط. إن تركيز البخار الداخل إلى المكثف يصبح أعلى بكثير من تركيز المحلول المغلي. تكاثف البخار في المكثف يتم عند ضغط p_K والذي يوافق درجة حرارة الخليط. عند ذلك إذا كانت درجات حرارة الغليان الطبيعية لوسيط التبريد والمادة الماصة مختلفة بشكل كبير بمقدار $200-300^{\circ}C$ فإن البخار عملياً يتألف فقط من

وسيط التبريد وأن تكاثفه يتم عند درجة حرارة ثابتة وبالتالي عند ضغط ثابت. يخنق السائل الحاصل في المكثف في صمام التمدد الأول من الضغط p_k في المكثف إلى الضغط p_o في المبخر ويدخل إلى الأخير. يتعلق الضغط في المبخر بدرجة حرارة غليان وسيط التبريد، التي بدورها تتحدد بوساطة درجة حرارة المصدر المبرّد.

بنتيجة إعطاء حرارة Q_o من المصدر المبرّد إلى المبخر يتم غليان السائل. البخار المتشكل عند ذلك يدخل إلى وعاء الامتصاص. يساق المحلول الضعيف (بوسيط التبريد) من المولد عبر صمام التمدد الثاني إلى وعاء الامتصاص. يتم في المولد الحفاظ على ضغط p_k وفي وعاء الامتصاص على ضغط p_o. وذلك لأن هذين الجهازين موصولان مع المكثف والمبخر على التوالي.

في وعاء الامتصاص يتم امتصاص البخار بوساطة المحلول الضعيف وبالنتيجة فإن التركيز يزداد حتى يصل إلى التركيز الأولي في إجراء الغليان في المبخر. يكون إجراء الامتصاص مصحوباً عادة بتولد (نشر) حرارة Q_a والتي تطرح إلى الوسط المحيط (ماء–هواء). يدفع المحلول الغني من وعاء الامتصاص بوساطة مضخة إلى المولد. بهذا الشكل تكتمل الدورتان المباشرة والعكسية ويتم عمل الآلة باستمرار.

في آلة التبريد الامتصاصية وبمساعدة عناصرها الأساسية: المولد، صمام الخنق الثاني، وعاء الامتصاص، والمضخة تتحقق الدورة الترموديناميكية المباشرة، وبمساعدة المكثف، صمام الخنق الأول والمبخر تتحقق الدورة الترموديناميكية العكسية.

يمكن كتابة معادلة التوازن الحراري لآلة التبريد الامتصاصية البسيطة كالتالي:

$$Q_{d} + Q_{o} + Q_{II} = Q_{k} + Q_{a} \qquad (26\text{-}13)$$

إذ Q_d كمية الحرارة المعطاة للمولد من مصدر التسخين.

Q_o كمية الحرارة المعطاة للمبخر من المصدر المبرد (الإنتاجية التبريدية للآلة).

Q_{II} العمل المصروف في المضخة لدفع المحلول الغني من وعاء الامتصاص إلى المولد.

Q_k الحرارة المطروحة في المكثف إلى مياه التبريد.

Q_a الحرارة المطروحة في وعاء الامتصاص إلى مياه التبريد (الوسط المحيط).

تتحدد الفعالية الطاقية لدورات آلة التبريد الامتصاصية بوساطة معامل حراري، والذي هو نسبة الإنتاجية التبريدية إلى مجموع الحرارة المقدمة للمولد وعمل المضخة:

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{Q_G + Q_H} \qquad (27\text{-}13)$$

ونظراً لكون قيمة Q_H بالمقارنة مع Q_G صغيرة جداً، لذا يمكن إهمالها. بالتالي فإن المعامل الحراري للآلة:

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{Q_G} \qquad (28\text{-}13)$$

2-5-13: مخطط (ξ, i)

يعد هذا المخطط بسيطاً ومريحاً للحسابات الحرارية لآلة التبريد الامتصاصية. نرى على المخطط الشكل (13-31) الخطوط الإيزوترمية للسائل والبخار لأجل تركيز محدد وعند $p = const.$. تحدد المسافة بين إيزوترمي البخار والسائل لدرجة الحرارة نفسها قيمة حرارة التبخر r . باستخدام مخطط (ξ, i) يمكن عند ضغط محدد $p = const.$ إنشاء منحن الغليان AB على الشكل (13-31). عند ذلك فإن t_1 تصف درجة حرارة غليان المركب (1) $(\xi = 1)$ و t_2 تصف درجة حرارة غليان المركب (2) $(\xi = 0)$. إذا وضعنا القيمة العددية للتبخر $r_2 = AC$ للمركب (2) فوق النقطة (A)، فإن إيزوترم البخار $t_2 = const.$ يمر عبر (C). تحدد النقطتان (A) و (C) إنتالبي السائل المغلي i'_2 وإنتالبي البخار المشبع الجاف i''_2 للمركب (2) عند الضغط المحدد $p = const.$. يمكن حساب إنتالبي البخار المحمص على أساس حرارته النوعية.

بشكل مشابه يمكن إيجاد $r_1 = BD$ والنقطة (D) للمركب (1) عند $\xi = 1$ عند $p = const.$ ، عبر النقطة (D) يجب أن يمر إيزوترم البخار $t_1 = const.$. بتكرار هذه الطريقة عند ضغوط مختلفة يمكن إيجاد النقاط على المحورين $\xi = 0$ و $\xi = 1$ لأجل كل إيزوترم للبخار.

يمكن إنشاء منحني التكاثف CD على أساس معطيات مخطط (ξ, i). توجد تحت منحني الغليان AB منطقة السائل غير المغلي (مبرّد)، أما فوق منحني التكاثف فتوجد منطقة البخار المحمص. وتتوضع بين هذين المنحنيين الحديين منطقة البخار الرطب

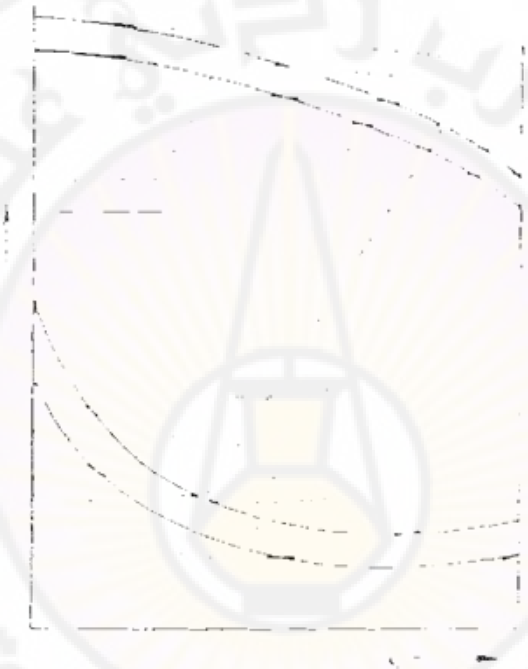
للمزيج. عند ذلك فإن إيزوترم البخار الرطب EF يصل النقطة (E) (تقاطع إيزوترم السائل / مع منحني الغليان AB) مع (F) (تقاطع إيزوترم البخار / مع منحني التكاثف CD).



الشكل (13-31): مخطط (i,ξ) (خطوط الغليان والتكاثف والخطوط الإيزوترمية)

باستخدام قاعدة المزج في النقطة (M) نجد نسبة الجزء السائل G_1 إلى الجزء البخاري G_2 كنسبة القطعة (MF) إلى القطعة (ME). مثلت على المخطط (i,ξ) الشكل (13-32) منحنيات البخار والتكاثف لأجل الضغطين p_1 و p_2 . ويجب ملاحظة إن نقاط الحالة ليست ذات مدلول واحد. فمثلا تصف النقطة (A) بالنسبة للضغط p_2 السائل المبرد، أما بالنسبة للضغط p_1 فتصف البخار الرطب. والنقطة (B) تحدد حالة البخار المحمص بالنسبة للضغط p_1 وحالة البخار الرطب بالنسبة للضغط p_2 . إيزوترمات السائل عمليا لا تتعلق بالضغط، أما إيزوترمات البخار فتختلف من ضغط إلى آخر.

مخطط (t,ξ) الكامل لمزيج الأمونيا والماء (H_2O+NH_3) موضح على الشكل (13-33). تتوضع إيزوبارات البخار المشبع الجاف الكائنة في حالة توازن مع المحلول المغلي فوق إيزوبارات المحلول المغلي لأن إنتالبي البخار أكبر من إنتالبي السائل بقيمة حرارة التبخر . تركيز البخار المشبع الكائن في حالة توازن عند درجة الحرارة نفسها مع السائل يكون أكبر منه للأخير ، ولذلك فإن الإيزوترمات تنزاح باتجاه اليمين.



الشكل (13-32): مخطط (t,ξ) (خطوط الغليان والتكاثف والخطوط الايزوترمية عند الضغوط p_1 و p_2)

توجد بين منحنيي السائل المغلي والبخار المشبع الجاف منطقة البخار الرطب. وتحت خط الغليان توجد إيزوترمات السائل المحلول. تحدد إيزوترمات البخار الرطب عند ضغوط مختلفة باستخدام الخطوط المساعدة. فمثلاً يوجد إيزوترم البخار الرطب الموافق لحالة السائل في النقطة (1) بإنشاء شاقول حتى التقاطع مع المنحني المساعد، وبعد ذلك يرسم خط موازٍ لمحور السينات حتى التقاطع مع إيزوبار البخار المشبع الجاف في النقطة(2). ويعد الخط (2-1) الإيزوترم المطلوب. ويمكن ببساطة أيضاً تحديد التركيز التوازني للبخار بمساعدة المنحنيات المساعدة (K).



الشكل (13-33): مخطط (i, ξ) للأمونيا مع الماء

13-6: الأنبوبة الإعصارية

الأنبوبة الإعصارية هي جهاز بسيط يمكن أن يسبب انفصالاً في الطاقة. يتألف من: فوهة، غرفة إعصارية، صفيحة فاصلة، وصمام للطرف الساخن، صمام للطرف البارد، أنبوبة للطرف الساخن والبارد ودون أية أجزاء متحركة الشكل (13-34). عند تشغيل الأنبوبة الإعصارية فإن الغاز المضغوط يتمدد في الفوهة ثم يدخل إلى الأنبوبة الإعصارية بشكل مماسي وبسرعة كبيرة وبشكل دوامي، الغاز الداخل ينفصل في ضغط منخفض إلى تيارين ساخن وبارد. واحد من التيارين، وهو الغاز المحيطي، درجة حرارته أعلى من درجة حرارة الغاز الداخل، بينما الاخر المركزي له درجة حرارة أخفض.



الشكل (13-34)

13-6-1: لمحة تاريخية

الأنبوبة الإعصارية تم اكتشافها أولا من قبل Ranque، وهو عالم معادن وفيزيائي حصل على براءة اختراع فرنسية عام (1923)، وأخرى أمريكية في العام (1934). رد الفعل المبدئي في المجتمع العلمي والهندسي كان عدم التصديق وعدم الاكتراث. وبما أن الأنبوبة الإعصارية كانت غير فعالة ترموديناميكيا وبشكل كبير ، فقد تم العزوف عن هذه الفكرة لعدة سنوات. لكن تجدد الاهتمام بهذه الأداة من قبل Hilsch، المهندس الألماني الذي قدم تقريراً حول تجاربه الواسعة ودراساته النظرية التي هدفت إلى تحسين مردود الأنبوبة الإعصارية. كما بحث منهجياً في تأثير ضغط الدخول والبارامترات الهندسية للأنبوبة الإعصارية على أدائها، وقدم شرحاً معقولاً لعملية انفصال الطاقة. بعد الحرب العالمية الثانية تم الكشف عن أنابيب ووثائق Hilsch وتم دراستها بشكل واسع. ما يدلنا على الاهتمام المبكّر في الأنبوبة الإعصارية هو التقرير الشامل الذي قام به Westley والذي تضمن أكثر من (100) مرجع. وهناك عدد من التقارير الأخرى التي قام بها

أمثال: Gurley و McGree، Kalvinskas، Dobratz، Nash ووفرت هذه التقارير عرضا موسعا لتطبيقات وتحسينات الأنبوبة الإعصارية. والأبحاث ما تزال مستمرة.

تعد الأنبوبة الإعصارية من أجهزة التبريد المثيرة للاهتمام، يمكن بواسطتها الحصول على درجات حرارة منخفضة بكلفة منخفضة وبتصميم بسيط إلا أن مردودها يعتبر منخفضاً، وما تزال الأبحاث حتى الآن في أنحاء العالم تحاول إيجاد التفسير الفيزيائي الأكيد لهذه الظاهرة بالإضافة إلى محاولة تحسين أدائها بشتى الوسائل.

13-6-2: مزايا و عيوب الأنبوبة الإعصارية

✓ مميزات أنبوبة الإعصار :

نظراً لأساليب التبريد الأخرى المتبعة في عمليات التبريد الصناعي فإن هنالك عدة مميزات تتمتع بها الأنبوبة الإعصارية عن غيرها من الأساليب التقليدية المستخدمة في التبريد و من هذه المميزات:

- بساطة التصميم (لا تستخدم أية أجزاء متحركة).
- لا تستخدم الكهرباء أو أية مواد كيميائية.
- صغيرة الحجم وخفيفة الوزن.
- كلفتها منخفضة.
- الهواء البارد والحار فيها إنتاجه فوري.
- متينة لأنها في معظم الأحيان تصنع من الحديد المقاوم للصدأ.
- درجة حرارة الهواء بالإضافة لتدفقه الخارج من الأنبوبة قابلان للتعديل .
- مولدات الإعصار المستخدمة فيها قابلة للتعديل بحسب التصميم والموديل.
- صديقة للبيئة فهي لا تحتاج لوسائط تبريد عند عملها فالهواء بمثابة جسم التشغيل.

✓ **عيوب أنبوبة الإعصار :**

على الرغم من أن الأنبوبة الإعصارية تتمتع بالمميزات السابقة إلا أن هنالك بعض العيوب التي أدت إلى الحد من استخدامها على نطاق واسع في عمليات التبريد ومن هذه العيوب نذكر :

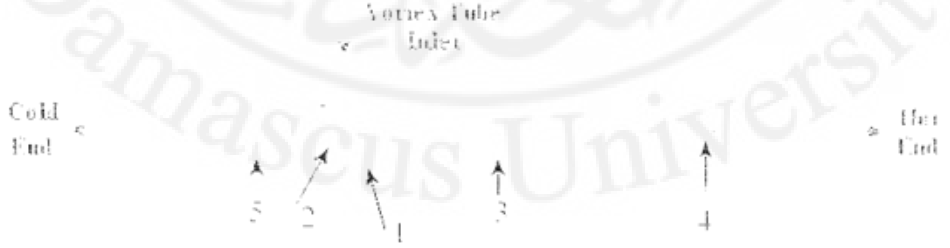
- مردود الأنابيب الإعصارية غالبا ما يكون منخفضا.
- الضجيج الناتج عن تشغيل الضاغط وعمله.
- غير اقتصادية لذلك تستخدم فقط عند وجود كمية فائضة من الهواء المضغوط.

أهم العناصر التي تتألف منها الأنبوبة الإعصارية القياسية:

الأجزاء الأساسية هي:

- حجرة الإعصار الحاوية على مولّد الإعصار، ويصمم المولد بحيث يحوي أيضا فوهة الطرف البارد.
- أنبوبة الطرف الساخن.
- صمام التحكم المخروطي في نهاية أنبوبة الطرف الساخن والذي يستخدم للتحكم بمقدار التدفق الكتلي من الطرف الساخن.
- قد يضاف صمام لتأمين هبوط الضغط المناسب على الطرف الساخن.
- أنبوبة الطرف البارد.

الشكل (13-35) يوضح الأجزاء القياسية للأنبوبة الإعصارية.



الشكل (13-35): أجزاء الأنبوبة الإعصارية القياسية: 1) حجرة الإعصار، 2) مولد الإعصار، 3) أنبوبة الطرف الساخن، 4) صمام التحكم المخروطي 5) أنبوبة الطرف البارد

13-6-3: تعريفات هامة (البارامترات المميزة)

١- الكسر البارد cold mass fraction:

إن الكسر البارد هو البارامتر الأهم الذي يحدد الأداء وانفصال الطاقة (أو درجة الحرارة) داخل الأنبوبة الإعصارية. الكسر البارد يُعرّف بأنّه نسبة التدفق الكتلي للهواء البارد إلى التدفق الكتلي للهواء الداخل. يمكن أن يتم التحكم بالكسر البارد باستخدام صمام مخروطي يتوضع في نهاية الأنبوبة التي يمر بها الهواء الساخن. ويعبر عنه كما يلي:

$$\mu_c = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_i} \qquad (29\text{-}13)$$

حيث $\dot{m}_c$ التدفق الكتلي للهواء البارد الخارج و $\dot{m}_i$ التدفق الكتلي للهواء الداخل.

٢- هبوط درجة حرارة الهواء البارد:

هبوط درجة حرارة الهواء البارد أو انخفاض درجة الحرارة يعرّف بأنه الفرق في درجة الحرارة بين الهواء الداخل والهواء البارد:

$$\Delta T = T_i - T_c \qquad (30\text{-}13)$$

حيث T_i درجة حرارة هواء الدخول و T_c درجة حرارة الهواء البارد.

٣- قطر فوهة الطرف البارد:

نسبة قطر الطرف البارد β تعرّف بأنها نسبة قطر فوهة الطرف البارد d إلى قطر الأنبوبة الإعصارية D:

$$\beta = \frac{d}{D} \qquad (31\text{-}13)$$

٤- المردود الإيزوانتروبي:

لحساب كفاءة التبريد للأنبوبة الإعصارية يستخدم مبدأ التمدد الأديباتي للغاز المثالي. عندما يتدفق الهواء في الأنبوبة الإعصارية يحصل التمدد بعملية إيزنتروبية ويكتب هذا كما يلي:

$$\eta_{is} = \frac{T_i - T_e}{T_i\left[1 - \left(\frac{p_a}{p_i}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \qquad (32\text{-}13)$$

حيث η_{is} و p_i و p_a و k تمثل على التوالي: المردود الإيزوانتروبي، ضغط الدخول، الضغط الجوي، نسبة الحرارة النوعية.

٥- معامل الأداء:

يعرف معامل الأداء COP بأنه نسبة معدل التبريد إلى الطاقة المستخدمة في التبريد. ولإيجاد هذه المعامل يتم استخدام مبدأ التمدد الإيزوانتروبي للغاز المثالي وتصبح المعادلة بالشكل:

$$COP = \frac{\mu_a c_p (T_i - T_e)}{\frac{k-1}{k} RT_i\left[\left(\frac{p_i}{p_e}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]} = \frac{q_e}{w} \qquad (33\text{-}13)$$

والتي فيها q_e معدل التبريد لواحدة الهواء الداخلة للأنبوبة الإعصارية، و w القدرة الميكانيكية المستخدمة للتبريد لواحدة الهواء الداخل.

13-6-4: تصنيفات الأنبوبة الإعصارية:

يمكن تصنيف الأنبوبة الإعصارية بشكل عام إلى نوعين:

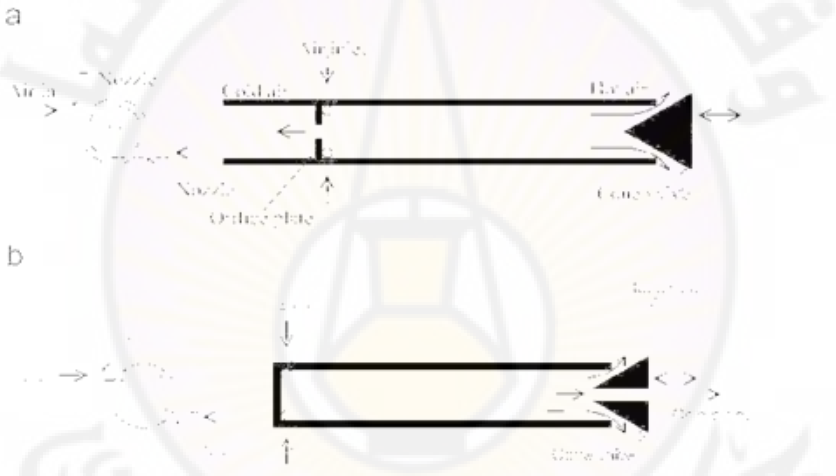
الأول هو النوع ذو الجريان المتعاكس Counter-flow type (وغالبا يشار إليه بأنه النوع القياسي).

النوع الآخر هو ذو الجريان المتوازي أو الوحيد الجريان Parallel uni-flow type كما هو موضح بالشكل (13-36).

13-6-4-1: الأنبوبة الإعصارية ذات الجريان المتعاكس

الأنبوبة الإعصارية ذات الجريان المتعاكس والموضحة بالشكل (13-36-أ) تتألف من: كتلة المدخل المتضمنة فوهات دخول وفوهة مركزية، الأنبوبة الإعصارية (أو الأنبوبة الساخنة)، صمام مخروطي الشكل. يدخل الغاز المضغوط (هواء مثلاً) بضغط

عال إلى الأنبوبة الإعصارية مماسياً عبر فوهة أو عدة فوهات دخول بسرعة عالية. الهواء المتمدد داخل الأنبوبة يشكل إعصاراً يدور بسرعة عالية. الهواء يتدفق عبر الأنبوبة بدلاً من المرور عبر الفوهة المركزية المتوضعة قرب الفوهات وذلك بسبب كون الفوهة ذات قطر أصغر من الأنبوبة. طول الأنبوبة عادة يكون بين (5) و (30) ضعفاً من قطر الأنبوبة، ولا يوجد قيمة مثلى تم تحديدها بين هذه الحدود. عندما يتمدد الغاز في الأنبوبة ينخفض الضغط بشكل حاد إلى قيمة أعلى بقليل من الضغط الجوي، وسرعة الهواء يمكن أن تصل إلى سرعة الصوت. الفعل النابذ سوف يبقي هذا الإعصار المقيّد قريباً من السطح الداخلي للأنبوب.



الشكل (13-36): تصنيفات الأنبوبة الإعصارية a) الأنبوبة الإعصارية ذات الجريان المتعاكس. b) الأنبوبة الإعصارية وحيدة الجريان

الهواء الذي يخرج من نهاية الأنبوبة يمكن تغيير كميته بواسطة صمام تحكم بالتدفق يكون شكله عادة مخروطياً. كمية الهواء المطروح تكون بين 30% و 70% من تدفق الهواء الكلي في الأنبوب. الهواء المتبقي يعاد من خلال وسط الأنبوب وفق محوره كتيار عكسي. حالما يتشكل الإعصار في الأنبوب فإن الهواء قرب المحور يبرد بينما الهواء في المحيط يسخن بالمقارنة مع درجة حرارة الهواء الداخل. هذه الظاهرة تعرف أيضاً بأثر انفصال درجة الحرارة (أو أثر رانك هيلش Ranque-Hilsch Effect). وكنتيجة فإن الغاز الخارج من الفوهة يكون بارداً، والغاز الساخن يتدفق إلى الخارج في

الاتجاه الآخر . لهذا الجهاز ميزة جديرة بالملاحظة وهي غياب الأجزاء المتحركة وبساطة التشغيل.

13-6-4-2: الأنبوبة الإعصارية وحيدة الجريان

الأنبوبة الإعصارية وحيدة الجريان الشكل (13-36-ب) تتضمن منطقة الدخول الحاوية على فوهات الدخول، وتتألف أيضاً من الأنبوبة وصمام مخروطي يحوي فوهة مركزية. مخرج الهواء البارد متوضع بشكل متمركز مع المخرج الحلقي للهواء الساخن وذلك بعكس الأنبوبة الإعصارية الشائعة ذات الجريان المتعاكس. إن عمل الأنبوبة الإعصارية ذات الجريان الوحيد مماثل لعمل الأنبوبة ذات الجريان المتعاكس. إن درجة حرارة الهواء الخارج من النهايتين الباردة والساخنة يمكن أن يختلف بمقدار 140 – 160°C وتم قياس فروق عظمى وصلت إلى 230°C من قبل Camassar. وبشكل عام، فإن الحد العملي لدرجة الحرارة المنخفضة للطرف البارد هو 40°C – على الرغم من أنه تم الوصول إلى 50°C – . الحد العملي لدرجة الحرارة المرتفعة هو 190°C، لكن تم الوصول إلى درجة حرارة تزيد عن 255°C من قبل Bruno. التطبيقات العامة للأنبوبة الإعصارية تكون في تلك المجالات حيث صغر الحجم والوثوقية والتكلفة المنخفضة هي العوامل الأساسية بينما مردود التشغيل لا يشكل أهمية كبيرة. من بعض التطبيقات النموذجية: تبريد الأجهزة في الطائرات، بدلات الفضاء والمناجم، تبريد الأدوات، والتبريد في العمليات الصناعية.

يستخدم هذا النوع من آلات التبريد للحصول على درجات برودة تتراوح ما بين 60°C – و 200°C – . يستعمل الهواء في هذه الآلات كوسيط تبريد عندما يراد استخدامها للحصول على درجة برودة تصل حتى 130°C – ، أما عندما يراد الحصول على درجة برودة أقل منها فإنه يستخدم الهليوم أو الهدروجين كوسيط تبريد.

مسائل غير محلولة

1-13

تبلغ الإنتاجية التبريدية لآلة تبريد هوائية $Q_o = 20{,}000\,kcal/h$. حدد معامل التبريد واستطاعة المحرك الكهربائي النظرية إذا علمت أن ضغط الهواء الأعظمي في الدورة $p_2 = 5\,bar$ والضغط الأصغري $p_1 = 1.1\,bar$. درجة حرارة الهواء في بداية الانضغاط $t_1 = 0°C$ وعند الخروج من المبرد $t_2 = 20°C$.

الجواب: $\varepsilon = 2.56$

2-13

آلة تبريد تعمل على الأمونيا إنتاجيتها التبريدية $Q_o = 21{,}000\,kcal/h$ أوجد:

أ- معامل التبريد،

ب- الإنتاجية التبريدية لـ $1kg$ أمونيا،

ت-كمية وسيط التبريد الدوارة في آلة التبريد،

ث-العمل المصروف على ضغط $1kg$ أمونيا والاستطاعة اللازمة،

ج- درجة جفاف البخار بعد عملية الخنق.

وذلك لأن الضغط المطلق في المبخر $p_o = 2.94\,bar$ والضغط المطلوب في المكثف $p_c = 7.85\,bar$.

ملاحظة: ليس هناك زيادة تبريد لوسيط التبريد السائل كما أن البخار الخارج من المبخر هو بخار مشبع جاف.

$\varepsilon = 5.4555, q_o = 120.73\,kJ/kg$

الجواب: $\dot{m} = 728.26\,kg/h, w_c = 22.13\,kJ/kg$

$N_c = 4.477\,kW, \chi_4 = 0.2$

3-13:

آلة تبريد بخارية مع سحب بخار مشبع جاف عاملة على الأمونيا (R717) تعمل عند الشروط التالية:

- درجة حرارة الغليان $t_o = -10°C$.

- درجة حرارة التكاثف $t_c = 20°C$.

حدد معامل التبريد للآلة السابقة، كيف سيتغير معامل التبريد إذا أصبحت درجة حرارة التكاثف $t_c = 30°C$ بدلاً من $t_c = 20°C$؟

الجواب: $\varepsilon_{20} = 7.5, \varepsilon_{30} = 5.7$

4-13:

لدينا آلة تبريد عاملة على (R22) إنتاجيتها التبريدية $Q_o = 5.000\,kcal/h$ جليد بدرجة صفر للماء الذي درجة حرارته $10°C$. يمتص ضاغط هذه الآلة بخار الأمونيا بكسر جفاف $\chi = 0.98$ ويضغط هذا البخار أديباتيا حتى الضغط $10\,bar$، درجة حرارة وسيط التبريد الخارج من المكثف $15°C$ ودرجة حرارة خروجه من صمام التمدد $10°C$ والمطلوب:

أ- تصريف الأمونيا في الساعة

ب- الإنتاجية التبريدية لآلة التبريد في الثانية

ت- كمية الحرارة المطروحة في المكثف في الثانية

ث- كسر الجفاف لوسيط التبريد في نهاية عملية الخنق

ج- الاستطاعة النظرية لمحرك الضاغط

ح- قارن معامل التبريد لآلة التبريد المدروسة مع معامل التبريد لدورة كارنو التي تعمل ضمن المجال الحراري نفسه

خ- مثل الدورة على مخطط (T,s)

حيث حرارة ذوبان الجليد $r = 331\,kJ/kg$.

$\dot{m} = 2.612\,kg/s, Q_o = 459.72\,kW$

الجواب: $Q_c = 538.1\,kW, \chi_4 = 0.14$

$N_c = 78.3\,kW, \varepsilon = 5.87, \varepsilon_c = 7.74$

وقل رب زدني علما
Damascus University

الفصل الرابع عشر

التوصيل الحراري

- معلومات ومفاهيم عامة
- انتقال الحرارة بالتوصيل
  - تعاريف ومفاهيم أساسية
  - القانون الأساسي للتوصيل الحراري
- انتقال الحرارة عبر جدار مستو
  - جدار وحيد الطبقة
  - جدار مستو متعدد الطبقات
- انتقال الحرارة عبر جدار أسطواني
  - جدار أسطواني وحيد الطبقة
  - جدار أسطواني متعدد الطبقات
- مسائل غير محلولة

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الرابع عشر

التوصيل الحراري

14-1: معلومات ومفاهيم عامة

تعد نظرية التبادل الحراري، العلم الذي يدرس توزع الحرارة وانتقالها بين الأجسام، ويشكل علم الترموديناميك مع نظرية التبادل الحراري الأسس النظرية للهندسة الحرارية.

تعد نظرية انتقال الحرارة أحد فروع العلم الحديث ولها قيمة عملية وعلمية كبيرة في الطاقة والعمليات الحرارية، النفط، والصناعات الكيميائية وفي الفروع الأخرى من الصناعة.

يعد التبادل الحراري أساسياً لظواهر كثيرة نلاحظها في الطبيعة أو في الصناعة، هناك كثير من المسائل العملية سواء في الأجهزة الطائرة أو في محطات الطاقة أو ... يعتمد حلها على أساس نظرية التبادل الحراري.

تدرس نظرية التبادل الحراري قوانين انتقال الحرارة في الأجسام الصلبة والسائلة والغازية.

إن أية عملية انتقال للحرارة تسمى تبادلاً حرارياً فعندما يتلامس جسمان (أحدهما ساخن والآخر بارد) يحدث تبادل حراري بينهما حيث تنقص الطاقة الداخلية للجسم الأول و تزداد للجسم الآخر. وهذا ما يؤيده قانون الترموديناميك الثاني الذي ينص على أن الحرارة تنتقل تلقائيا من الجسم الأسخن إلى الجسم الأبرد.

إن معرفة قوانين ظاهرة انتقال الحرارة والإلمام التام بوسائل التحكم بنوعية وكيفية انتقالها (أو جريانها) مهمة جداً وأساسية في إنجاز تصاميم وإنشاء الأجهزة الحرارية للأغراض الصناعية كالأفران، والمراجل البخارية، والمبادلات الحرارية، وأجهزة التبريد، والتدفئة والمراجل البخارية، ومحطات الطاقة الحرارية... ففي محطات الطاقة الحرارية مثلاً، يكون الاعتماد الأساسي على توليد البخار لاستعماله في تشغيل العنفات (التوربينات البخارية) ثم المولدات الكهربائية. ويرتبط انتقال الحرارة في بعض مراحل هذه العملية على احتراق الوقود في المراجل حيث تعطى الحرارة للماء لتوليد البخار ذي

الضغط العالي ودرجة الحرارة المرتفعة لغرض تشغيل العنفات (التوربينات) والمولدات الكهربائية ولغرض تكثيف البخار (ذي الضغط ودرجة الحرارة المنخفضتين بعد عملية التمدد في العنفة) بهدف إعادة استعماله كماء لتوليد البخار في المرجل، يتم استخدام المكثفات، وتنجز هذه العملية بواسطة مياه التبريد القادمة من أبراج التبريد وتُعطى الحرارة المسحوبة من البخار المار بالمكثفات للهواء المحيط.

يميزون الأشكال التالية لانتقال الحرارة: بالتوصيل ، بالحمل ، بالإشعاع الشكل (14-1).



الشكل (14-1): طرق انتقال الحرارة

التوصيل الحراري:عبارة عن عملية انتقال الحرارة (الطاقة) بين الجسيمات البنيوية للمادة (الجزيئات، الذرات، الإلكترونات) المتماسة المتحركة بصورة عشوائية. الجسيمات البنيوية الأكثر سخونة في جزء من الجسم والتي لها طاقة أكبر من غيرها المتماسة مع الجسيمات المحيطة، تنقل لها جزء من طاقتها الشكل (14-2). تبادل الحرارة هذا يتحقق في أية أجسام أو أنظمة غير متوازنة حرارياً. تتعلق آلية انتقال الحرارة بالتوصيل بحالة الجسم الفيزيائية.

يتحقق انتقال الحرارة في السوائل والأجسام الصلبة بصورة مباشرة بانتقال الحركة الحرارية للجزيئات والذرات المتجاورة لجسيمات المادة. بينما في المعادن يجري انتقال الحرارة عن طريق حركة (انتشار) الإلكترونات الحرة. فعند تسخين محور معدني من أحد طرفيه يمكن ملاحظة أن الحرارة تنتقل تدريجياً عبر كامل طول المحور . ويمكن تفسير

ذلك بأن الجزيئات والذرات والإلكترونات الحرة تتسارع في طرف المحور المعرض للتسخين وبالتالي تتزايد طاقتها الحركية وعند تصادمها مع الجزيئات المجاورة (ذات الطاقة الأقل) تعطيها جزءاً من طاقتها الأمر الذي يؤدي إلى انتشار الحرارة باتجاه النهاية الباردة للمحور .



الشكل (14-2): انتقال الحرارة بالتوصيل

تنتشر الحرارة في الأجسام الغازية بالتوصيل الحراري من جراء تبادل الطاقة عند تصادم الجزيئات التي لها سرعة مختلفة للحركة الحرارية (عن طريق انتشار الجزيئات والذرات).

الحمل: عبارة عن انتقال الحرارة عند تحريك الأوساط (السوائل، الغازات) في الفراغ من منطقة بدرجة حرارة معينة إلى منطقة بدرجة حرارة أخرى. يترافق الحمل دوما بالتوصيل الحراري، حيث في هذه الحالة تكون الجزيئات التي لها درجة حرارة مختلفة متماسة فيما بينها. ندعو تبادل الحرارة المشترك بالحمل والتوصيل الحراري بانتقال الحرارة الحملي (انتقال الحرارة بالحمل).

يجري انتشار الحرارة بالحمل فقط في الموائع والغازات ويوضح الشكل (14-3) آلية انتشار الحرارة في الماء الموجود في وعاء والذي يتم تسخينه من مصدر حراري خارجي. فالطرف الأيمن من الوعاء يسخن بدرجة أكبر من الطرف الأيسر الأمر الذي يثير دوران الماء بعكس عقارب الساعة والذي يؤدي في النتيجة إلى تسخين كامل كتلة الماء.

إذا قمنا بتسخين الماء من الأعلى فإن دوران الماء لن يكون وذلك لأن كامل كتلة الماء تسخن فقط من جراء التوصيل الحراري وبما أن معامل التوصيل الحراري λ للماء أصغر بنحو (100) مرة من معامل التوصيل الحراري للفولاذ $\lambda_{ف}$ فإن تسخينه سيتم ببطء شديد. في المثال السابق كان المائع ساكناً والحركة إن وجدت فهي ناتجة عن الاختلاف في كثافة الطبقات المستقلة من المائع عند تسخينه. نسمي انتقال الحرارة هذا بالحمل الحر .



الشكل (14-3): توزع الحرارة في السائل بواسطة الحمل

في حال كون حركة الغاز أو السائل ناتجة عن مروحة أو مضخة أو خلاط فإن انتقال الحرارة فيه سيكون بالحمل الحراري القسري. وانتشار الحرارة في الماء لمثل هذه الحالات يجري بسرعة أكبر بكثير مما هو عليه لحالة الحمل الحر (هذا ما يمكن ملاحظته عند التدفئة باستخدام مدفأة عادية (حمل حر) وتدفئة بمدفأة مزودة بتوربين (حمل قسري)).

الإشعاع: يعتمد انتقال الحرارة بالإشعاع على تحول جزء من الطاقة الداخلية للجسم إلى طاقة إشعاع تنقلها الموجات الكهرطيسية في الفراغ. وعندما تصادف هذه الأشعة جسما آخر تجري فيه عملية معاكسة (تحول طاقة الأمواج الكهرطيسية إلى طاقة داخلية لهذا الجسم) نقول إنه حصل تبادل حراري بالإشعاع بين الجسمين حيث أطلق أحدهما الطاقة وامتصها الآخر .

على سبيل المثال، عند طيران مركبة الفضاء بين الكواكب (في الفضاء) يشع سطحها طاقة ويسقط عليه إشعاع الشمس والأجسام الفضائية الأخرى وبحسب فعالية التبادل الحراري هذا، تتعلق حالة درجة حرارة بطانة مركبة الفضاء .

عملياً لا تجري عمليات انتقال الحرارة بأسلوب واحد كأن يكون بالتوصيل أو الحمل أو بالإشعاع بل بمشاركة أسلوبين وحتى ثلاثة أساليب في آن معاً. على سبيل المثال يجري في مولد البخار انتقال الحرارة من منتجات احتراق الوقود الساخنة إلى جدران أنابيب الغلاية عن طريق الإشعاع والحمل، ضمن معدن جدران الأنابيب تنتقل الحرارة بواسطة التوصيل الحراري ومن ثم يتحقق استمرار عملية انتقال الحرارة بالحمل إلى الماء المغلي أو البخار. وكذلك الأمر عمليات انتقال الحرارة الجارية في أي مبادل حراري (مكثف-مبخر-محمص-...).

يمكن أن نميز بين التبادل الحراري المستقر وغير المستقر فعمليات التبادل الحراري المستقر هي تلك التي يكون انتشار الحرارة فيها من نقطة لأخرى غير متعلق بالزمن بل يتعلق بالإحداثيات المكانية للنقطة. بينما يختلف انتشار الحرارة في عمليات التبادل الحراري غير المستقرة من نقطة لأخرى تبعاً للزمان والمكان كما هو الحال عند تسخين وتبريد الأجسام.

14-2: انتقال الحرارة بالتوصيل

14-2-1: تعاريف ومفاهيم أساسية

حقل درجات الحرارة: هو جملة قيم درجات حرارة جميع نقاط الجسم في لحظة زمنية معينة. إن درجات الحرارة لنقاط مختلفة من الجسم / تتحدد بدلالة الإحداثيات المكانية (x, y, z) وكذلك بدلالة الزمن τ ، أي أن / بالحالة العامة تحدد من العلاقة:

$$t = f(x, y, z, \tau) \qquad (1\text{-}14)$$

حقل درجات الحرارة الذي تصفه المعادلة (1-14) هو حقل درجات الحرارة غير المستقر أما إذا بقيت درجة الحرارة في كل نقطة من الحقل ثابتة مع مرور الزمن فإن الحقل سيكون مستقراً وعندها ستكون درجة الحرارة تابعة للإحداثيات المكانية فقط وسيكون شكل المعادلة كالتالي:

$$t = f(x, y, z) \quad , \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \tag{2-14}$$

إذا كانت درجة الحرارة تابعة لإحداثيين فقط (x, y) أي $t = f(x, y)$ فإن الحقل سيكون ثنائي البعد وإذا كانت t تابعة لإحداثي واحد كان الحقل أحادي البعد أي $t = f(x)$.

التدفق الحراري: هو كمية الحرارة المنتقلة في واحدة الزمن عبر سطح التبادل الحراري ونرمز له بالرمز Q وواحدته $[W]$.

التيار الحراري: وهو التدفق الحراري منسوباً لواحدة السطح ونرمز له بالرمز q وواحدته $[W/m^2]$ ويسمى أيضاً بالحمل الحراري أو كثافة التيار الحراري.

السطح الإيزوترمي: هو المحل الهندسي لنقاط الجسم التي لها درجة الحرارة نفسها وقد يكون مغلقاً أو مفتوحاً على حدود الجسم.

تدرج درجة الحرارة $grad(t)$: هو شعاع موجه بصورة ناظمية على السطح الإيزوترمي باتجاه ازدياد درجة الحرارة. على الشكل (4-14) تظهر السطوح الإيزوترمية التي تختلف درجات حرارتها بمقدار Δt، ويحسب التدرج الحراري من العلاقة التالية:

$$grad(t) = \lim_{\Delta n \to 0}\left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right) = \left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)\overline{n_0} \tag{3-14}$$

14-2-2: القانون الأساسي للتوصيل الحراري

إن الشرط الأساسي لانتقال الحرارة في الفراغ هو وجود فرق بين درجات حرارة نقاطه المختلفة. إن الشرط الضروري في حالة انتقال الحرارة بالتوصيل هو عدم مساواة تدرج درجة الحرارة للصفر في نقاط الجسم المختلفة. وتعد نظرية فوريه بمثابة القانون الأساسي لانتقال الحرارة بالتوصيل وهي تنص على أن التدفق الحراري التفاضلي العنصري dQ الذي يعبر عنصر السطح dA خلال الفاصل الزمني $d\tau$ يتناسب طرداً مع $grad(t)$ أي:

$$dQ = -\lambda\, dA\, d\tau\, grad(t) = -\lambda\, dA\, d\tau\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right) \tag{4-14}$$

وثابت التناسب في العلاقة السابقة هو λ وهو يصف قابلية المادة لتوصيل الحرارة ويسمى بعامل التوصيل الحراري.



الشكل (14-4): مفهوم تدرج درجة الحرارة

أما كثافة التيار الحراري فتحدد من العلاقة:

$$\vec{q} = \frac{dQ}{dA\,d\tau} = -\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right) = -\lambda\, grad(t) \qquad (5\text{-}14)$$

ولما كانت الحرارة تنتشر دائما من الجزء الأسخن إلى الجزء الأبرد فإن شعاع كثافة التيار الحراري $\vec{q}$ موجه وفق الناظم على السطح الإيزوترمي باتجاه نقصان درجة الحرارة. ولهذا فإن الشعاعين $grad(t)$ و $\vec{q}$ يتوضعان على الناظم نفسه على الإيزوترم ولكن من جهتين متعاكستين، الشكل (14-2). وهذا ما يفسر وجود إشارة (−) في العلاقتين (14-4) و (14-5). نرمز للقيمة المطلقة للشعاع $\vec{q}$ بالرمز q أي:

$$\left|\vec{q}\right| = q$$

إن العلاقة (14-4) تحمل اسم قانون فوريه أو القانون الأساسي للتوصيل الحراري واستنادا إلى ما ذكرناه فإن التدفق الحراري هو كمية الحرارة العابرة خلال سطح إيزوترمي اختياري مساحته A خلال واحدة الزمن وواحدته $[W]$:

$$Q = \int q\, dA = -\int_A \lambda\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right) dA = -\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right) A \qquad (6\text{-}14)$$

معامل التوصيل الحراري: من العلاقتين (14-5) و (14-6) نجد أن معامل التوصيل الحراري:

$$\lambda = \frac{|\vec{q}|}{|grad(t)|} = \frac{Q}{A\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)} \qquad (7\text{-}14)$$

وهو يساوي عددياً لكمية الحرارة العابرة واحدة السطح الإيزوترمي خلال واحدة الزمن عند تدرج درجة حرارة مساو للواحد وهو خاصة فيزيوحرارية للمادة ويقاس $[W/m\deg]$. في الحالة العامة يتعلق معامل التوصيل الحراري بتركيب المادة وكثافتها وبدرجة الحرارة والضغط والرطوبة وهو يتحدد لأغلب المواد تجريبيا. عند الحسابات العملية يستخدمون القيم التقريبية لـ λ المدرجة في الجدول (14-1). نلاحظ من الجدول أن المعادن هي أفضل الموصلات الحرارية وأن الغازات هي أسوأ الموصلات.

وقد لوحظ أن معامل التوصيل الحراري للغازات الحقيقية تابع للضغط ودرجة الحرارة أما في الغازات المثالية فإن λ تابعة لدرجة الحرارة فقط. وفي جميع الأحوال فإن معامل التوصيل الحراري للغازات يزداد مع ازدياد درجة الحرارة، الشكل(14-5). عند التدرج نفسه لدرجة الحرارة $grad(t)$ ولمواد مختلفة فإن كمية الحرارة المنتقلة عبر مادة اللوح تكون مختلفة فعلى سبيل المثال يمر عبر لوح فولاذي مستو حرارة أكبر بكثير مما هي عليه للوح مصنوع من البورسلان له مساحة اللوح الفولاذي نفسها. هذا الفعل موجود في قانون فوريه عن طريق معامل التوصيل الحراري الداخل فيه λ أي أن معامل التوصيل الحراري لمادة ما يصف مقدرة المادة على نقل الحرارة. كما هو ظاهر من قانون فوريه فإن معامل التوصيل الحراري يساوي الحمل الحراري النوعي $[W/m^2]$ المنتقل عند تدرج درجة الحرارة مقداره $1K/m$.

وعلى سبيل المثال معامل التوصيل الحراري للفولاذ $50W/mK$، هذا يعني أنه عند تغير درجة الحرارة على مسافة $1m$ بمقدار $1K$ خلال سطح مساحته $1m^2$ فإن السطح الإيزوترمي داخل الفولاذ ينقل استطاعة حرارية قدرها $5W$.

الجدول (14-1): قيم معاملات التوصيل الحراري لبعض المواد عند درجة حرارة الغرفة

اسم المادة	معامل التوصيل الحراري $[W/m\deg]$
فضة	458
نحاس	384
ألمنيوم	204
نحاس أصفر	85
كبريت	63
ماء	0.55
ثلج	0.47
فولاذ كربوني	45
مازوت	0.116

إن قيم معاملات التوصيل الحراري للمعادن وخلائطها تتراوح من $7-490 W/mK$، مع ازدياد درجة الحرارة فإن λ لأغلب المعادن تتناقص. عند درجة الحرارة $0°C$، قيم معامل التوصيل الحراري لبعض المعادن مساوي لـ:

النحاس $390 W/mK$، الألمنيوم $209 W/mK$، الحديد $74 W/mK$

يمكن أن تتغير قيمة معامل التوصيل الحراري للمعادن بصورة حادة بسبب وجود الشوائب الداخلة في تركيبها، فمثلاً وجود زرنيخ بالنحاس يخفض معامل التوصيل الحراري حتى $142 W/mK$. بينما قيمة λ للفولاذ عند نسبة كربون فيه 0.1% هي $53 W/mK$ وتصبح $39 W/mK$ إذا كانت نسبة الكربون 1%.

عادة لا تتغير قيمة معامل التوصيل الحراري لخلائط المعادن طردا بحسب الكميات الداخلة في مركبات الخليط، أضف إلى ذلك أن λ تتعلق بطريقة المعالجة الحرارية والميكانيكية للمعدن.



الشكل (14-5): قيم معاملات التوصيل الحراري لبعض الغازات بدلالة درجة الحرارة: 1- بخار الماء، 2- غاز CO_2، 3- هواء، 4- أرغون، 5- آزوت

التجربة المباشرة هي الطريقة الأجدى لتقدير معاملات التوصيل الحراري للمعادن وخلائطها.

إن قيم معامل التوصيل الحراري للمواد غير المعدنية ليست عالية حيث λ تتراوح من $2,9W/mK$ إلى 0.023.

تأخذ المواد العازلة حراريا أهمية كبرى ضمن هذه الطائفة من المواد. تسمى المواد التي قيم λ عند $t=50-100°C$ أقل من $0.25W/mK$ موادا عازلة حرارية. تستخدم بعض المواد العازلة الحرارية بحالتها الطبيعية كمثال عليها (الخشب-الفلين-الأسبتس) ومواد أخرى نحصل عليها صناعيا ومن أمثلتها: الصوف الصخري والصوف الزجاجي. يتم الحصول على مواد عزل حراري جيدة بإضافة مواد رغوية إلى مواد كيميائية ندعوها المواد البلاستيكية الرغوية.

يستخدمون من أجل العزل الحراري عند درجات حرارة عالية مواد متحملة لهذه الدرجات.

مع ازدياد درجة الحرارة يزداد معامل التوصيل الحراري لمواد البناء ومواد العزل الحراري.

قيم معاملات التوصيل الحراري للسوائل (عدا مصاهير المعادن) ليست كبيرة $(0.093 - 0.7 W/mK)$. كما أن قيم λ لجميع السوائل (عدا الماء والغليسرين) تتناقص مع ازدياد درجة الحرارة.

تعد الغازات والأبخرة ناقلة سيئة للحرارة بالتوصيل $(0.006 - 0.58 W/mK)$ كما أن λ للغازات تزداد بزيادة درجة الحرارة.

وبحسب النظرية الحركية للغازات فإن:

$$\lambda = \frac{9k-5}{8} w_m \Delta c_v \rho \qquad (8\text{-}14)$$

حيث w_m سرعة جريان الجزيئات.

Δ الطول الوسطي لمسار الجزيء.

c_v الحرارة النوعية بثبوت الحجم.

k أس الأديبات.

ρ كثافة الغاز.

تسمح لنا الصيغة (8-14) شرح علاقة معامل التوصيل الحراري بدلالة كل من درجة حرارة الغاز وكثافته.

فكما هو معلوم بازدياد درجة الحرارة تزداد السرعة الوسطية لحركة الجزيئات وكذلك حرارتها النوعية، وبالنتيجة يزداد λ.

عند قيم ضغوط عالية جداً (فوق الـ $2,000 bar$) أو منخفضة $(0.03 bar)$ تظهر قوى التجاذب بين الجزيئات، وكما تشير التجارب مع ازدياد الضغط فإن معامل التوصيل الحراري λ يزداد بصورة ملحوظة.

يشير تحليل علاقة معامل التوصيل الحراري بدرجة الحرارة ولأغلب الأجسام الصلبة والسائلة والغازية عند درجات حرارة معتدلة أنها من الشكل:

$$\lambda = \lambda_{,,}(1 \mp bt) \qquad (9\text{-}14)$$

حيث $\lambda_{,,}$ معامل التوصيل الحراري للمادة المدروسة عند $t = 0°C$.

b ثابت تجريبي، يصف ازدياد (انخفاض) λ للمادة عند ازدياد درجة حرارتها بمقدار $1°C$.

يعدون في الحسابات العملية أن معامل التوصيل الحراري واحد لكل جسم ويحددونه وفق المتوسط الحسابي لحدي درجة الحرارة للجسم.

قيم λ للمواد ذات البنية المسامية (مثل المواد العازلة حرارياً وكثير من مواد البناء: الآجر –البيتون–الخشب) صغيرة $(0.02 - 3 W/mK)$. والذي يلعب الدور الحاسم في تخفيض قيم λ للمواد المسامية هو وجود الهواء أو الغازات (وهي رديئة التوصيل الحراري) في تلك المسامات مما يؤثر سلبا في معامل التوصيل الحراري الإجمالي لتلك المواد. فالمواد المسامية تنقل الحرارة بصورة رئيسة عبر المادة الصلبة وبصورة ثانوية عبر الفراغات الهوائية ولما كانت λ للمواد الصلبة تزيد بعشرات المرات عن λ للهواء لهذا فإن معامل التوصيل الحراري للمواد المسامية يتعلق بنسبة حجم الفراغات إلى حجم المادة المسامية.

برفع درجة الحرارة تسوء خواص العزل الحراري للمواد المسامية ويفسر ذلك بازدياد معامل التوصيل الحراري للهواء وازدياد دور التبادل الحراري بالإشعاع بين جدران الفجوات الهوائية وكذلك تنشيط الحمل الحر في فجوات المادة.

ومن العوامل التي تؤثر بشدة في التوصيل الحراري للمواد العازلة هو رطوبتها فمع ازدياد الرطوبة فإن λ تزداد وذلك لأن الشقوق (المسامات) تُملأ بالماء بدلاً من الهواء وكما نعلم فإن λ للماء أكبر من λ للهواء بحوالي 25 مرة.

عند درجة حرارة أخفض من $t = 0°C = 273K$ يتحول الماء إلى جليد الذي موصليته الحرارية أكبر بأربع مرات من الموصلة الحرارية للماء عندها سيكون معامل التوصيل الحراري للمادة العازلة المشبعة بالرطوبة المتجمدة أكبر بنحو 100 مرة من

معامل التوصيل الحراري للمادة نفسها عندما تكون جافة. إن λ للمادة المسامية الرطبة أكبر بكثير من λ لكل من المادة الجافة والماء فللآجر الجاف $\lambda = 0.35 W/mK$ وللماء $\lambda = 0.55 W/mK$ بينما للآجر الرطب $\lambda = 1.05 W/mK$. يفسر هذا بأمرين:

- اختلاف الخواص الفيزيائية للماء المتميز عن خواص الماء الحر .
- وجود انتقال الحرارة الحملي نتيجة حركة الرطوبة داخل المادة المسامية.

المعادلة التفاضلية للتوصيل الحراري:

إن المعادلة التفاضلية العامة للتوصيل الحراري (14-10) تربط بين التغيرات المكانية والزمنية لدرجات حرارة نقاط الجسم ذلك عندما يكون حقل درجات الحرارة ثلاثي الأبعاد وغير مستقر وعند غياب المنابع الحرارية الداخلية:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) = a\nabla^2 t \qquad (14\text{-}10)$$

حيث $a = \dfrac{\lambda}{\rho c}$ معامل الانتشار الحراري وواحدته $\left[m^2/s\right]$،

c الحرارة النوعية $\left[J/kgK\right]$،

ρ الكثافة $\left[kg/m^3\right]$،

$\dfrac{\partial^2}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2}{\partial z^2}$ معامل لابلاس

تتخذ المعادلة (14-10) عند النظام غير المستقر لانتقال الحرارة بالتوصيل باتجاه أحادي البعد وليكن باتجاه المحور x الشكل التالي:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \qquad (14\text{-}11)$$

إن معامل الانتشار الحراري a الداخل في العلاقة (14-11) هو بارامتر فيزيائي للمادة وهو يصف سرعة تغير درجة الحرارة مع الزمن $\left(\dfrac{\partial t}{\partial \tau}\right)$.

فإذا كانت λ تصف إمكانية المادة للموصلية الحرارية فإن معامل الانتشار الحراري a يعد خاصة عطالة الجسم الحرارية طالما أن سرعة تغير درجة الحرارة مع

الزمن تتناسب طرداً مع a. عملية التبريد أو التسخين لجسمين لهما الشروط نفسها ستكون أسرع للجسم الذي له قيمة أكبر لـ a.

فعندما تلامس اليد الإطار الخشبي للنافذة وزجاجها فإننا نشعر بأن الزجاج أبرد علما بأن درجة حرارة كليهما واحدة، ويفسر هذا بكون قيمة a للزجاج أكبر بمقدار 4.5 مرة من قيمة a للخشب مما يجعل الطرح الحراري من اليد إلى الزجاج أكبر بكثير من الطرح الحراري من اليد للخشب.

من أجل حقل درجات الحرارة أحادي البعد في النظام المستقر أي عندما لا يتغير حقل درجات الحرارة مع الزمن $\left(\frac{\partial t}{\partial \tau}=0\right)$ فإن معادلة التوصيل الحراري (14-11) تأخذ الشكل:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}=0 \qquad (12\text{-}14)$$

نعود الآن إلى المعادلة (14-10) والتي تصف الحالة العامة لانتقال الحرارة في الفراغ. إن الحل العام لهذه المعادلة (تكامل هذه المعادلة) هو عدد لا نهائي من الحلول يشمل حلول المسائل العملية كافة. لاختيار الحل الموافق لمسألة محددة لا بد من الاستفادة من الشروط التي تميز هذه المسألة عن غيرها والتي تحمل تسمية شروط الحل الوحيد.

إن جملة المعطيات المؤلفة من المعادلة التفاضلية وشروط الحل الوحيد لمسألة ما تعطي وصفا رياضيا كاملاً لتلك المسألة. وتتألف شروط الحل الوحيد من شروط هندسية (تميز أبعاد الجسم و شكله) وشروط زمنية (بدائية) تبين توزع درجات الحرارة في الجسم في لحظة ما (ولتكن اللحظة $\tau=0$) وشروط فيزيائية تبين خواص الجسم والوسط (a, ρ, c وغيرها) وشروط حدية تبين التأثير المتبادل بين سطح الجسم والوسط المحيط.

والشروط الحدية يمكن أن تعطى بثلاث طرائق:

١- شروط حدية من النوع الأول: تعطى فيها قيم درجات الحرارة على سطح الجسم ومن أجل أية لحظة زمنية.

٢- شروط حدية من النوع الثاني: تعطى كثافة التيار الحراري q في كل نقطة من سطح الجسم ولأجل أية لحظة زمنية.

٣- شروط حدية من النوع الثالث: فيها تعطى درجة حرارة الوسط المحيط وقانون تبادل الحرارة بين سطح الجسم والوسط.

لندرس التوصيل الحراري للأجسام ذات الأشكال البسيطة والتي لها حقل درجات حرارة أحادي البعد ولمثل هذه الأجسام ينسب جدار مستو لا نهائي وجدار أسطواني.

14-3: انتقال الحرارة عبر جدار مستو

14-3-1: جدار وحيد الطبقة

بفرض لدينا جدار مستو متجانس وحيد الطبقة سماكته δ صغيرة مقارنة مع طوله وعرضه. معلوم له الخواص الفيزيوحرارية $(\lambda = const.)$، وكذلك معلوم درجتي الحرارة على سطحيه t_{w1} و t_{w2} وبشرط $t_{w1} > t_{w2}$، الشكل(14-6). لنقم بتحديد طبيعة توزع درجة الحرارة خلال سماكة الجدار وكمية الحرارة Q_τ العابرة للجدار ذي المساحة A خلال الفترة الزمنية τ. (في الشكل ينطبق محور العينات «الممثل لدرجات حرارة الجدار» على السطح الخارجي للجدار بينما يمثل محور السينات سماكة الجدار المدروس δ).

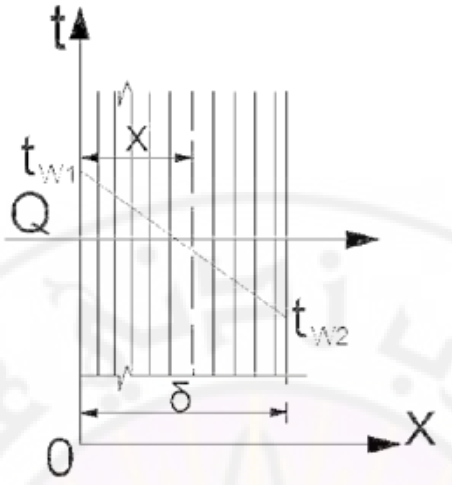
من أجل هذا الهدف نعتمد على معادلة التوصيل الحراري لحالة النظام المستقر $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$، (المعادلة 14-12) التي بمكاملتها واستخدام الشروط الحدية من النوع الأول وهي:

$$\begin{aligned} x = 0 &\Rightarrow t = t_{w1} \\ x = \delta &\Rightarrow t = t_{w2} \end{aligned} \qquad (13\text{-}14)$$

يمكن أن نحصل على توزع درجة الحرارة على سماكة الجدار:

المكاملة الأولى: $$\frac{\partial t}{\partial x} = c_1$$

المكاملة الثانية: $$t = c_1 x + c_2 \qquad (14\text{-}14)$$



الشكل (14-6): انتقال الحرارة بالتوصيل عبر جدار مستو وحيد الطبقة

تتحدد قيمة الثابتين c_1, c_2 في العلاقة الأخيرة باستخدام الشروط الحدية:

$$x = 0 \Rightarrow t_{w1} = c_2$$

$$x = \delta \rightarrow t_{w2} = t_{w1} + c_1 \delta \rightarrow c_1 = -\frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}$$

باستبدال قيمتي الثابتين c_1, c_2 في المعادلة (14-14) نحصل على قانون توزع درجة الحرارة على سماكة الجدار :

$$t = t_{w1} - \left(\frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}\right) x \qquad (15\text{-}14)$$

كما نلاحظ فإن هذا القانون الذي يربط درجة الحرارة بالعمق على محور x له طبيعة خطية، وهذا ما يبينه الشكل (14-6) بالخط الواصل بين النقطتين ذات درجتي الحرارة t_1 و t_2 والذي ندعوه بمنحني درجة الحرارة.

باستخدام قانون فوريه (14-5) نحصل على شدة التيار الحراري باتجاه المحور x والمار عبر واحدة مساحة سطح الجدار خلال واحدة الزمن:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}$$

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda}} \qquad (16\text{-}14)$$

حيث t_{w1} درجة حرارة السطح الساخن من الجدار .

t_{w2} درجة حرارة السطح البارد من الجدار .

$t_{w1}-t_{w2}$ ضاغط درجة الحرارة.

λ معامل التوصيل الحراري لمادة المصنوع منها الجدار .

$\frac{\delta}{\lambda}$ المقاومة الحرارية للجدار ونرمز لها بـ R وتقدر بـ $[m\,K/W]$.

وبالتالي نكتب العلاقة (14-16) بالشكل:

$$q=\frac{t_{w1}-t_{w2}}{R} \qquad (17\text{-}14)$$

أي أن شدة التيار الحراري تتناسب طردا مع ضاغط درجة الحرارة $t_{w1}-t_{w2}$ وعكسا مع المقاومة الحرارية R .

تحسب كمية الحرارة الكلية المنتقلة عبر الجدار ذي المساحة A خلال فاصل زمني τ عند كثافة تيار حراري q بالعلاقة:

$$Q=q\tau A=\frac{t_{w1}-t_{w2}}{R}A\tau \qquad (18\text{-}14)$$

ينتشر في الحسابات العملية حساب التدفق الحراري (كمية الحرارة في واحدة الزمن) عندها فإن المعادلة (14-18) تأخذ الشكل التالي:

$$q=\frac{t_{w1}-t_{w2}}{R}A=\frac{t_{w1}-t_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda}}A \qquad (19\text{-}14)$$

وعندها يمكن تحديد درجة الحرارة على سطحي الجدار بالعلاقتين:

$$t_{w1}=t_{w2}+q\frac{\delta}{\lambda} \qquad (20\text{-}14)$$

$$t_{w2}=t_{w1}-q\frac{\delta}{\lambda} \qquad (21\text{-}14)$$

وفي الحالة العامة درجة الحرارة في أي مقطع x من الجدار :

$$t_x=t_{w1}-q\frac{x}{\delta} \qquad (22\text{-}14)$$

14-3-2: جدار مستو متعدد الطبقات

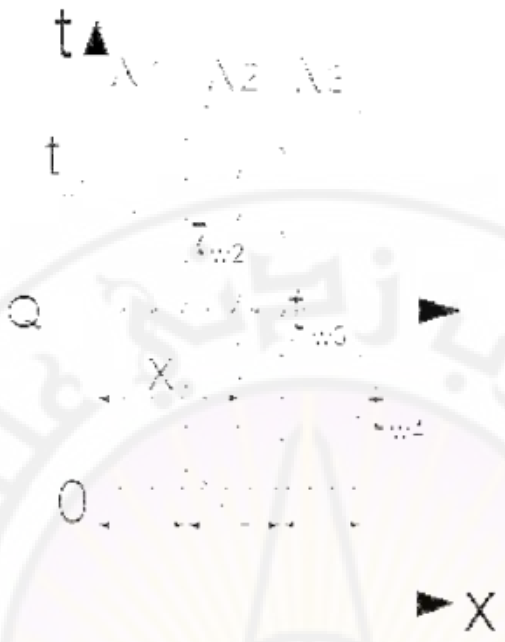
غالبا ما تواجهنا في الواقع جدران مستوية مؤلفة من عدة طبقات متلاصقة بإحكام بعضها مع بعض (كما هو الحال في جدران الأبنية وعلى اختلاف التركيبات الداخلة في تشييدها سواء أكانت جدراناً داخلية أو خارجية معزولة أو غير معزولة وذلك من أجل دراسة أحمال التدفئة أو التكييف أو التبريد المطلوب دراستها ولهذه الغاية يجب معرفة المقاومة الحرارية لهذه الجدران أو السقوف أو الأرضيات المركبة). في مثل هذه الحالات فإن المقاومة الحرارية بالتوصيل للجدران المؤلفة من طبقات مختلفة لن يكون واحداً بل متغيراً بحسب مادة الطبقات الداخلة في تركيبة الجدار (أو السقف أو الأرض) وسماكتها.

من أجل تحديد المقاومة الحرارية بالتوصيل للجدران المركبة (أو السقف أو الأرض)، وقيمة التدفق الحراري الذي يعبر في واحدة الزمن هذا الجدار (أو السقف أو الأرض)، سوف ندرس آلية انتقال الحرارة عبر جدار مؤلف من ثلاث طبقات سماكاتها على التوالي: $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ أما معاملات توصيلها الحراري فهي $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ على التوالي. درجتا حرارة السطحين الخارجيين معلومتان وثابتتان وتتحقق فيها المتراجحة $t_{w1} > t_{w4}$ كما هو مبين بالشكل (14-7). وهذا يعني أن الشروط الحدية المعطاة هي من النوع الأول. بما أنه عند حقل درجات حرارة مستقر التيار الحراري Q الذي يمر عبر جدار مؤلف من عدة طبقات هو نفسه التيار الذي يمر عبر كل طبقة منه فإنه يمكن استخدام المعادلة (14-19) تطبيقاً لكل طبقة:

للطبقة الأولى: $$Q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}} A$$

للطبقة الثانية: $$Q = \frac{t_{w2} - t_{w3}}{\frac{\delta_2}{\lambda_2}} A$$

للطبقة الثالثة: $$Q = \frac{t_{w3} - t_{w4}}{\frac{\delta_3}{\lambda_3}} A$$



الشكل (14-7): انتقال الحرارة بالتوصيل عبر جدار مستو متعدد الطبقات

يتحدد ضاغط درجة الحرارة عبر كل طبقة بالمعادلات التالية:

$$t_{w1} - t_{w2} = \frac{Q\,\delta_1}{A\,\lambda_1}$$

$$t_{w2} - t_{w3} = \frac{Q\,\delta_2}{A\,\lambda_2}$$

$$t_{w3} - t_{w4} = \frac{Q\,\delta_3}{A\,\lambda_3}$$

بجمع الأطراف اليمنى واليسرى للمعادلات السابقة نحصل على:

$$t_{w1} - t_{w4} = \frac{Q}{A}\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}\right)$$

ومنه فإن التدفق الحراري الذي يمر عبر الجدار المركب:

$$Q = \frac{(t_{w1} - t_{w4})A}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} \qquad (23\text{-}14)$$

أما إذا كان لدينا جدار مؤلف من n طبقة عندها يحسب التدفق الحراري من العلاقة:

$$Q = \frac{(t_{w1} - t_{w,n+1})A}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \qquad (24\text{-}14)$$

حيث يمثل المقام المقاومة الحرارية الإجمالية للجدار متعدد الطبقات.

أما كثافة التيار الحراري (التدفق الحراري النوعي):

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{(t_{w1} - t_{w,n+1})}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \qquad (25\text{-}14)$$

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w4}}{R_1 + R_2 + R_3} \qquad (26\text{-}14)$$

إن التمثيل البياني لتغير درجة الحرارة وفق مقطع الجدار المستوي المؤلف من عدة طبقات يمثله الخط المنكسر المبين بالشكل (14-5)، وكما نلاحظ فإن ميلان كل قطعة منه (الموافق لطبقة ما) مختلف عن القطعة الأخرى (الموافق لطبقة أخرى)، يمكن تعليل ذلك أنه لجميع الطبقات $q = -\lambda \frac{dt}{dx} = const.$. لهذا فإن الطبقة التي لها معامل توصيل حراري أقل، يكون تدرجها الحراري أكبر وبالتالي ميلان أكبر لمنحني تغير درجة الحرارة.

تتحدد درجات الحرارة على سطوح التماس بين الطبقات وفق المعادلة:

$$t_{wq_{n+1}} = t_{w1} - q \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} \qquad (27\text{-}14)$$

من أجل مقارنة التوصيل الحراري لجدار مركب وآخر مؤلف من طبقة واحدة تم إدخال معامل التوصيل الحراري المكافئ λ_{eq} للجدران المركبة وهو يساوي معامل التوصيل الحراري لجدار متجانس سماكته Δ تساوي مجموع سماكات الطبقات الداخلة في تركيب الجدار $\sum \delta_i$ ، أما المقاومة الحرارية لكلا الجدارين (المركب ووحيد الطبقة) فهي نفسها لكليهما:

$$\lambda_{eq} = \frac{\sum \delta_i}{\sum R_i} \qquad (28\text{-}14)$$

واضح من العلاقة الأخيرة أن معامل التوصيل الحراري المكافئ يتعلق بكل من المقاومة الحرارية للطبقات المستقلة وبسماكات تلك الطبقات.

افترضنا عند دراستنا التوصيل الحراري للجدران المركبة من عدة طبقات أن التماس بين الطبقات مثالي (الإحكام ممتاز) ولولا ذلك لكان هناك مقاومة حرارية تنشأ عن عدم الإحكام المثالي فيما بين الطبقات. ندعو هذه المقاومة بالمقاومة الحرارية التماسية. تتعلق هذه المقاومة بخشونة سطوح الطبقات المتلامسة – الضغط المعرض له أحد السطحين على الآخر – خواص الوسط الذي يملأ الشق (غاز كان أو سائل) مع الأخذ بعين الاعتبار درجة الحرارة في منطقة التماس.

آلية انتقال الحرارة في منطقة التماس معقدة جداً، فعملية انتقال الحرارة في مناطق التماس غير المحكمة تتم في الأجزاء الصلبة بالتوصيل، وفي الشقوق المملوءة بالغاز أو السائل عن طريق الحمل والإشعاع. إذا أهملنا انتقال الحرارة بالإشعاع بين السطحين المفصولين بطبقة غازية، فإن المقاومة الحرارية في منطقة التماس تساوي إلى مجموع المقاومتين الحراريتين مقاومة التماس R_φ ومقاومة الطبقة الغازية R_g أي $R_k = R_\varphi + R_g$.

لهذا يجب الأخذ بعين الاعتبار وجود هذه المقاومة وما ينتج عنها من قفزات بدرجة الحرارة في منطقة التماس (ارتفاع المقاومة الحرارية للتيار الحراري في مكان التماس بين الطبقتين مرتبط بانخفاض معامل التوصيل الحراري للطبقة الغازية مقارنة مع الجسم الصلب).

مثال 14-1

يتألف جدار موقد مستو من طبقتين: الطبقة الأولى من الآجر المقاوم للحرارة سماكتها $\delta_1 = 500\,mm$ ومعامل توصيلها الحراري $\lambda_1 = 1.16 W/mK$ والطبقة الثانية من آجر البناء سماكتها $\delta_2 = 250\,mm$ ومعامل توصيلها الحراري $\lambda_2 = 0.58 W/mK$.

حدد كثافة التيار الحراري q عند التوصيل الحراري في النظام المستقر ودرجة الحرارة على حدود التماس بين الطبقتين. علما بأن درجة حرارة السطح الداخلي للجدار $t_{w1} = 1,260°C$ ودرجة حرارة السطح الخارجي $t_{w3} = 108°C$.

الحل

السماكة الكلية: $\Delta = \delta_1 + \delta_2 = 0.5 + 0.25 = 0.75\,m$

المقاومة الحرارية الكلية:

$$R = R_1 + R_2 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0.5}{1.16} + \frac{0.25}{0.58} = 0.862\,m^2K/W$$

معامل التوصيل الحراري المكافئ:

$$\lambda_{eq} = \frac{\Delta}{R} = \frac{0.75}{0.862} = 0.87\,W/mK$$

$$q = \frac{\lambda_{eq}}{\Delta}(t_{w1} - t_{w3}) = \frac{0.87}{0.75}(1,260 - 108) = 1,336\,W/m^2$$

وعندها فإن درجة الحرارة على الحد الفاصل:

$$t_{w2} = t_{w1} - q\,R_1 = 1,260 - 1,336 \times 0.431 = 684°C$$

مثال 14-2:

حدد التدفق الحراري الذي يعبر جدارا بيتونيا لبناء سماكته $\delta = 400\,mm$ وارتفاعه $4,000\,mm$ وطوله $5,000\,mm$ إذا علمت أن درجة حرارة السطح الداخلي للجدار $t_{w1} = 20°C$ أما درجة حرارة سطحه الخارجي فهي $t_{w2} = 0°C$. معامل التوصيل الحراري للبيتون $\lambda = 1\,W/mK$.

الحل:

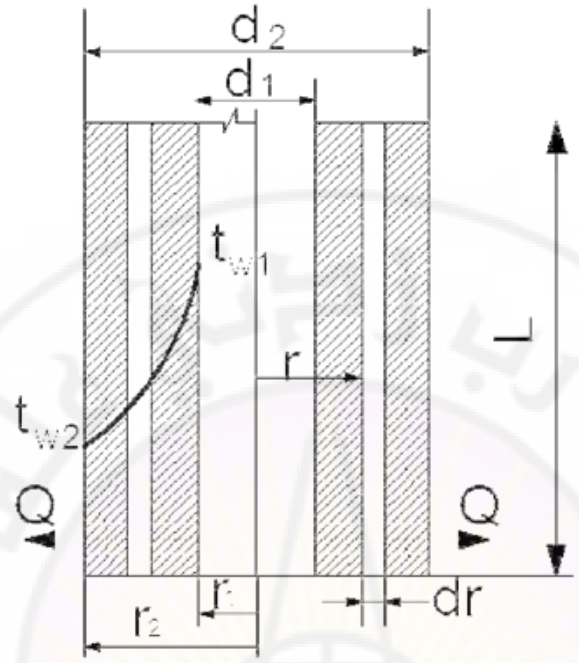
$$Q = \frac{A(t_{w1} - t_{w2})}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{4 \times 5 \times (20 - 0)}{\frac{0.4}{1}} = 1,000\,W$$

14-4: انتقال الحرارة عبر جدار أسطواني

14-4-1: جدار أسطواني وحيد الطبقة

في أغلب المبادلات الحرارية المنتشرة في محطات الطاقة (مكثفات-محمصات) أو في آلات ومحطات التبريد (مبخرات- مكثفات-مبادلات حرارية استرجاعية) أو في محركات الاحتراق الداخلي (رديترات السيارات) وفي أغلب فروع الصناعة المختلفة، يجري انتقال الحرارة عبر جدران الأنابيب الدائرية، إذا مر الوسط الساخن داخل الأنابيب فإن التدفق الحراري يكون موجها من السطح الداخلي للجدران الأسطوانية إلى السطح الخارجي (كما هو الحال عند مرور أبخرة وسيط التبريد الساخنة في أنابيب المكثف، أو عند مرور بخار الماء الساخن ضمن أنابيب المكثف لمحطة الطاقة)، أما إذا كان الوسط الساخن ينساب على السطح الخارجي للأنابيب، فإن التدفق الحراري يكون موجها من السطح الخارجي لجدران الأنابيب إلى السطح الداخلي لها (كما هو الحال عند انسياب المياه الساخنة (12°C) القادمة من وحدة معالجة الهواء، والمستخدمة من أجل تبريد الهواء المرسل إلى المكان المكيف، على السطح الخارجي لأنابيب مبخر آلة التبريد التي يمر بداخلها وسيط التبريد الفريون). لمثل هذه الحالات يتوجب علينا دراسة آلية انتقال الحرارة بالتوصيل المستقر عبر جدار أسطواني (أنبوب) متجانس وحيد الطبقة طوله أكبر بكثير من قطره لهذا فإن درجة حرارة الجدار تتغير فقط في الاتجاه القطري (يمكن إهمال التسرب من نهاية الأنبوب). الإيزوترمات في جدار الأنبوب لها شكل أسطوانات متمركزة مع محور الأنبوب وحقل درجات الحرارة سيكون أحادي البعد $t = f(r)$، درجتا الحرارة على السطحين الداخلي والخارجي للجدار هما على التوالي t_{w1}, t_{w2} وتبقيان ثابتتين (شروط حدية من النوع الأول) عند $t_{w1} > t_{w2}$، الشكل (14-8).

يتجه تيار التدفق بالاتجاه القطري نحو السطح الخارجي للأنبوب. سنفرض أن معامل التوصيل الحراري لمادة جدار الأنبوب يبقى ثابتا في مجال درجات الحرارة المدروس فيه، والمطلوب إيجاد طبيعة توزع درجة الحرارة في الجدار الأسطواني والتدفق الحراري عبره.



الشكل (14-8): انتقال الحرارة بالتوصيل عبر جدار أسطواني وحيد الطبقة

لمسألة التوصيل الحراري أحادي البعد لجدار أسطواني خال من المنابع الحرارية الداخلية فإن المعادلة التفاضلية (14-10) تكتب بالإحداثيات الاسطوانية على الشكل التالي:

$$\frac{d^2t}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dt}{dr}=0 \qquad (29\text{-}14)$$

بإدخال متحول جديد:

$$u=\frac{dt}{dr} \qquad (29'\text{-}14)$$

نكتب:

$$\frac{du}{dr}+\frac{u}{r}=0 \qquad (30\text{-}14)$$

بعد فصل المتحولات والمكاملة نحصل على:

$$\ln u+\ln r=\ln c_1 \qquad (31\text{-}14)$$

بأخذ اللوغاريتم المضاد لطرفي العلاقة الأخيرة والانتقال إلى المتحول الأساسي نجد بعد المكاملة:

$$t = c_1 \ln r + c_2 \qquad (32\text{-}14)$$

وبالتالي العلاقة $t = f(r)$ تحمل شكلاً لوغاريتمياً. لتحديد قيم الثوابت الداخلة في العلاقة (32-14) نستخدم الشروط الحدية وهي:

$$r = r_1 \Rightarrow t = t_{w1}$$
$$r = r_2 \Rightarrow t = t_{w2}$$

بإدخال المعلومات السابقة في العلاقة (32-14) نحصل على:

$$c_1 = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \quad , \quad c_2 = t_{w1} - (t_{w1} - t_{w2}) \frac{\ln r_1}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \qquad (33\text{-}14)$$

بإدخال قيمة الثوابت التي حصلنا عليها في المعادلة (32-14) نحصل على معادلة حقل درجات الحرارة في الجدران الأسطوانية:

$$t = t_{w1} - \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \ln \frac{d}{d_1} \qquad (34\text{-}14)$$

أي أن توزع درجة الحرارة في جدار أسطواني يخضع لقانون لوغاريتمي، الشكل (8-14) حيث d_1, d_2 القطران الداخلي والخارجي للأنبوب الأسطواني،

dقطر متحول يتغير بين d_1 و d_2.

يمكن تحديد التيار الحراري عبر سطح إيزوترمي بنصف قطر r انطلاقاً من قانون فوريه:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr} 2\pi r l \qquad (35\text{-}14)$$

بمساعدة المعادلة (34-14) نحصل على قيمة تدرج درجة الحرارة:

$$grad(t) = \frac{dt}{dr} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \frac{2}{d} \qquad (36\text{-}14)$$

بتعويض المعادلة الأخيرة في (14-35) نحصل:

$$Q = \frac{\pi l (t_{w1} - t_{w2})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} \qquad (37\text{-}14)$$

أما إذا نسبنا التدفق (التيار) الحراري إلى واحدة طول الجدار الأسطواني نحصل على التدفق الحراري النوعي الخطي q_l $[W/m]$:

$$q_l = \frac{\pi (t_{w1} - t_{w2})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} \qquad (38\text{-}14)$$

تحمل القيمة $\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}$ تسمية المقاومة الحرارية الداخلية للجدار الأسطواني.

تختلف كثافة التيار الحراري عبر السطح الخارجي لأنبوب عن كثافته عبر السطح الداخلي، ويعود السبب في ذلك إلى أن مساحة السطح الخارجي للأنبوب أكبر من مساحة السطح الداخلي وهذا يعني أن كثافة التيار الحراري منسوبا للسطح الخارجي أصغر مما هو عليه في حال كان منسوبا للسطح الداخلي وبالتالي يمكن أن نحسب التدفق الحراري (المعادلة 14-37) منسوبا إلى واحدة مساحة السطح الداخلي فنحصل على التدفق الحراري النوعي q_1 $[W/m^2]$:

$$q_1 = \frac{Q}{\pi d_1 l} = \frac{2\lambda (t_{w1} - t_{w2})}{d_1 \ln \frac{d_2}{d_1}} \qquad (38\text{-}14\text{-أ})$$

كما يمكن أن يحسب التدفق الحراري النوعي على أساس واحدة مساحة السطح الخارجي ويرمز له بـ q_2:

$$q_2 = \frac{Q}{\pi d_2 l} = \frac{2\lambda (t_{w1} - t_{w2})}{d_2 \ln \frac{d_2}{d_1}} \qquad (38\text{-}14\text{-ب})$$

14-4-2: جدار أسطواني متعدد الطبقات

نلجأ أحياناً من أجل تخفيض الضياعات الحرارية من الجمل الترموديناميكية (على سبيل المثال أنابيب شبكة التدفئة المنزلية بالماء الساخن أو شبكة أنابيب التدفئة بالبخار

في المصانع، أو في محطات الطاقة لنقل البخار، أو الأنابيب الواصلة بين عناصر آلة التبريد الضاغطية البخارية الخ...) إلى تغطيتها بطبقة من العازل الحراري كالصوف الصخري مثلا.

كما أنه يتشكل نتيجة الاستثمار على السطوح الداخلية للأنابيب طبقات تعيق آلية التبادل الحراري (مثلاً تشكل طبقة من الكلس على السطح الداخلي لأنابيب مكثف آلة التبريد الضاغطية البخارية، أو لأنابيب مكثف محطات الطاقة البخارية التي يمر الماء بداخلها في كلا الحالتين).

يجب عند دراسة انتقال الحرارة لمثل هذه الحالات وغيرها أن نأخذ بعين الاعتبار وجود عدة طبقات ومن أجل هذا سندرس انتقال الحرارة عبر جدار أسطواني مؤلف من ثلاث طبقات الشكل (14-9)، القطر الداخلي للجدار الأسطواني d_1 والخارجي d_4، معامل التوصيل الحراري لمواد الطبقات هو على التوالي $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ودرجة حرارة السطح الداخلي للجدار الأسطواني t_{w1} والخارجي t_{w4}. وكما في حالة الجدار المستوي متعدد الطبقات فإن التدفق الحراري عبر الجدار هو نفسه التيار الحراري عبر كل طبقة من طبقاته. بكتابة علاقات التدفق الحراري لكل طبقة من طبقاته انطلاقاً من العلاقة (14-37) الخاصة بالجدار الأسطواني وحيد الطبقة نحصل على:

$$Q = \frac{2\pi\lambda_1 l}{\ln\frac{d_2}{d_1}}(t_{w1} - t_{w2}) \Rightarrow t_{w1} - t_{w2} = \frac{Q}{2\pi\lambda_1 l}\ln\frac{d_2}{d_1} \qquad (39\text{-}14)$$

$$Q = \frac{2\pi\lambda_2 l}{\ln\frac{d_3}{d_2}}(t_{w2} - t_{w3}) \Rightarrow t_{w2} - t_{w3} = \frac{Q}{2\pi\lambda_2 l}\ln\frac{d_3}{d_2} \qquad (40\text{-}14)$$

$$Q = \frac{2\pi\lambda_3 l}{\ln\frac{d_4}{d_3}}(t_{w3} - t_{w4}) \Rightarrow t_{w3} - t_{w4} = \frac{Q}{2\pi\lambda_3 l}\ln\frac{d_4}{d_3} \qquad (41\text{-}14)$$

بجمع الأطراف اليمنى واليسرى من العلاقات السابقة نحصل على:

$$t_{w1} - t_{w4} = \frac{Q}{2\pi l}\left(\frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3}\ln\frac{d_4}{d_3}\right)$$



الشكل (14-9): انتقال الحرارة بالتوصيل عبر جدار أسطواني متعدد الطبقات

وبالتالي فالتدفق الحراري الذي يعبر الطبقات الثلاثة هو :

$$Q = \frac{2\pi l\left(t_{w1} - t_{w4}\right)}{\frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3}\ln\frac{d_4}{d_3}}$$

يمكن أن نكتب العلاقة الأخيرة بشكل معمم على النحو التالي:

$$Q = \frac{2\pi l\left(t_{w1} - t_{w,n+1}\right)}{\sum_{i=1}^{i=n}\frac{1}{\lambda_i}\ln\frac{d_{i+1}}{d_i}} \qquad (40\text{-}14)$$

وبحسب الشكل (14-9) تكون درجات الحرارة على سطوح التماس بين الطبقات بحسب العلاقة السابقة:

$$t_{w2} = t_{w1} - \frac{Q}{2\pi l}\frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1}$$

$$t_{w3} = t_{w2} - \frac{Q}{2\pi l}\frac{1}{\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2}$$

أما درجة الحرارة عند حدود الفصل بين الطبقات فتحددها المعادلة التالية:

$$t_{w,i+1} = t_{w1} - \frac{1}{2\pi l} Q \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \qquad (41\text{-}14)$$

ملاحظة:

في الحالات التي يكون فيها الأنبوب رقيق الجدران أي $\frac{d_2}{d_1} < 2$ يكون تأثير تقوس الأنبوب على قيمة التدفق الحراري ضعيفاً وعندها (وبخطأ لا يزيد على 4%) يمكن استخدام علاقة الجدار المستوي (14-19) لحساب التوصيل الحراري في الأنابيب. في هذه الحالة تحدد مساحة سطح الأنبوب بدلالة قطره الوسطي d_m:

$$A_m = \pi d_m l = \pi \frac{d_1 + d_2}{2} l$$

وتحسب سماكة الجدار من العلاقة:

$$\delta = \frac{d_2 - d_1}{2}$$

وتتخذ علاقة التدفق الحراري عبر جزء الأنبوب الذي طوله l بالشكل التالي:

$$Q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda}} A = \pi l \lambda \frac{d_1 + d_2}{d_2 - d_1} (t_{w1} - t_{w2}) \qquad (42\text{-}14)$$

حيث d_1 القطر الداخلي للأنبوب،

d_2 القطر الخارجي للأنبوب.

مثال 14-3

تغطى ماسورة بخار فولاذية $\frac{d_2}{d_1} = \frac{160\,mm}{120\,mm}$ معامل توصيلها الحراري $\lambda_1 = 0.58 W/mK$ بطبقتي عزل الأولى من الإسبستوس سماكتها $\delta_2 = 60\,mm$ ومعامل توصيلها الحراري $\lambda_2 = 0.105 W/mK$، والثانية من اللباد سماكتها $\delta_3 = 20\,mm$ ومعامل توصيلها الحراري $\lambda_3 = 0.046 W/mK$، درجة حرارة السطح الداخلي للماسورة $t_1 = 409°C$ أما درجة حرارة السطح الخارجي للعازل $t_{w4} = 50°C$. والمطلوب حدد التسربات الحرارية لـ $1m$ من ماسورة البخار ودرجة الحرارة الأعظمية لطبقة العازل الخارجية.

الحل

بحسب شروط المسألة فإن:

$$d_1 = 0.12\,m$$
$$d_2 = 0.16\,m$$
$$d_3 = d_2 + 2\delta_2 = 0.16 + 0.12 = 0.28\,m$$
$$d_4 = d_3 + 2\delta_3 = 0.28 + 0.04 = 0.32\,m$$

لحساب التدفق الحراري نستخدم العلاقة (14-40) مع الأخذ في الحسبان أنه توجد لدينا طبقتا عزل عندها نكتب:

$$Q = 2\pi l \frac{t_{w1} - t_{w4}}{\frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3}\ln\frac{d_4}{d_3}} = 269\,W$$

من أجل طبقة العازل الخارجية وعند النظام المستقر فإنه يمكننا أن نكتب:

$$Q = 2\pi l \lambda_3 \frac{t_{w3} - t_{w4}}{\ln\frac{d_4}{d_3}} \Rightarrow t_{w3} = t_{w4} + \frac{Q\ln\frac{d_4}{d_3}}{2\pi\lambda_3 l}$$

$$t_{w3} = 50 + \frac{269 \times 0.13}{2 \times 3.14 \times 1 \times 0.046} = 171^{\circ}C$$

Damascus University

مسائل غير محلولة

1-14

يصنع خزان تبريدي مملوء بمحلول ملحي تبريدي إما من الفولاذ الكربوني ($\lambda = 45.5 W/mK$)، أو من الفولاذ المقاوم للصدأ ($\lambda = 17.5 W/mK$). في كلتا الحالتين سماكة جدار الخزان واحدة ($\delta = 6 mm$). معلوم بأن شدة التدفق الحراري من الهواء المحيط إلى الخزان $525 W/m^2$، قارن بين قيمتي فرق درجتي حرارة السطحين الداخلي والخارجي للحالتين السابقتين.

الجواب: عند استعمال الفولاذ الكربوني $\Delta t = 0.07°C$

عند استعمال الفولاذ المقاوم للصدأ $\Delta t = 0.18°C$

2-14

احسب شدة التدفق الحراري عبر جدار مستو متجانس سماكته أقل بكثير من عرضه وارتفاعه، علماً بأن الجدار مصنوع من:

أ- الفولاذ ($\lambda = 40 W/mK$)،

ب- الإسمنت ($\lambda = 0.11 W/mK$)

ت- الآجر الدياتومي ($\lambda = 0.11 W/mK$)

لجميع الحالات السابقة اعتبر سماكة الجدار $\delta = 50 mm$، درجة حرارة سطحي الجدار $t_{w1} = 100°C, t_{w2} = 90°C$.

الجواب: للجدار الفولاذي $q = 8,000 W/m^2$

للجدار الإسمنتي $q = 220 W/m^2$

للجدار الآجري $q = 22 W/m^2$

3-14

شدة التدفق الحراري عبر جدار مستو سماكته $\delta = 50 mm$ تساوي $q = 70 W/m^2$ حدد فرق درجتي الحرارة على سطحي الجدار وكذلك القيمة العددية لتدرج درجة الحرارة للجدار، إذا كان الجدار مصنوعاً من :

أ- النحاس الأصفر ($\lambda = 70 W/mK$)،

ب- الآجر الأحمر $(\lambda = 0.7 W/mK)$،

ت- الفلين $(\lambda = 0.07 W/mK)$

الجواب: لحالة النحاس الأصفر $\Delta t = 0.05°C, |grad(t)| = 1 \deg/m$

لحالة الآجر الأحمر $\Delta t = 5°C, |grad(t)| = 100 \deg/m$

لحالة الفلين $\Delta t = 50°C, |grad(t)| = 1{,}000 \deg/m$

4-14

بغية تحديد معامل التوصيل الحراري لمادة عازلة بالطرائق التجريبية (طريقة الصفائح) نمرر بهذه المادة التي تملك شكل القرص قطره $D = 150 mm$ وسماكته $\delta = 12 mm$ تياراً حرارياً مقداره $Q = 3.44 W$، درجة الحرارة على السطح الساخن للقرص $74°C$، أما درجة الحرارة على السطح البارد فهي $6°C$. احسب معامل التوصيل الحراري لهذه المادة.

الجواب: $\lambda = 0.034 W/mK$

5-14

حدد معامل التوصيل الحراري لمادة جدار إذا علمت أن شدة التدفق الحراري عبر هذا الجدار $q = 145 W/m^2$، سماكة الجدار $\delta = 40 mm$ وفرق درجتي الحرارة على سطحيه $\Delta t = 20°C$.

الجواب: $\lambda = 0.29 W/mK$

6-14

لدينا مجفف جدرانه مصنوعة من طبقة من الآجر الأحمر سماكتها $\delta_1 = 250 mm$ وطبقة من اللباد الإنشائي، درجة الحرارة على السطح الخارجي للآجر الأحمر $t_{w1} = 110°C$، بينما درجة الحرارة على السطح الخارجي لطبقة اللباد $t_{w3} = 25°C$. معامل التوصيل الحراري لكل من الآجر الأحمر $(\lambda_1 = 0.7 W/mK)$ واللباد الإنشائي $(\lambda_2 = 0.0465 W/mK)$. احسب درجة الحرارة على سطح التماس بين الطبقتين وسماكة طبقة اللباد بافتراض الضياعات الحرارية من خلال $1 m^2$ من جدران الحجرة لا تزيد على $q = 110 W/m^2$.

الجواب: $t_{w2} = 70.7°C, \delta_2 = 19\,mm$

7-14

يُصنع محمص بخار من أنابيب فولاذية متحملة للحرارة $\frac{d_2}{d_1} = \frac{42\,mm}{32\,mm}$ معامل التوصيل الحراري لهذا الفولاذ $(\lambda = 14 W/mK)$. فإذا علمت أن درجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب $t_{w2} = 580°C$ والداخلي $t_{w1} = 450°C$، والمطلوب حدد كثافة التيار الحراري لواحدة الطول لهذا المحمص.

الجواب: $q_l = -42{,}100 W/m$

8-14

يعزل أنبوب فولاذي قطراه $\frac{d_1}{d_2} = \frac{108\,mm}{118\,mm}$ ومعامل التوصيل الحراري له $(\lambda_1 = 50 W/mK)$ بثلاث طبقات عازلة، الشكل (14-10):



الشكل (14-10): تابع للمسألة (14-8)

سماكة العازل الأول $\delta_1 = 25\,mm$ ومعامل توصيله الحراري $(\lambda_2 = 0.038 W/mK)$. سماكة العازل الثاني $\delta_2 = 35\,mm$ ومعامل توصيله الحراري $(\lambda_3 = 0.052 W/mK)$، أما العازل الثالث فسماكته $\delta_3 = 4\,mm$ ومعامل توصيله الحراري $(\lambda_4 = 0.116 W/mK)$.

درجة الحرارة على السطح الداخلي للأنبوب $t_{w1} = 218°C$، وعلى السطح الخارجي لطبقة العزل الثانية $t_{w4} = 76°C$، حدد درجات الحرارة المجهولة على حدود الطبقات.

الجواب: $t_{w2} = 217°C, t_{w3} = 134.67°C, t_{w5} = 73.54°C$

14 – 9:

حدد قيمة معامل التوصيل الحراري لجدار معدني يمر عبره تدفق حراري قدره $Q = 7,550W$ ومساحة سطحه $2.5m^2$ علماً بأن درجة الحرارة تنخفض بمقدار $0.2°C$ وذلك على عمق ضمن الجدار قدره $\delta = 1mm$.

الجواب: $(\lambda = 151W/mK)$

10-14

جدار آجري سماكته $250mm$ ودرجة الحرارة على أحد سطحيه $-30°C$ وعلى سطحه الآخر $20°C$. أوجد كثافة التيار الحراري عبر الجدار والعمق الذي ستكون فيه درجة الحرارة $0°C$ علماً بأن معامل التوصيل الحراري للآجر السليكوني هو $(0.82W/mK)$.

الجواب: $q = 164W/m^2, x = 0.15m$

11-14

تتوضع طبقة جليد سماكتها $300mm$ فوق نهر وهذه الطبقة مغطاة بالثلج بسماكة $200mm$ فإذا كانت درجة حرارة السطح الخارجي للثلج $-15°C$ وعلى سطح طبقة الجليد من جهة الماء $0°C$ أوجد كثافة التيار الحراري عبر هاتين الطبقتين علماً بأن $(\lambda = 0.46W/mK)$ للثلج وللجليد $(\lambda = 2.22W/mK)$.

الجواب: $q = 26.3W/mK$

12-14

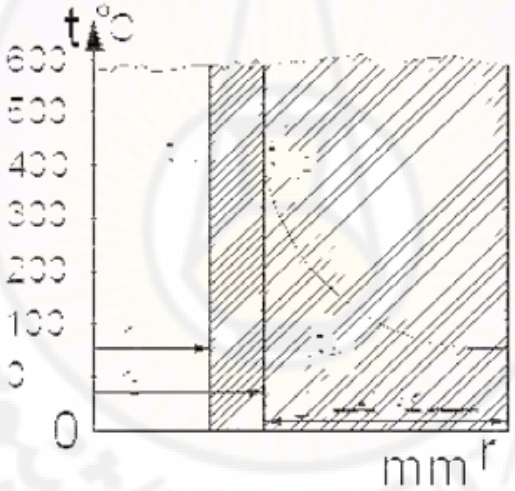
يغطى أنبوب فولاذي قطراه $\frac{d_2}{d_1} = \frac{45mm}{40mm}$ من الخارج والداخل بطبقة من الطلاء الزجاجي (ورنيش) بسماكة $0.5mm$ لكل منهما $(\lambda = 1.05W/mK)$. بكم مرة ستزداد

مقاومة الجدار الحرارية بعد طلائه بالورنيش؟ أجري الحساب بالصيغة المستخدمة لحالة الجدران المستوية.

الجواب: ستزداد بمقدار 18 مرة

13-14

خط أنابيب بخار قطراه $\begin{matrix} d_1 = 150 \\ d_2 = 160 \end{matrix} mm$ ، مغطى بطبقة عازلة حراريا سماكتها $\delta_{iz} = 100\,mm$. معامل التوصيل الحراري لمعدن الأنابيب $(\lambda_1 = 50\,W/mK)$ وللعازل $(\lambda_2 = 0{,}08\,W/mK)$. درجة حرارة السطح الداخلي للأنابيب $t_{w1} = 400°C$ وعلى السطح الخارجي للعازل $t_{w3} = 50°C$ ، الشكل (14-11). أوجد الضياعات الحرارية لمتر واحد من خط البخار ودرجة الحرارة على سطح التماس بين خط أنبوب البخار والعازل.

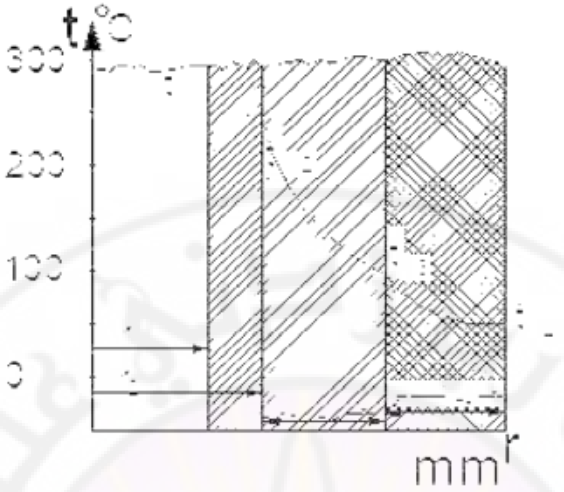


الشكل (14-11): تابع للمسألة (14-13)

الجواب: $q_l = 216\,W/m, t_{w2} = 400°C$

14-14

خط أنابيب فولاذي قطراه $\begin{matrix} d_1 = 100 \\ d_2 = 110 \end{matrix} mm$ معامل التوصيل الحراري لمعدن الأنبوب $(\lambda = 50\,W/mK)$، مغطى بطبقتي عزل لهما السماكة نفسها $\delta_2 = \delta_3 = 50\,mm$ ، درجة حرارة السطح الداخلي للأنبوب $t_{w1} = 250°C$ ودرجة حرارة السطح الخارجي للعازل $t_{w4} = 50°C$ ، الشكل (14-12).



الشكل (14-12): تابع للمسألة (14-14)

حدد الضياعات الحرارية عبر العازل لمتر طولي من خط الأنابيب ودرجة الحرارة عند سطح التماس بين طبقتي العزل إذا علمت أن طبقة العازل الأولى الموضوعة على سطح الأنبوب مصنوعة من مادة معامل توصيلها الحراري $(\lambda_2 = 0.06W/mK)$ أما الطبقة الثانية فهي مصنوعة من مادة ذات معامل توصيل حراري $(\lambda_3 = 0.12W/mK)$

.

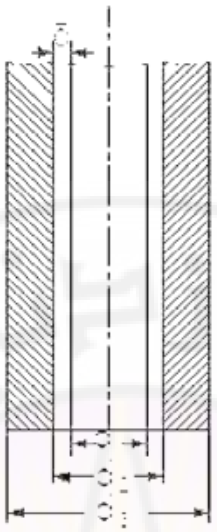
الجواب: $q_l = 89.5W/m, t_{w3} = 97°C$

15-14

أنبوب بيتوني لغازات الدخان، الشكل (14-13)، قطره الداخلي $d_2 = 800mm$ والخارجي فهو $d_3 = 1.300mm$، مبطن من الداخل بمادة مقاومة للحرارة.

حدد سماكة هذه البطانة δ ودرجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب t_{w3}. وذلك باعتبار أن الضياعات الحرارية لمتر واحد من الأنبوب لا تتجاوز $2.000W/m$ أما درجة حرارة السطح الداخلي للأنبوب البيتوني فلا تزيد عن $t_{w2} = 200°C$. درجة حرارة السطح الداخلي للمادة المقاومة للحرارة $t_{w1} = 425°C$، معامل توصيلها الحراري $(\lambda_1 = 0.5W/mK)$ ومعامل التوصيل الحراري للبيتون $(\lambda_2 = 1.1W/mK)$.

الجواب: $\delta = 120mm, t_{w3} = 59°C$



الشكل (14-13): تابع للمسألة (14-15)

16-14

حدد لشروط المسألة (14-15) نفسها سماكة البطانة δ إذا علمت أنها مصنوعة من الآجر الناري، أجري الحساب على اعتبار أن علاقة معامل التوصيل الحراري بدرجة الحرارة هي من الشكل: $(\lambda = 0.84 + 0.0006t\, W/mK)$.

الجواب: $\delta = 206\, mm$

17-14

يغطى أنبوب بطبقتين عازلتين من مادتين مختلفتين لهما السماكة نفسها. معامل التوصيل الحراري للطبقة الأولى المتوضعة على الأنبوب أكبر بثلاث مرات من معامل التوصيل للطبقة الثانية. القطر الخارجي للأنبوب غير المعزول أكبر بمقدار 6 مرات من سماكة طبقة عزل واحدة. أوجد بأي اتجاه وبكم مرة تتغير الضياعات الحرارية لـ $1\, m$ طول من الأنبوب إذا أجرينا عملية تبديل بأماكن طبقتي العزل.

الجواب: تنخفض الضياعات الحرارية بمقدار 1.135 مرة

18-14

يغطى أنبوب قطراه $\frac{d_2}{d_1} = \frac{60\, mm}{54\, mm}$ وطوله $5\, m$ بطبقة ألواح فلينية سماكتها $30\, mm$ وتتوضع فوقها طبقة من الـ covlet سماكتها $40\, mm$. درجة حرارة جدار

الأنبوب من الخارج $-110°C$ بينما درجة الحرارة السطح الخارجي للـ covlet $10°C$ والمطلوب: تحديد ضياع البرودة عبر الجدار. كم سيكون ضياع البرودة إذا بدلنا أماكن الطبقتين مع بقاء درجات الحرارة نفسها وسماكتي الطبقتين نفسيهما مع العلم أن $(\lambda = 0.047 W/mK)$ لألواح الفلين و $(\lambda = 0.09 W/mK)$ للـ covlet.

الجواب: $Q = 16 MJ, Q = 19 MJ$

19-14

يلزم عزل ماسورة بخار فولاذية قطراها $\frac{d_2}{d_1} = \frac{150 mm}{140 mm}$ ودرجة حرارة السطح الداخلي $300°C$ بطبقتي عزل بحيث لا تزيد درجة حرارة السطح الخارجي للعازل على $50°C$. ومن أجل اختيار العازل نقترح:

طبقة A سماكتها $20 mm$ ومعامل توصيلها الحراري $(\lambda = 0.037 W/mK)$.

طبقة B سماكتها $40 mm$ ومعامل توصيلها الحراري $(\lambda = 0.14 W/mK)$.

كيف يتوجب ترتيب وضع هاتين الطبقتين على ماسورة البخار الفولاذية كي نحصل على ضياع حرارة أصغري.

الجواب: في البداية نضع الطبقة A ومن ثم الطبقة B وعندها $q_l = 176.4 W/m$.

الفصل الخامس عشر

عمليات التوصيل الحراري غير المستقرة

- معلومات ومفاهيم عامة
- تبريد صفيحة مستوية غير منتهية
- تحديد كمية الحرارة المطروحة من صفيحة أثناء عملية تبريدها
- مسائل غير محلولة

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الخامس عشر

عمليات التوصيل الحراري غير المستقرة

15-1: معلومات ومفاهيم عامة

سندرس في هذا الفصل انتقال الحرارة بالتوصيل لجملة ما، عند غياب المنابع الحرارية الداخلية فيها من جهة وعلى اعتبار أن درجة حرارة الجملة تتغير تبعاً للمكان والزمان في آن معاً وعندها فإن عمليات التوصيل الحراري الجارية ضمن هذه الشروط ندعوها بعمليات التوصيل الحراري غير المستقرة. وهذه العمليات الأكثر انتشاراً في الصناعة والطبيعة على حد سواء، حيث يمكن أن نلاحظ مثل هذه العمليات عند تسخين (تبريد) المسبوكات وفي إنتاج الزجاج وتحميص الآجر، وكذلك عند إقلاع وتوقف أجهزة المبادلات الحرارية المختلفة، ونجد هذه العمليات في الطبيعة عند التسخين النهاري والتبريد الليلي لسطح الأرض.

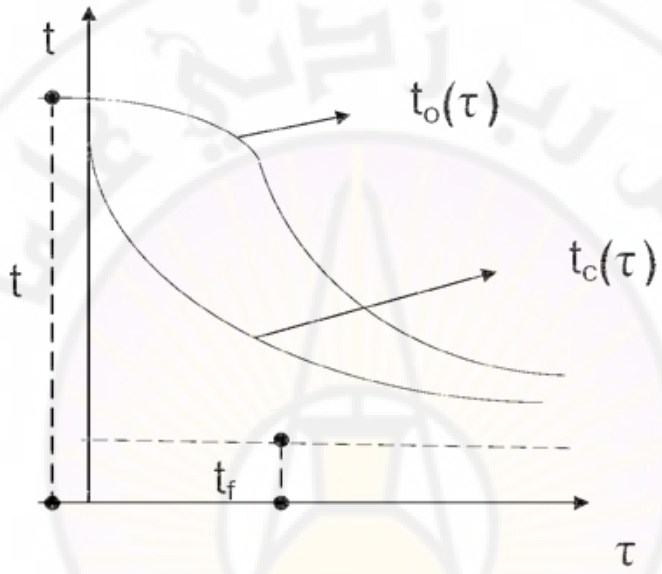
إن ظهور الأجهزة الطائرة التي تفوق سرعتها سرعة الصوت (الطائرات والصواريخ) والمحركات الصاروخية جذب اهتمام العلماء إلى دراسة عمليات التوصيل الحراري في النظام غير المستقر وخاصة فيما يتعلق بحساب العزل الحراري لرأس الصاروخ أو لجدران حجر الاحتراق التي من المناسب أن نجريه اعتمادا على النظام غير المستقر وذلك لأن الأجهزة الطيارة ومحركاتها في بعض الأحيان تعمل لفترات زمنية قصيرة جدا لهذا فإن العمليات الحرارية في عناصر تصميمها لا تصل إلى مرحلة العمل في النظام المستقر.

يمكن تقسيم عمليات التوصيل الحراري غير المستقرة إلى مجموعتين رئيسيتين:

١- العمليات المرتبطة بإحداث خلل بالتوازن الحراري للجملة وعندها فإن الجمل وبعد فترة زمنية تعود إلى حالة توازن جديدة وهذه العمليات ندعوها بالعمليات الانتقالية وهي الأكثر انتشارا في الواقع والتي سندرسها بالتفصيل لاحقا (ميزة هذه العمليات هي بأن الجملة خلالها تنتقل من حالة نظام مستقر معين إلى نظام مستقر جديد)

٢- العمليات المرتبطة بالتغير الدوري لحالة الجملة الحرارية وفيها يعاد توزع درجة الحرارة نفسه بعد فواصل زمنية محددة وندعو هذه العمليات بعمليات التوصيل الحراري الدورية.

يبين الشكل (15-1) طبيعة تغير درجة حرارة الجسم في نقاط محددة تبعا للزمن.



الشكل (15-1): طبيعة تغير درجة حرارة الجسم في نقاط محددة تبعا للزمن

لفهم المعنى الفيزيائي لكل مجموعة دعونا نأخذ المثال التالي (عن المجموعة الأولى):

ليكن لدينا جسم يملك في الحالة البدائية وفي جميع نقاطه درجة حرارة واحدة $t_{//}$ نضعه في وسط درجة حرارته تبقى ثابتة $t_{/}$ شريطة أن يكون $t_{/} < t_{//}$ (العملية غير المستقرة في هذه الحالة مرتبطة بتبريد الجسم) فبمرور الزمن سوف تسعى درجة حرارة الجسم لتصل إلى درجة حرارة هذا الوسط (الهواء على سبيل المثال) وبمعنى آخر سيسعى الجسم إلى حالة توازن أخرى. ولكن يجب الإشارة هنا إلى أن نقاط مختلفة من الجسم تتبرد بسرعات مختلفة حيث أن النقاط الداخلية منه تكون سرعة تأثرها في البداية "ضعيفاً" حتى إنه يمكن أن نعد أن درجة حرارتها تقريبا ثابتة ومساوية للقيمة $t_{//} = t_{..}$ مع مرور الزمن بينما النقاط السطحية على العكس فهي تتأثر مباشرة حيث تبدأ درجة حرارتها

بالانخفاض مع مرور الزمن وكلما زاد زمن التبريد أصبح الفرق بين درجة حرارة الجسم والوسط أقل وبعد فاصل زمني كبير فإن هذا الفرق يساوي للصفر وعندها فإن درجة حرارة كل من الجسم والوسط تكون متساوية.

في هذا الفصل سوف ندرس عمليات التوصيل الحراري غير المستقرة الانتقالية التي بنتيجتها يسعى الجسم إلى حالة توازن حراري أخرى. والهدف من هذه الدراسة هو تسليط الضوء على الخواص الفيزيائية العامة لتلك العمليات، والتعرف على طرق حل مسائل التوصيل الحراري غير المستقرة، والحصول على العلاقات الرياضية من أجل الحسابات العلمية لمثل هذه العمليات. ومهما اختلفت عمليات التوصيل الحراري غير المستقرة فإن القيمة المجهولة المطلوب تحديدها هي إيجاد توزع درجات الحرارة كتابع للمكان والزمان أي تابع من الشكل $t = f(x, y, z, \tau)$ ويمكن أن نحصل على مثل هذا التابع لو قمنا بمكاملة المعادلة التفاضلية للتوصيل الحراري وذلك في حالة غياب المنابع الحرارية الداخلية والتي شكلها في الإحداثيات الديكارتية وبمعرفة الشروط الحدية:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) \qquad (1\text{-}15)$$

وهناك بعض مسائل التوصيل الحراري التي يتم انتقال الحرارة فيها باتجاه واحد (كأن يكون x) عندها تتبسط المعادلة التفاضلية (1-15) وتصبح المسألة أحادية البعد وتأخذ المعادلة (1-15) الشكل التالي:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \qquad (\text{أ}\text{-}1\text{-}15)$$

كما أن هناك مسائل يتم فيها انتقال الحرارة باتجاهين (كأن يكون باتجاه x, y) تصبح المسألة عندها ثنائية البعد وتأخذ المعادلة (1-15) الشكل التالي:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right) \qquad (\text{ب}\text{-}1\text{-}15)$$

أما لحالة الأجسام التي لها شكل أسطواني فإنه من المفضل عندئذ الانتقال إلى الإحداثيات الأسطوانية وعندها المعادلة (1-15) تأخذ الشكل:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right) \qquad (ج-1-15)$$

حيث x الإحداثية باتجاه محور الأسطوانة، r الإحداثية باتجاه نصف قطر الأسطوانة.

إن الحصول على التابع $t = f(x, r, z, \tau)$ يتم إما بالطرائق التحليلية المأخوذة من منهاج الرياضيات الفيزيائية والتي ينسب لها طريقة فصل المتحولات وطرق التحويلات التكاملية (تحويلات لابلاس)، وإما باستخدام طرائق تقريبية تعتمد على أسس الحساب العددي وهي طرائق الفروق النهائية أو طريقة الشبكات وكذلك نستخدم أحيانا طريقة التشابه (طريقة التشابه الهيدروديناميكية وطريقة التشابه الكهربائية).

2-15: تبريد صفيحة مستوية غير منتهية

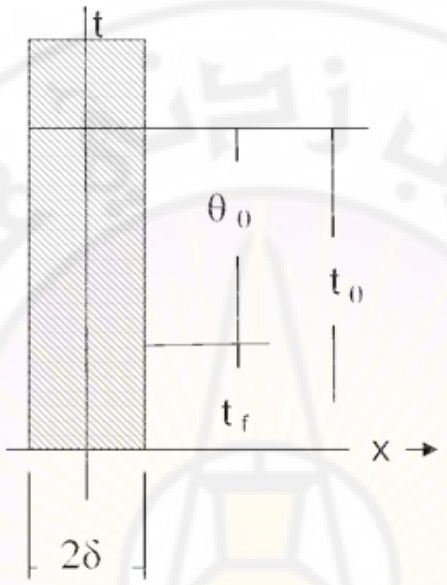
ليكن لدينا صفيحة سماكتها 2δ وبشرط أن سماكتها أصغر بكثير من طولها وعرضها $2\delta << 2L$، $2\delta << 2b$. ضمن هذه الشروط يمكن اعتبار الصفيحة غير منتهية، الشكل (15-2). كما أن تغير درجة الحرارة يتم في اتجاه واحد كأن يكون على سبيل المثال باتجاه المحور x بينما درجة الحرارة لا تتغير في الاتجاهين الآخرين (y, z) أي:

$$\frac{dt}{dz} = \frac{dt}{dy} = 0$$

وعندها فإن المسألة في الفراغ تؤول إلى أحادية البعد.

في اللحظة الزمنية $\tau = 0$ كانت جميع نقاط الصفيحة لها درجة الحرارة $t_0 = t(x, 0)$ حيث تم وضعها في وسط درجة حرارته $t_c < t_0$ علما بأن درجة حرارة هذا الوسط ثابتة خلال عملية التبريد. أضف إلى ذلك بأن عملية التبريد تتم عبر سطحي الصفيحة بالفعالية نفسها عن طريق انتقال الحرارة (بكلام آخر التدفق الحراري عبر السطح يخضع لقانون نيوتن $q = \alpha(t_0 - t_c)$ حيث α هي معامل انتقال الحرارة بالحمل والذي سنأتي إلى شرحه في الفصل السادس عشر) كما أن معامل انتقال الحرارة α معلوم ولا يتغير مع مرور الزمن، كذلك معلوم: المادة المصنوعة منها الصفيحة أي

معلومة جميع الخواص الفيزيوحرارية لها (a, c, λ)، والمطلوب تحديد توزع درجات الحرارة في هذه الصفيحة في أي لحظة زمنية $\tau > 0$. إن الشكل الرياضي للمسألة السابقة يمكن صياغته على النحو التالي:



الشكل (15-2): تبريد صفيحة مستوية غير منتهية

المعادلة التفاضلية للتوصيل الحراري الغير مستقر أحادية البعد وبدون منابع حرارية داخلية هي:

$$\frac{dt}{d\tau} = a\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \qquad (2\text{-}15)$$

حيث x تتغير في المجال $0 \le x \le \delta$ (لأن عملية تبريد الصفيحة تجري بصورة متناظرة عبر سطحيها لذا فمن المريح أن يكون مبدأ الإحداثيات في وسطها وعندها ندرس عملية التبريد في أحد نصفيها).

الشروط البدائية:

$$\left.\begin{array}{l}\tau = 0\\ 0 \le x \le \delta\end{array}\right\} \Rightarrow t = t_0$$

الشروط الحدية:

أ- $$\left.\begin{matrix} x=0 \\ \tau>0 \end{matrix}\right\} \Rightarrow \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=0}=0$$

وذلك لأنه عند التبريد المتناظر للصفيحة فإن درجة الحرارة في وسطها في أية لحظة زمنية سوف تكون أعظمية.

ب- $$\left.\begin{matrix} x=\delta \\ \tau>0 \end{matrix}\right\} \Rightarrow -\lambda\left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=\delta}=\alpha\left(t_w-t_f\right)$$

t_w درجة حرارة سطح الصفيحة.

إن هذه العلاقة كتبناها بالاعتماد على مساواة التيارين الحراريين على سطح الصفيحة وهما: التيار القادم إلى سطح الصفيحة من الطبقات الداخلية عن طريق التوصيل الحراري والتيار المغادر (المطروح) من سطح الصفيحة من جراء انتقال الحرارة بالحمل (الشرط الحدي من النوع الثالث والذي غالبا ما يتوفر في المسائل العملية).

قبل أن نخوض بالحل التحليلي للمسألة السابقة دعونا نجري عملية التبديل التالية للتابع المجهول t بما يسمى بدرجة الحرارة الزائدة $\theta=t-t_f$ حيث t درجة الحرارة المتغيرة في نقطة من الجسم، و t_f درجة حرارة الوسط المحيط (الثابتة). أي أننا بهذا التبديل اعتبرنا أن مبدأ قياس درجات الحرارة ليس $0°C$ وإنما درجة حرارة الوسط المحيط التي هي معلومة في مسألتنا وعندها فإنه يمكن أن نكتب $d\theta=dt$ وبالتالي يمكن أن نكتب المعادلة (15-2) بدلالة θ على الشكل التالي:

$$\frac{d\theta}{d\tau}=a\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} \tag{3-15}$$

أما الشرط البدائي فيصبح عندما:

$$\left.\begin{matrix} \tau=0 \\ 0\le x\le\delta \end{matrix}\right\} \Rightarrow \theta=t_0-t_f=\theta_0 \tag{4-15}$$

والشروط الحدية تصبح:

أ- $$\left.\begin{matrix} x=0 \\ \tau>0 \end{matrix}\right\} \Rightarrow \left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{x=0}=0 \tag{5-15}$$

ب-
$$\left.\begin{matrix} x=\delta \\ \tau>0 \end{matrix}\right\} \Rightarrow \left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{x=\delta} = -\frac{\alpha\,\theta_w}{\lambda} \qquad (6\text{-}15)$$

حيث $\theta_w = t_w - t_f$

إن حل المسألة المطروحة أمامنا (المعادلة التفاضلية (3-15) مع الشروط البدائية والحدية (4-15) وحتى (6-15)) نبحث عنه على أنه جداء تابعين أحدهما تابع للمتحول τ وهو φ والآخر تابع للمتحول x وهو ψ (طريقة فصل المتحولات) أي:

$$\theta(\tau, x) = \varphi(\tau)\psi(x) \qquad (7\text{-}15)$$

بتبديل العلاقة الأخيرة (7-15) في (3-15) نحصل على:

$$\frac{\partial\varphi(\tau)}{\partial\tau}\psi(x) = a\frac{\partial^2\psi(x)}{\partial x^2}\varphi(\tau)$$

أو:

$$\varphi'(\tau)\psi(x) = a\psi''(x)\varphi(\tau)$$

وبفصل التحولات في العلاقة الأخيرة نحصل على:

$$\frac{\varphi'(\tau)}{\varphi(\tau)} = a\frac{\psi''(x)}{\psi(x)} \qquad (8\text{-}15)$$

كما نلاحظ من المعادلة (8-15) بأن الطرف اليساري تابع لـ τ فقط بينما الطرف اليميني تابع لـ x فقط. إذا أخذنا لحظات زمنية مختلفة فإن الطرف اليساري من المعادلة (8-15) سيعطي قيماً مختلفة بينما الطرف اليميني يظل خلال ذلك ثابتاً وهذا يعاكس المساواة في المعادلة (8-15).

الأمر نفسه نلاحظه لو أعطينا قيما مختلفة لـ x فإن الطرف اليميني سيملك قيماً مختلفة بينما الطرف اليساري سيبقى ثابتاً وهذا أيضا يخالف المساواة (8-15). إذا نستطيع القول إن كلا الطرفين لهما قيمة ثابتة واحدة ليس لها علاقة بـ x أو τ ونستطيع كتابة:

$$\frac{1}{a}\frac{\varphi'(\tau)}{\varphi(\tau)} = \frac{\psi''(x)}{\psi(x)} = const. = b$$

إن قيمة b يمكن أن تكون موجبة أو سالبة أو مساوية للصفر، كما أنه يمكن التحقق أنه عند $b \geq 0$ فإن المعادلة:

$$\frac{\psi''(x)}{\psi(x)} = const. = b$$

لها حل واحد هو $\psi = 0$ وهذا الحل لا نعيره في سياق مسألتنا أي اهتمام ولذلك فإن قيمة الثابت b حتما سالبة ونرمز له بـ $b = -k^2$ عندها فإن المعادلة (15-8) تكتب بالشكل:

$$\frac{1}{a}\frac{\varphi'(\tau)}{\varphi(\tau)} = \frac{\psi''(x)}{\psi(x)} = -k^2$$

ومنه:

$$\varphi'(\tau) + a k^2 \varphi(\tau) = 0 \qquad (9\text{-}15)$$

$$\psi''(x) + k^2 \psi(x) = 0 \qquad (10\text{-}15)$$

إذا ونتيجة فصل المتحولات للمعادلة (15-3) حصلنا على معادلتين تفاضليتين عاديتين (15-9) و (15-10) اللتين ببساطة يمكن مكاملتهما.

بمكاملة المعادلة (15-9) نحصل على:

$$\varphi(\tau) = c_1 e^{-ak^2\tau} \qquad (9'\text{-}15)$$

من المعادلة الأخيرة (15-9') نلاحظ أن إشارة الثابت k^2 قد تم اختيارها بصورة صحيحة وذلك لأنه عندما:

$$\tau \to \infty \Rightarrow \varphi(\tau) \to 0$$

وهذا ما يتفق مع المغزى الفيزيائي للمسألة (نحن ندرس عمليات التوصيل الحراري غير المستقرة الانتقالية التي ينتقل فيها الجسم من حالة نظام مستقر إلى نظام مستقر آخر وذلك عندما $\tau \to \infty$ بينما في الحالة المعاكسة، أي عندما تكون الإشارة k^2 هي (+) فإنه عندما $\tau \to \infty$ فإن $\varphi(\tau) \to \infty$ وهذه النتيجة غير منطقية).

بمكاملة المعادلة (15-10) نحصل على:

$$\psi(x) = c_2 \sin(kx) + c_3 \cos(kx) \qquad (10'\text{-}15)$$

بتبديل العلاقتين (15-9') و (15-10') في (15-7) نحصل على:

$$\theta = c_1 e^{-ak^2\tau}\left[c_2 \sin(kx) + c_3 \cos(kx)\right] \qquad (11\text{-}15)$$

كي تكون المعادلة (15-11) حلاً للمسألة الموضوعة (15-3) يجب أن نخضعها للشروط البدائية والحدية بغية تحديد قيم الثوابت الداخلة في (15-11):

في البداية نستخدم الشرط الحدي الثاني:

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{x=0} = c_1 e^{-ak^2\tau} k\left[c_2\cos(kx) - c_3\sin(kx)\right] = 0$$

أو :

$$c_2\cos(0) = c_3\sin(0)$$

ومنه:

$$c_2 = 0$$

فإذا رمزنا للجداء $c_1 c_3 = A$ تصبح المعادلة (11-15) بالشكل:

$$\theta = A e^{-ak^2\tau}\cos(kx) \qquad (12\text{-}15)$$

لنعوض بالشرط الحدي الثالث:

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{x=\delta} = -\frac{\alpha}{\lambda}\theta_{x=\delta}$$

نحصل على:

$$k A e^{-ak^2\tau}\sin(k\delta) = \frac{\alpha}{\lambda} A e^{-ak^2\tau}\cos(k\delta)$$

من هنا وبعد إصلاح بسيط نحصل على:

$$\cot(k\delta) = \frac{k\delta}{\frac{\alpha\delta}{\lambda}} \qquad (13\text{-}15)$$

إن النسبة $\frac{\alpha\delta}{\lambda}$ ندعوها بعدد بيو Bi وإذا رمزنا للقيمة $k\delta$ بالرمز μ نستطيع أن نكتب العلاقة الأخيرة بالشكل:

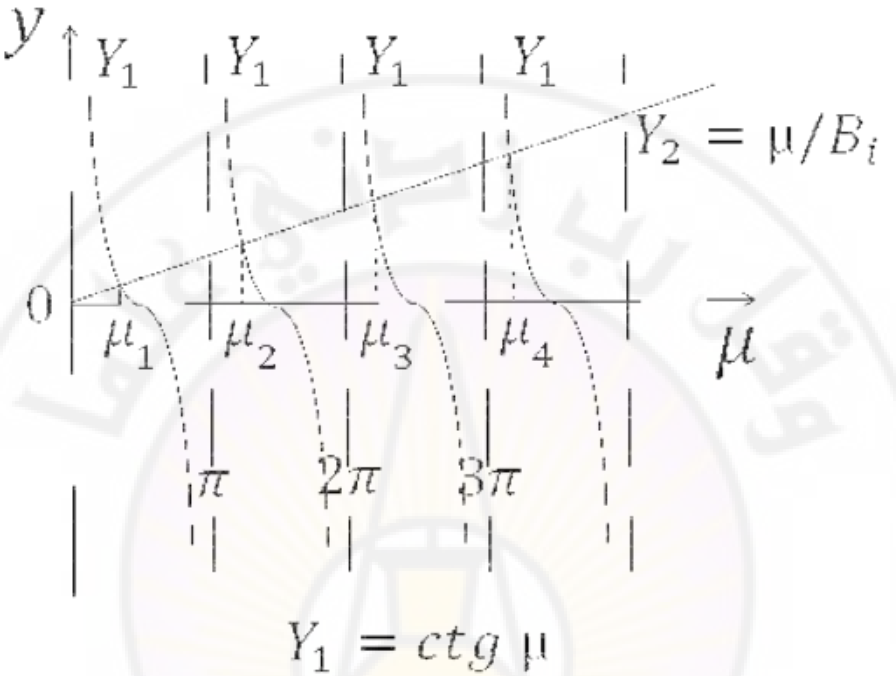
$$\cot(\mu) = \frac{\mu}{Bi} \qquad (14\text{-}15)$$

لحل المعادلة المثلثية السابقة من المريح استخدام الطريقة البيانية من أجل ذلك نرمز للطرف اليساري واليميني من المعادلة (14-15) على التوالي بـ y_1 و y_2 أي:

$y_1 = \cot(\mu)$ معادلة تابعة للقيمة cot وهو تابع دوري.

$y_2 = \frac{\mu}{Bi}$ معادلة مستقيم. نقاط تقاطعه مع y_1 تعطينا جذور المعادلة (14-15) أي قيم μ . يبين الشكل (3-15) الجذور الأربعة الأولى $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ وذلك عند قيمة

محددة لعدد بيو Bi علما بأن كل قيمة تالية لـ μ أكبر من سابقتها أي: $\mu_1 < \mu_2 < \mu_3 < ... < \mu_n$.



الشكل (15-3): حل المعادلة المثلثية (15-14)

إن الجذور الأربعة الأولى للمعادلة (15-14) $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ مدرجة في الجدول (15-1) وذلك من أجل قيم مختلفة لعدد بيو Bi (عدد بيو تتراوح قيمته من 0 وحتى ∞).

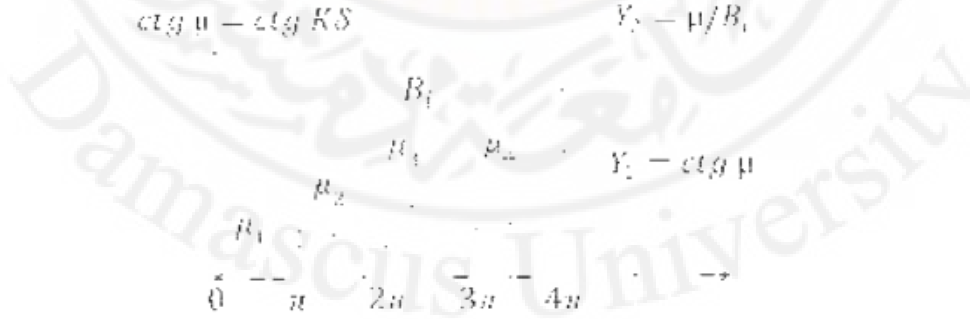
أما الشكل (15-4) فمبين فيه الجذور الأربعة الأولى $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ للمعادلة المثلثية (15-14) وذلك من أجل ثلاث قيم لـ Bi.

كما ذكرنا فإن قيم Bi تتراوح من الصفر وحتى اللانهاية:

- عندما $Bi \to \infty$ فإن $Y_2 = \frac{\mu}{Bi}$ ينطبق على محور السينات وجذور المعادلة (15-14) هي: $\mu_1 = \frac{\pi}{2}$ ، $\mu_2 = \frac{3\pi}{2}$ ، $\mu_3 = \frac{5\pi}{2}$ ، .... ، $\mu_n = \frac{(2n-1)\pi}{2}$.

الجدول (15-1): قيم μ_n من أجل صفيحة

Bi	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	Bi	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
0	0.000	3.1416	6.2832	9.4248	1.0	0.8603	3.4256	6.4373	9.5293
0.001	0.0316	3.1419	6.2833	9.4249	1.5	0.9882	3.5422	6.5097	9.5801
0.002	0.0447	3.1422	6.2835	9.4250	2.0	1.0769	3.6436	6.5783	9.6296
0.004	0.0632	3.1428	6.2838	9.4252	3.0	1.1925	3.8088	6.7040	9.7240
0.006	0.0774	3.1435	6.2841	9.4254	4.0	1.2646	3.9352	6.8140	9.8119
0.008	0.0893	3.1441	6.2846	9.4256	5.0	1.3138	4.0336	6.9096	9.8928
0.01	0.0998	3.1448	6.2848	9.4258	6.0	1.3496	4.1116	6.9924	9.9667
0.02	0.1410	3.1479	6.2864	9.4269	7.0	1.3766	4.1746	7.0640	10.0339
0.04	0.1987	3.1543	6.2895	9.4290	8.0	1.3978	4.2264	7.1263	10.0949
0.06	0.2125	3.1606	6.2927	9.4311	9.0	1.4149	4.2691	7.1806	10.1502
0.08	0.2791	3.1668	6.2959	9.4333	10.0	1.4289	4.3058	7.2281	10.2003
0.1	0.3111	3.1731	6.2991	9.4354	15.0	1.4729	4.4255	7.3959	10.3898
0.2	0.4328	3.2039	6.3148	9.4459	20.0	1.4961	4.4915	7.4954	10.5117
0.3	0.5218	3.2341	6.3305	9.4565	30.0	1.5202	4.5615	7.6057	10.6543
0.4	0.5932	3.2636	6.3461	9.4670	40.0	1.5325	4.5975	7.6647	10.7331
0.5	0.6533	3.2923	6.3616	9.4775	50.0	1.5400	4.6202	7.7012	10.7832
0.6	0.7051	3.3304	6.3770	9.4879	60.0	1.5451	4.6353	7.7259	10.8172
0.7	0.7506	3.3477	6.3923	9.4983	80.0	1.5514	4.6543	7.7573	10.8606
0.8	0.7910	3.3744	6.4074	9.5087	100	1.5552	4.6658	7.7764	10.8871
0.9	0.8247	3.4003	6.4224	9.5190	∞	1.5708	4.7124	7.8540	10.9956



الشكل (15-4): الجذور الأربعة الأولى $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ للمعادلة المثلثية (15-14) وذلك من أجل ثلاث قيم لـ Bi

- عندما $Bi \to 0$ فإن المستقيم $Y_2 = \frac{\mu}{Bi}$ ينطبق على محور العينات وظل الزاوية وميلان المستقيم سيسعى إلى اللانهاية وعندها فإن جذور المعادلة (14-15) هي $\mu_1 = 0, \mu_2 = \pi, \mu_3 = 2\pi, ..., \mu_n = (n-1)\pi$.
- من أجل قيم أخرى لعدد Bi واقعة ضمن المجال $(0 - \infty)$ فإن قيم μ_n لها قيم محددة (انظر الجدول 15-1).

وبالنتيجة فلكل قيمة للجذر μ سوف توافق توزع خاص لدرجة الحرارة:

$$\theta_1 = A_1 \cos\left(\mu_1 \frac{x}{\delta}\right) e^{-\mu_1^2 \frac{a\tau}{\delta^2}}$$

$$\theta_2 = A_2 \cos\left(\mu_2 \frac{x}{\delta}\right) e^{-\mu_2^2 \frac{a\tau}{\delta^2}}$$

$$\theta_n = A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}} \qquad (15\text{-}15)$$

حيث $k = \frac{\mu}{\delta}$.

إذا من أجل كل قيمة لـ Bi في مجال تغيره $0 \le Bi \le \infty$ فإن حل المسألة (15-3) مع الشروط البدائية والحدية سوف نجده من الشكل:

$$\theta = \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}} \qquad (16\text{-}15)$$

تتحدد قيمة الثابت A_n في المعادلة (15-16) من الشروط البدائية. لهذا عندما $\tau > 0$ فإن $\theta = \theta_n$ وذلك عند $-\delta \le x \le \delta$ وعندها فإن المعادلة (15-16) تأخذ الشكل التالي:

$$\theta_0 = \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \qquad (17\text{-}15)$$

بضرب المعادلة (15-17) بالحد:

$$\cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) dx$$

وإجراء المكاملة للمعادلة الناتجة على كامل سماكة الصفيحة (ضمن المجال من $-\delta$ وحتى δ) نحصل:

$$\theta_n \int_{-\delta}^{\delta} \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) dx = A_1 \int_{-\delta}^{\delta} \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \cos\left(\mu_1 \frac{x}{\delta}\right) dx + A_2 \int_{-\delta}^{\delta} \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \cos\left(\mu_2 \frac{x}{\delta}\right) dx + \ldots + A_n \int_{-\delta}^{\delta} \cos^2\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \tag{18-15}$$

إن قيمة التكامل في الطرف اليساري من المعادلة (15-18) يساوي:

$$\int_{-\delta}^{\delta} \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) dx - 2\delta \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} \tag{19-15}$$

جميع التكاملات الداخلة في الطرف اليميني من المعادلة (15-18) ما عدا التكامل الذي يحتوي $\cos^2$ بعد حسابها تساوي للصفر. وبالتالي فإن قيمة التكامل في الطرف اليميني هو:

$$\int_{-\delta}^{\delta} \cos^2\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) dx = \delta\left[1 + \frac{1}{2\mu_n} \sin(2\mu_n)\right] \tag{20-15}$$

بتبديل قيمة التكاملين (15-19) و (15-20) في المعادلة (15-18) نحصل على قيمة A_n:

$$A_n = \theta_n \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \tag{21-15}$$

بتبديل قيمة A_n التي حصلنا عليها (المعادلة 15-21) في المعادلة (15-16):

$$\theta = \theta_n \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) e^{-\mu_n^2 \frac{F_o}{\delta^2}} \tag{22-15}$$

المعادلة (15-22) تسمح لنا بالحصول على قيم درجات الحرارة في أية لحظة زمنية وفي أية نقطة من الصفيحة. يفضل كتابة معادلة حقل درجة الحرارة الأخير (15-22) بشكلها اللابعدي لذلك نقسم طرفيها على θ_n:

$$D_n = \frac{A_n}{\theta_n} = \frac{2\sin\mu_n}{\mu_n + \sin\mu_n \cos\mu_n} \qquad (22'\text{-}15)$$

$\Theta = \frac{\theta}{\theta_0}$: درجة الحرارة اللابعدية،

$X = \frac{x}{\delta}$: الإحداثية المكانية اللابعدية،

$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$: عدد فوريه وهو إحداثية لابعدية للزمن.

عندها فإن المعادلة (15-22) تأخذ الشكل التالي:

$$\Theta = \sum_{i=1}^{\infty} D_n \cos(\mu_n X) e^{-\mu_n^2 Fo} \qquad (23\text{-}15)$$

في هذه المعادلة فإن μ_n عبارة عن الجذور المميزة للمعادلة (15-14) وهي تتعلق فقط بـ Bi . أما المعاملات D_n فهي عبارة عن توابع لـ μ_n وبالتالي توابع لعدد Bi وبالتالي يمكن سلفاً حساب هذه المعاملات وإدراجها في جداول كما هو موضح في الجدول التالي (15-2).

تحليل النتائج الحاصلة:

بما أن μ_n هو بمثابة متشور متزايد $(\mu_1 < \mu_2 < ... < \mu_n)$ فإن القيم العددية لعناصر المتشور (15-23) تتناقص بسرعة مع ازدياد ترتيب العنصر الذي يؤدي إلى ازدياد μ_n ، كما وجد بأنه عند قيم كبيرة لعدد Fo فإن المتشور يتقارب أسرع من حالة قيم Fo الصغيرة.

ودلت الأبحاث الكثيرة التي قام بها العلماء أنه عند قيم $Fo \geq 0.3$ يمكن أن نكتفي بالعنصر الأول من المتشور (15-23) وذلك لتحديد توزع درجات الحرارة في صفيحة أي:

$$\Theta = D_1 \cos(\mu_1 X) e^{-\mu_1^2 Fo} \qquad (24\text{-}15)$$

حيث:
$$D_1 = \frac{2\sin\mu_1}{\mu_1 + \sin\mu_1 \cos\mu_1} = f(Bi)$$

والذي سبق وتم حسابه ووضعه في الجدول (15-2) أو باستخدام المخطط المبين بالشكل (15-5) الذي يبين علاقة $D_1 = f(Bi)$.

الجدول (15-2): قيم الجذور الأربعة للمعادلة (15-22')

Bi	D_1	D_2	D_3	D_4
0.00	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.01	1.0020	-0.0020	0.0005	-0.0002
0.10	1.0159	-0.0197	0.0050	-0.0022
0.50	1.0701	-0.0873	0.0243	-0.0110
1.00	1.1192	-0.1517	0.0466	-0.0217
2.00	1.1784	-0.2367	0.0848	-0.0414
4.00	1.2287	-0.3215	0.1396	-0.0750
10.00	1.2612	-0.3934	0.2104	-0.1309
15.00	1.2677	-0.4084	0.2320	-0.1514
30.00	1.2717	-0.4198	0.2472	-0.1718
50.00	1.2727	-0.4227	0.2517	-0.1779
100.00	1.2731	-0.4239	0.2539	-0.1808

فإذا أردنا معرفة درجة الحرارة عند قيمة محددة لـ $X = \frac{x}{\delta}$ (على محور الصفيحة $X = 0$ ، أو على سطحها $X = 1$) وذلك عند تحقق الشرط $Fo > 0.3$ فإنه ومن المعادلة (15-24) الحد $\cos(\mu_1 X)$ يعتبر تابعا لعدد Bi وبحسب قيمة X نميز :

١- محور الصفيحة:

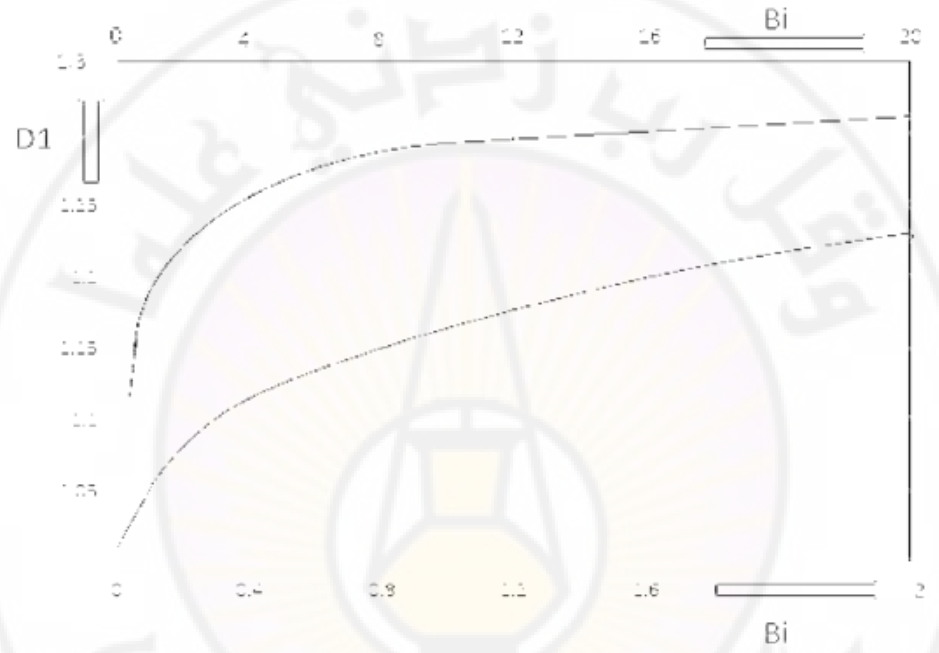
عندها $X = 0$ وبالتالي $\cos(\mu_1 X) = 1$. نرمز للجداء $D_1 \cos(0)$ بالتابع $N(Bi)$ وبالتالي فإن المعادلة (15-24) تأخذ الشكل التالي:

$$\Theta_{X=0} = N(Bi) e^{-\mu_1^2 Fo} \qquad (25\text{-}15)$$

٢- سطح الصفيحة:

عندها $X = 1$ وبالتالي $\cos(\mu_1 X) = \cos\mu_1$. نرمز للجداء $-D_1 \cos\mu_1$ الداخل في المعادلة (15-24) بالتابع $P(Bi)$ وعندها المعادلة (15-24) تأخذ الشكل التالي:

$$\Theta_{X=1} = P(Bi)e^{-\mu_1^2 Fo} \qquad (26\text{-}15)$$



الشكل (15-5): علاقة $D_1 = f(Bi)$

كما هو ملاحظ من المعادلتين (15-25) و (15-26) فإنه عند إحداثية مكانية معلومة فإن درجة الحرارة اللابعدية تعتبر تابعا لبارامترين لابعديين هما Bi و Fo ، أما التابعان الداخلان في المعادلتين (15-25) و (15-26) وهما $N(Bi)$ و $P(Bi)$ فقيمهما مدرجة في الجدول (15-3).

بأخذ لوغاريتم طرفي المعادلة (15-25) نحصل على:

$$\ln\Theta_{X=0} = \ln N(Bi) - \mu_1^2 Fo \qquad (27\text{-}15)$$

الجدول (3-15): المعاملات من أجل حساب تبريد (تسخين) صفائح بسماكة 2δ

Bi	μ_1	μ_1^2	P(Bi)	N(Bi)
0.00	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
0.01	0.0998	0.0100	0.997	1.002
0.02	0.1410	0.0199	0.993	1.003
0.04	0.1987	0.0397	0.987	1.006
0.06	0.2425	0.0778	0.981	1.010
0.08	0.2701	0.0778	0.974	1.013
0.1	0.3111	0.008	0.067	1.016
0.12	0.3397	0.1154	0.967	1.020
0.14	0.3656	0.1337	0.954	1.023
0.16	0.3896	0.1518	0.948	1.026
0.18	0.4119	0.1697	0.942	1.029
0.2	0.4328	0.1874	0.936	1.031
0.22	0.4525	0.2048	0.930	1.034
0.24	0.4712	0.2290	0.924	1.037
0.26	0.4889	0.2390	0.918	1.040
0.28	0.5068	0.2558	0.912	1.042
0.3	0.5218	0.2723	0.906	1.045
0.35	0.5590	0.3125	0.891	1.052
0.4	0.5932	0.3516	0.877	1.058
0.45	0.6240	0.3894	0.863	1.064
0.5	0.6533	0.4264	0.849	1.070
0.55	0.6800	0.462	0.836	1.076
0.6	0.7051	0.497	0.823	1.081
0.7	0.7506	0.564	0.798	1.092
0.8	0.7010	0.626	0.771	1.102
0.9	0.8274	0.684	0.751	1.111
1.00	0.8603	0.740	0.720	1.110
1.20	0.9171	0.841	0.689	1.134
1.40	0.9649	0.931	0.653	1.145
1.60	1.0008	1.010	0.619	1.159
1.80	1.0440	1.090	0.587	1.169

2.00	1.0769	1.100	0.559	1.179
2.2	1.1054	1.222	0.535	1.186
2.4	1.1300	1.277	0.510	1.193
2.6	1.1541	1.332	0.488	1.200
2.8	1.1747	1.380	0.468	1.205
3.0	1.1935	1.420	0.448	1.210
3.5	1.2330	1.52	0.406	1.221
4.0	1.2646	1.59	0.370	1.220
4.5	1.2880	1.66	0.338	1.235
5.0	1.3138	1.73	0.314	1.240
5.5	1.3340	1.78	0.293	1.244
6.0	1.3498	1.82	0.273	1.248
7.0	1.3766	1.90	0.241	1.254
8.0	1.3978	1.95	0.216	1.257
9.0	1.4149	2.00	0.196	1.260
10	1.4289	2.04	0.180	1.262
12	1.4420	2.08	0.152	1.265
14	1.4500	2.12	0.132	1.267
16	1.4700	2.16	0.116	1.268
18	1.4830	2.20	0.104	1.269
20	1.4961	2.24	0.094	1.270
25	1.5070	2.27	0.076	1.271
30	1.5200	2.30	0.065	1.271
35	1.5260	2.33	0.056	1.272
40	1.5325	2.35	0.050	1.272
50	1.5400	2.37	0.040	1.272
60	1.5451	2.39	0.0333	1.273
70	1.5490	2.40	0.0286	1.273
80	1.5514	2.41	0.0250	1.273
90	1.5520	2.41	0.0222	1.273
100	1.5560	2.42	0.02001	1.273
∞	1.5708	2.467	0.0000	1.273

(ونحصل على علاقة مشابهة لو أخذنا لوغاريتم طرفي المعادلة 15-26). نجد من المعادلة (15-27) أنه عند قيمة محددة للإحداثية المكانية وعند معرفة قيمة Bi فإن اللوغاريتم الطبيعي لدرجة الحرارة اللابعدية يتعلق بصورة خطية بالزمن. هذه الميزة تعطينا الفرصة لإيجاد الحل البياني للمعادلتين (15-25) و(15-26) (الشكلان (15-6) و (15-7)).

باستخدام هذين المخططين يمكن:

١- تحديد زمن التبريد (التسخين) $\left(Fo=\frac{a\tau}{\delta^2}\right)$ إلى درجة الحرارة $\Theta_{X=0}$ أو $\Theta_{X=1}$ وذلك عند معرفة شروط انتقال الحرارة على السطحين.

٢- تحديد درجة الحرارة بعد فترة زمنية من بداية التبريد (أو التسخين).

٣- تحديد فعالية التبادل الحراري على سطحي الصفيحة عند معرفة Fo و Θ.

من المعادلة (15-23) نجد أنه في شروط تبريد (تسخين) صفيحة وعند أي لحظة زمنية وبمعرفة الشروط الحدية فإن حقول درجات الحرارة لها شكل منحني متناظر نهايته الحدية العظمى (الدنيا) موجودة على محور الصفيحة $X=0$ ومن أجل كل لحظة زمنية لاحقة (تالية) سوف يكون لها المنحني الخاص بها لتوزع درجة الحرارة ومتناقصا (متزايدا) باتجاه سطحي الصفيحة كما هو مبين على الشكل (15-8). يمكن التحقق من أن المماسات على منحنيات توزع درجات الحرارة في النقاط $X=\pm 1$ (الموافقة على سطحي الصفيحة) في أي لحظة زمنية تمر من نقطتين (A+) و (A-) ندعوهما بالقطبين وهذان القطبان متوضعان على مسافة X_0 + من سطح الصفيحة:

$$X_0=\frac{1}{Bi} \qquad (28\text{-}15)$$

نجد من العلاقة (15-28) أنه كلما ازداد عدد Bi كانت النقطة (A) أقرب إلى سطح الجسم والعكس صحيح وبالتالي فإن عدد Bi في نظام التوصيل الحراري غير المستقر يؤثر تأثيرا كبيرا. لندرس هذا الدور من أجل القيمتين الحديتين لـ Bi:

١) عندما $Bi \to \infty$ (عملياً $Bi > 100$)

من معرفة مادة الصفيحة وأبعادها (λ, δ) ومن تعريف عدد Bi $\left(Bi = \frac{a\delta}{\lambda}\right)$ فإنه عندما $Bi \to \infty$ يوافق هذا الشرط $\frac{a}{\lambda} \to \infty$ الذي يتحقق عند قيم كبيرة لـ a وقيم صغيرة لمعامل التوصيل الحراري لمادة الصفيحة λ. هذا يعني أن المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة من الصفيحة إلى السائل (الوسط المحيط) $\frac{1}{a} \to 0$ وبالتالي فإن درجة حرارة السطح الخارجي للصفيحة ودرجة حرارة السائل خلال كامل فترة عملية التبريد تبقيان متساويتين (الشروط الحدية من النوع الثالث تتحول إلى شروط حدية من النوع الأول) أي أننا نملك شروطاً سيئة لانتقال الحرارة ضمن مادة الصفيحة $\left(a = \frac{\lambda}{\rho c}\right)$ وشروطاً جيدة لانتقال الحرارة من سطح الصفيحة إلى السائل (الوسط المحيط). عندما $Bi \to \infty$ فإن القطب (A) يتوضع على سطح الصفيحة كما هو مبين بالشكل (15-9)، وهذا واضح من العلاقة (15-28):

$$Bi \to \infty \Rightarrow X_n = \frac{1}{Bi} = 0$$

كذلك وجدنا أنه عندما $Bi \to \infty$ فإن:

$$\mu_n = \frac{2n-1}{2}\pi$$

وبالتالي فإن المعامل D_n الداخل في المعادلة (15-23) يساوي:

$$D_n = \frac{2\sin\mu_n}{\mu_n + \sin\mu_n \cos\mu_n} = \frac{4(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi}$$

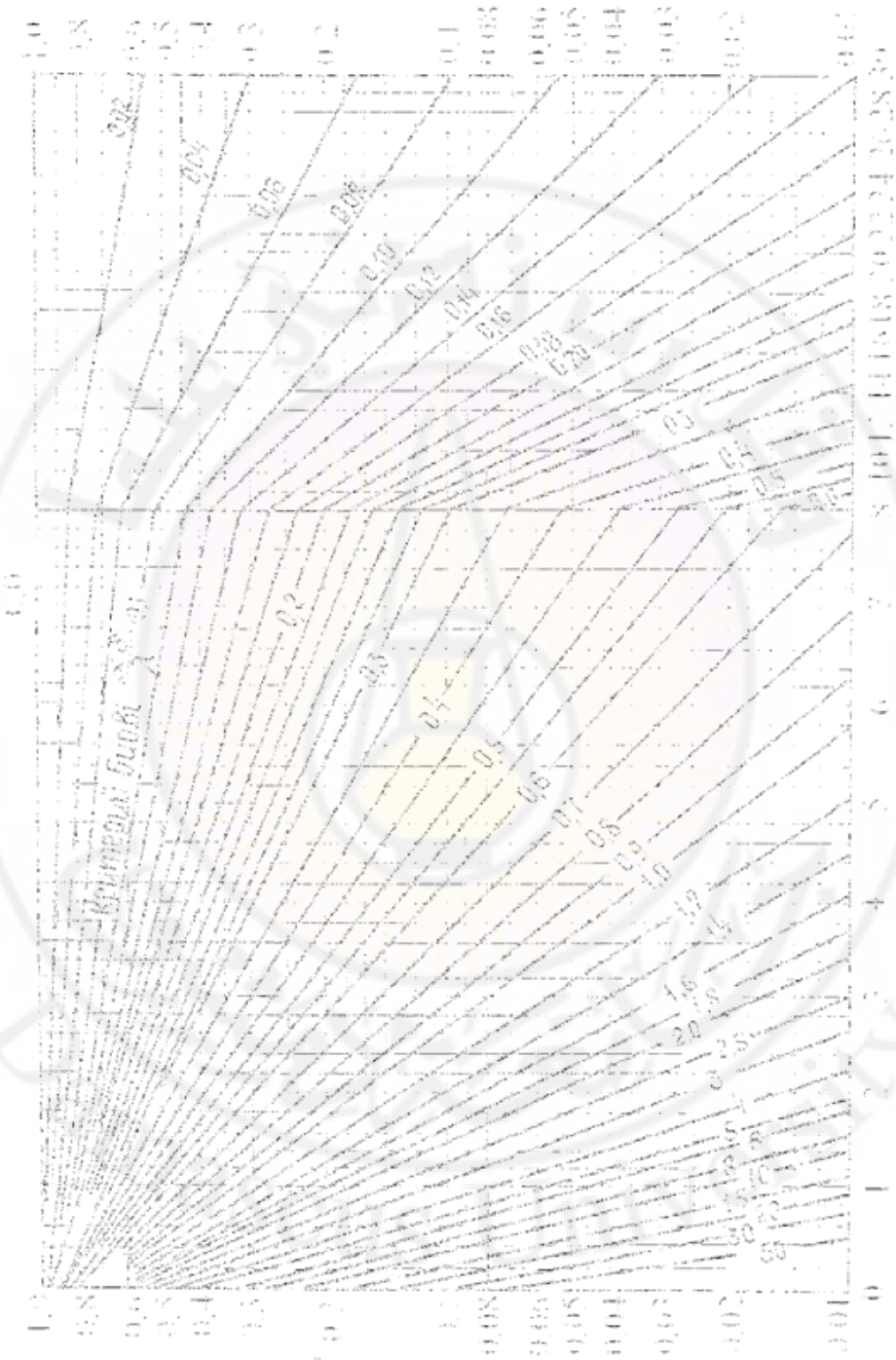
$$n = 1 \rightarrow D_1 = \frac{4}{\pi}$$

$$n = 2 \Rightarrow D_2 = -\frac{4}{3\pi}$$

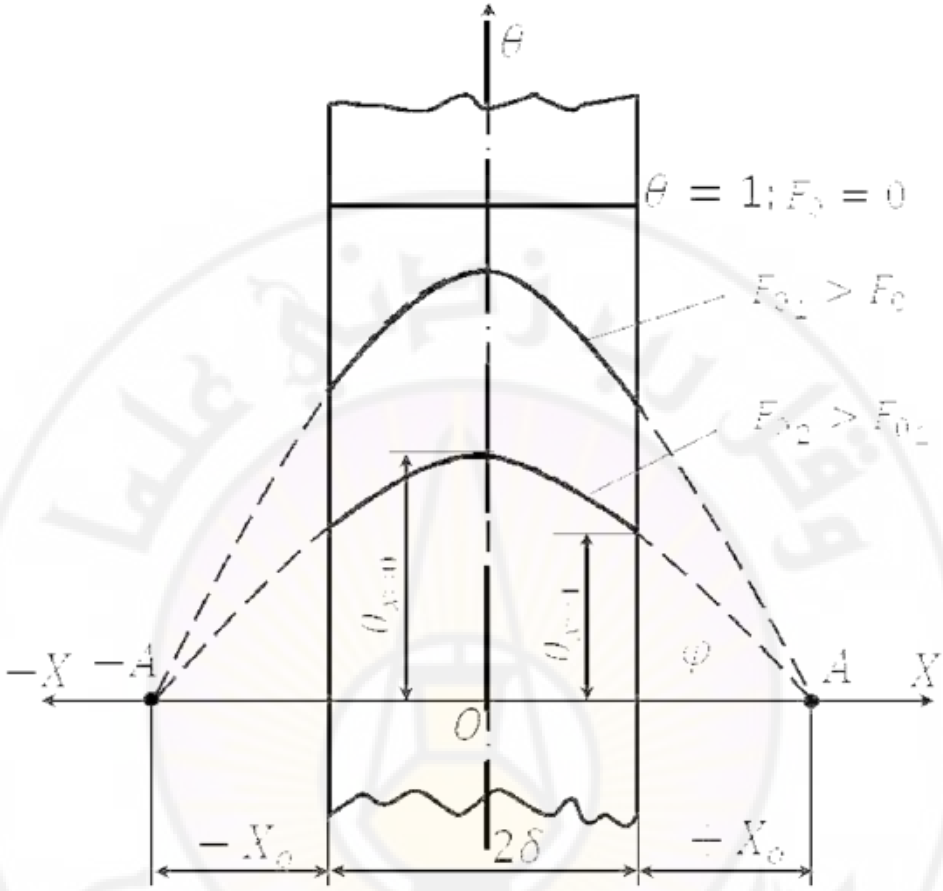
ويأخذ عندها الحل العام الشكل التالي:



الشكل (5-16): $\Theta_{x=0} = f_1(Bi, Fo)$ (محور صفيحة)



الشكل (7-15): $\Theta_{x=1} = f_3(Bi, Fo)$ (سطح صفيحة)



الشكل (15-8): منحنى توزع درجات الحرارة في مقطع صفيحة وفي لحظات زمنية مختلفة

$$\Theta = \frac{4}{\pi}\sum_{n=0}^{n=\infty}\frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)}\cos\left(\frac{2n-1}{2}\pi X\right)e^{-\left(\frac{2n-1}{2}\right)^2\pi^2 Fo} \qquad (29\text{-}15)$$

وتكون درجة الحرارة على محور الصفيحة $(X=0)$:

$$\Theta_{X=0} = \frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{n=\infty}\frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)}e^{-\left(\frac{2n-1}{2}\right)^2\pi^2 Fo} \qquad (30\text{-}15)$$

أما على سطحها $(X=1)$ فتحددها المعادلة $\Theta_{X=1}=1$ وذلك لأن:

$$\cos\left(\frac{2n-1}{2}\pi\right)=0$$

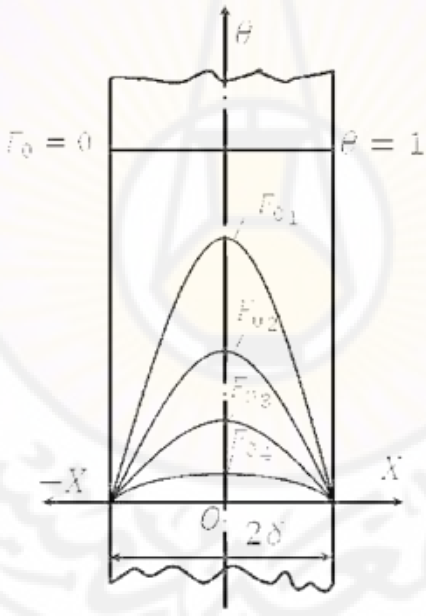
إذا كانت $Bi \to 0$ وتحقق الشرط $Fo > 0.3$ فإن المنشور (15-23) كما ذكرنا سابقا نستطيع كتابة العنصر الأول منه وإهمال الباقي دون أن يتجاوز الخطأ 1% وعندها فإن المعادلة (15-30) تأخذ الشكل التالي:

$$\Theta_{X=0} = \frac{4}{\pi} e^{-\frac{\pi^2}{4} Fo} \tag{31-15}$$

بأخذ لوغاريتم الطرفين لهذه المعادلة والإصلاح نحصل على:

$$Fo = \frac{4}{\pi^2} \ln\left(\frac{4}{\pi} \frac{1}{\Theta_{X=0}}\right) \tag{32-15}$$

بتبديل Fo بـ $\frac{a\tau}{\delta^2}$ في المعادلة (15-32) نكتب:



الشكل (15-9): توزيع درجات الحرارة في صفيحة مستوية عند تبريدها في شروط $Bi \to \infty$ ،

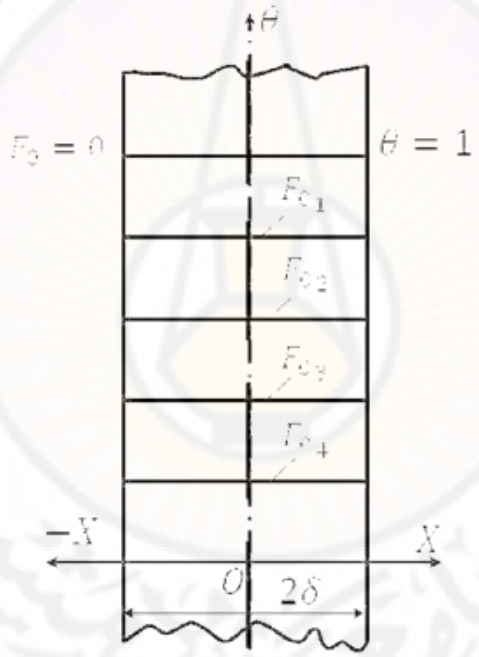
$$Fo_1 < Fo_2 < Fo_3 < Fo_4$$

$$\tau = \left(\frac{2\delta}{\pi}\right)^2 \frac{1}{a} \ln\left(\frac{4}{\pi} \frac{1}{\Theta_{X=0}}\right) \tag{33-15}$$

أي أنه وبدلالة العلاقة الأخيرة يمكننا حساب الزمن اللازم من أجل تسخين وسط صفيحة إلى درجة حرارة محددة.

٢) عندما $Bi \to 0$ (عملياً $Bi < 0.1$)

توافق هذه الحالة عملية تبريد (تسخين) جسم سماكته صغيرة ومعامل توصيل حراري كبير لمادة الجسم وذلك عند قيم صغيرة لـ a (على سبيل المثال عملية تبريد صفيحة معدنية رقيقة في وسط هوائي) وبالتالي مقاومة انتقال الحرارة من سطح الصفيحة $\frac{1}{a}$ كبيرة جدا أي أن مادة الصفيحة $\left(a = \frac{\lambda}{\rho c}\right)$ تنقل الحرارة بصورة جيدة ويمكن التعبير عن ذلك بأن هناك شروط جيدة لانتقال الحرارة ضمن مادة الصفيحة وشروط سيئة لطرحها إلى الوسط المحيط.



الشكل (15-10): توزيع درجات الحرارة في صفيحة مستوية عند تبريدها في شروط $Bi \to 0$ ،
$Fo_1 < Fo_2 < Fo_3 < Fo_4$

إن القطب (A) في حالة $Bi \to 0$ يتوضع في اللانهاية وهذا واضح من العلاقة $X_n = \frac{1}{Bi \to 0} \to \infty$ كما هو مبين بالشكل (15-10). أما توزع درجات الحرارة خلال الصفيحة وفي لحظات زمنية مختلفة تمثلها مستقيمات متوازية وموازية للمحور X .

وكما وجدنا سابقا فإنه عندما $Bi > 0$ فإن جذور المعادلة (15-14) هي: $\mu_n = (n-1)\pi$ وبالتالي فإن جميع عناصر المنشور (15-23) (ماعدا العنصر الأول) تسعى إلى الصفر $(D_n \to 0)$ بينما العنصر الأول يبقى مساوي لـ:

$$D_1 = \left(\frac{2\sin\mu_1}{\mu_1 + \sin\mu_1 \cos\mu_1} \right)_{\mu_1 \to 0} = 1$$

كما أنه يجب أن نلاحظ أنه عند قيم صغيرة لـ μ_1 فإن التابعين $\tan\mu_1, \sin\mu_1$ يمكن استبدالهما بمتحوليهما وعندها فإن المعادلة (15-14) تأخذ الشكل:

$$\frac{1}{\mu_1} = \frac{\mu_1}{Bi}$$

بأخذ بعين الاعتبار ما ذكرناه سابقا فإن المعادلة (15-23) تكتب بالشكل:

$$\Theta = \cos(\mu_1 X) e^{-\mu_1^2 Fo} = \cos\left(\sqrt{Bi}\, X\right) e^{-BiFo} \qquad (34\text{-}15)$$

وبالتالي فإن درجة الحرارة على كل من محور الصفيحة وسطحيها هي:

أ- على المحور $(X = 0)$:

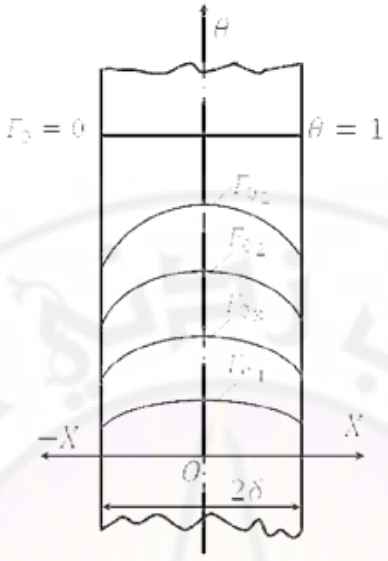
$$\Theta_{X=0} = e^{-BiFo} \qquad (35\text{-}15)$$

ب- على السطح $(X = 1)$:

$$\Theta_{X=1} = \cos\left(\sqrt{Bi}\right) e^{-BiFo} \qquad (36\text{-}15)$$

٣) عندما عدد بيو Bi يقع في المجال $0.1 \le Bi \le 100$

في هذه الحالة فإن قيم μ_n هي تابع لـ Bi ، أي أن μ تتعلق بسماكة الصفيحة. حقول درجات الحرارة في أية لحظة زمنية سوف تبدو كما هو مبين بالشكل (15-11) وفي هذه الحالة $(0.1 \le Bi \le 100)$ فإن فعالية عملية التبريد (التسخين) تحددها كل من المقاومتين الحراريتين الداخلية والخارجية.



الشكل (15-11): توزع درجات الحرارة في جدار مستوي عند تبريده في شروط عندما Bi له قيمة محددة،

$$Fo_1 < Fo_2 < Fo_3 < Fo_4$$

15-3: تحديد كمية الحرارة المطروحة من صفيحة أثناء عملية تبريدها

تحدد كمية الحرارة التي تطرحها (أو تكتسبها) صفيحة أثناء عملية تبريدها (تسخينها) بواسطة العددين Bi, Fo فإذا رمزنا بـ Q_1 لكمية الحرارة المطروحة (أو المكتسبة) وذلك في نهاية عملية التبريد (أو التسخين) (نظريا فهذا يتحقق عندما $\tau \to \infty$) وبالرمز Q_τ لكمية الحرارة المطروحة (أو المكتسبة) بعد فاصل زمني τ من بداية عملية التبريد (أو التسخين) عندها يمكن أن نكتب:

$$Q_1 = 2\delta \rho f c(t_0 - t_f) = 2\delta \rho f c \theta_0 \qquad (37\text{-}15)$$

حيث $\theta = t_0 - t_f$،

$$Q_\tau = 2\delta \rho f c(t_0 - \bar{t}) = 2\delta \rho f c(\theta_0 - \bar{\theta}) \qquad (38\text{-}15)$$

حيث $\bar{\theta} = \bar{t} - t_f$

t درجة الحرارة الوسطية للصفيحة بعد مرور فاصل زمني τ

بتقسيم (38-15) على (37-15) نحصل على:

$$\frac{Q_\tau}{Q_0} = 1 - \frac{\theta}{\theta_0} = 1 - \frac{\bar{t} - t_f}{t_0 - t_f} = 1 - \Theta \qquad (39\text{-}15)$$

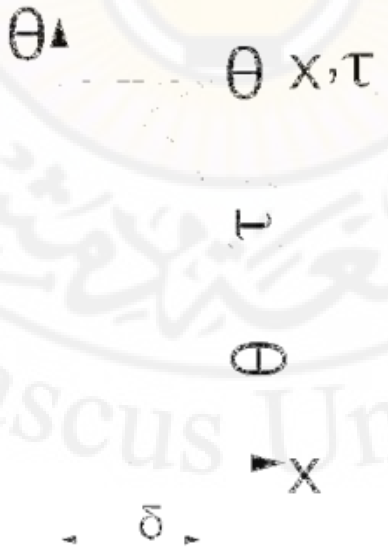
بما أن حقل درجات الحرارة ضمن الصفيحة في كل لحظة زمنية يتعلق بالعددين اللابعديين Bi و Fo فإن درجة الحرارة الوسطية اللابعدية Θ تتعلق أيضا بهذين العددين وبالتالي فإن العلاقة (39-15) تكتب بالشكل:

$$\frac{Q_\tau}{Q_0} = f(Bi, Fo)$$

إن قيمة $\bar{\Theta}$ (درجة الحرارة الوسطية اللابعدية على سماكة الصفيحة في اللحظة الزمنية τ) يمكن إيجادها فيما لو أجرينا مكاملة للتابع الممثل بالمعادلة (15-23) وذلك في الحدود $0 - \delta$ (أي إيجاد المساحة الواقعة تحت المنحني $\theta(X,\tau)$) وتقسيم الناتج على δ، الشكل (15-12).

$$\Theta = \frac{1}{x}\int_0^x \theta\, dx = \frac{1}{\delta}\int_0^\delta \sum_{n=1}^{n=\infty} D_n e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}} \cos\mu_n \frac{x}{\delta}\, dx$$

$$-\frac{1}{\delta}\sum_{n=1}^{n=\infty} D_n e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}} \int_0^\delta \cos\mu_n \frac{x}{\delta}\, dx$$



الشكل (15-12): تحديد درجة الحرارة الوسطية اللابعدية $\overline{\Theta}$ على سماكة الصفيحة من أجل المعادلة (39-15)

ولكن:

$$\int_0^{\delta} \cos\mu_n \frac{x}{\delta} dx = \delta \frac{\sin\mu_n}{\mu_n}$$

إذا:

$$\overline{\Theta} = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{2\sin^2\mu_n}{\mu_n^2 + \mu_n \sin\mu_n \cos\mu_n} e^{-\mu_n^2 Fo}$$

بالتبديل في العلاقة (39-15) بعد حساب $\overline{\Theta}$ عند لحظة زمنية محددة نحصل على كمية الحرارة المفقودة (أو المكتسبة).

أو يمكن كتابة $\overline{\Theta}$ بالشكل التالي:

$$\Theta = \sum_{n=1}^{n=\infty} \beta_n e^{-\mu_n^2 Fo} \qquad (40\text{-}15)$$

المعامل β_n الداخل في عناصر المنشور (39-15) يعتبر تابع لـ Bi وهو لحالة الصفائح:

$$\beta_n = D_n \frac{\sin\mu_n}{\mu_n}$$

حيث D_n معامل يحدد اعتماداً على المعادلة (22'-15) وقيمه مدرجة في الجدول (2-15).

قيم β_n من أجل العناصر الأربعة الأولى من المنشور (40-15) ولحالة الصفائح غير المنتهية بدلالة عدد Bi مبينة في الجدول (4-15).

يبين الشكل (13-15) المنحنيات المستخدمة من أجل تحديد درجة الحرارة الوسطية اللابعدية وذلك بالنسبة لصفيحة، وقد ثبتت على محور العينات قيم $\overline{\Theta} - 1$. وبمساعدة المنحنيات السابقة يمكن أن تحدد كذلك كميات الحرارة المعطاة للجسم (أو المطروحة منه) لغاية الفترة الزمنية τ في عملية تسخين الجسم (أو عملية تبريده) وذلك اعتمادا على العلاقة (39-15).

من أجل تحديد Q_τ بعد فترة زمنية من بداية عملية التبريد (التسخين) تحدد بداية وبمساعدة العددين اللابعديين Bi, Fo قيمة النسبة $\frac{Q_\tau}{Q_\infty}$ والتي تساوي إلى $\overline{\Theta}$ 1. ولما كانت تتحدد بمساعدة العلاقة (15-36) يبقى المجهول Q_τ.

الجدول (15-4): قيم β_n من أجل العناصر الأربعة الأولى من المنشور (15-40)

Bi	β_1	β_2	β_3	β_4
0.00	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.01	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1	1.0000	0.0002	0.0000	0.0000
0.5	0.9955	0.0040	0.0003	0.0001
1	0.9862	0.0124	0.0011	0.0002
2	0.9635	0.0313	0.0037	0.0009
4	0.9264	0.0582	0.0104	0.0029
10	0.8743	0.0839	0.0236	0.0090
15	0.8565	0.0885	0.0279	0.0120
30	0.8354	0.0893	0.0315	0.0152
50	0.8260	0.0899	0.0323	0.0161
100	0.8185	0.0901	0.0324	0.0165
∞	0.8106	0.0901	0.0324	0.0165

الشكل (15-13) منحنيات تحديد كمية الحرارة المعطاة (المفقودة) ودرجة الحرارة الوسطية اللابعدية لصفيحة عند تسخينها (أو تبريدها)

عندما $Bi \to \infty$ (عملياً $Bi > 100$) فإن العلاقة (15-40) نكتبها بالشكل:

$$\overline{\Theta} = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} e^{-\left(\frac{2n-1}{2}\right)^2 \pi^2 Fo}$$

عندما $Bi \to 0$ (عملياً $Bi < 0.1$) فإن العلاقة (15-40) نكتبها بالشكل:

$$\Theta = e^{-BiFo}$$

عند قيم $Fo \geq 0.3$ ولأجل الصفائح فإنه كما ذكرنا سابقاً فيمكن أن نكتفي بالعنصر الأول من المنشور (15-40):

$$\overline{\Theta} = \frac{2\sin^2 \mu_1}{\mu_1^2 + \mu_1 \sin \mu_1 \cos \mu_1} e^{-\mu_1^2 Fo}$$

$$\Theta = \beta_1 e^{-\mu_1^2 Fo} \qquad (41\text{-}15)$$

حيث نأخذ قيم β_1 من الجدول (15-4)

مثال 15-1

صفيحة مطاطية سماكتها $2\delta = 20mm$، مسخنة حتى درجة الحرارة $t_0 = 140°C$ موضوعة في وسط هوائي بدرجة حرارة $t_f = 15°C$. حدد درجتي الحرارة على سطح الصفيحة وفي وسطها وذلك بعد $\tau = 20\min$ من بداية التبريد. معامل التوصيل الحراري للمطاط $\lambda = 0.175W/mK$ معامل الانتشار الحراري $a = 0.833 \times 10^{-7} m^2/s$ معامل انتقال الحرارة من سطح الصفيحة إلى الهواء المحيط $\alpha = 65W/m^2K$.

الحل

عند تبريد (تسخين) صفيحة غير منتهية في وسط درجة حرارته ثابتة، يمكن إيجاد درجتي الحرارة على سطح الصفيحة وفي وسطها بمساعدة المنحنيات $\Theta_{x=0} = f_1(Bi, Fo)$ (الشكل 15-6) و $\Theta_{x=\delta} = f_2(Bi, Fo)$ (الشكل 15-7) أو تحليلياً بالاعتماد على المعادلات والجداول (انظر المثال 15-2).

في الحالة المعطاة:

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda} = \frac{65 \times 0.01}{0.175} = 3.73$$

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2} = \frac{0.833 \times 10^{-7} \times 1,200}{(0.01)^2} = 1.0$$

عند هذه القيم للأعداد اللابعدية وبوساطة الشكل (15-6) والشكل (15-7) نجد درجة الحرارة اللابعدية:

$$\Theta_{X=1} = 0.083 \quad , \quad \Theta_{X=0} = 0.26$$

$$\Theta = \frac{t - t_f}{t_o - t_f}$$

ومنه:

$$t_{x=0} = t_f + \Theta_{X=0}(t_o - t_f) = 15 + 0.26(140 - 15) = 47.5°C$$

$$t_{x=\delta} = t_f + \Theta_{X=1}(t_o - t_f) = 15 + 0.083(140 - 15) = 25.4°C$$

مثال 15-2

من أجل شروط المثال 15-1 نفسه حدد حسابيا درجة الحرارة على مسافة $x = \frac{\delta}{2} - 5mm$ من مركزها وكذلك درجتي الحرارة اللابعديتين في مركز الصفيحة وعلى سطحها، ثم قارن النتائج مع قيم $\Theta_{X=0}, \Theta_{X=1}$ التي حصلت عليها في المثال (15-1).

الحل

تحسب درجة الحرارة اللابعدية لصفيحة لامتناهية عند تبريدها في وسط ذي درجة حرارة ثابتة بالمعادلة (15-23). وبما أنه في الحالة المعطاة $Fo \geq 0.3$ (انظر المثال 15-1) يمكن الاكتفاء بالعنصر الأول من السلسلة أي:

$$\Theta = D_1 \cos(\mu_1 X) e^{-\mu_1^2 Fo}$$

وعليه فإن درجتي الحرارة اللابعديتين في وسط الصفيحة وعلى سطحيها تساويان:

$$\Theta_{X=0} = N(Bi) e^{-\mu_1^2 Fo}$$

$$\Theta_{X=1} = P(Bi) e^{-\mu_1^2 Fo}$$

قيم $N(Bi), P(Bi), \mu_1, \mu_1^2$ بدلالة Bi موجودة في الجدول (3-15)، في حالتنا $(Bi = 3.73)$ ومن الجدول نجد:

$$\mu_1 = 1.248 \ , \ \mu_1^2 = 1.56 \ , \ N(Bi) = 1.224 \ , \ P(Bi) = 0.39$$

وبالتالي عندما $Fo \approx 1$:

$$\Theta_{X=0.5} = 1.224 \cos(0.5 \times 1.248) e^{-1.56} = 0.208$$

$$t_{x=\frac{\delta}{2}} = t_f + \Theta_{X=0.5}(t_o - t_f) = 41°C$$

$$\Theta_{X=0} = 1.224 e^{-1.56} = 0.257$$

$$\Theta_{X=1} = 0.39 e^{-1.56} = 0.082$$

مثال 3-15

تسخن صفيحة فولاذية سماكتها $2\delta = 400mm$ في فرن ذي درجة حرارة ثابتة $t_f = 800°C$. درجة حرارة الصفيحة في لحظة وضعها بالفرن كانت في جميع نقاطها واحدة ومساوية $t_o = 30°C$. معامل انتقال الحرارة إلى سطح الصفيحة في عملية التسخين بقي ثابتاً ومساوياً $\alpha = 200 W/m^2K$. البعدان الآخران للصفيحة كبيران بالمقارنة مع سماكتها وعندها يمكن تحديد الحقل الحراري في الصفيحة كما لو كان أحادي البعد. حدد كمية الحرارة التي سوف تعطى لـ $1m^2$ من الصفيحة خلال 2 ساعة من بدء التسخين، معامل التوصيل الحراري للفولاذ $\lambda = 37.2 W/mK$، $a = 7 \times 10^{-6} m^2/s$، أما كثافة الفولاذ $\rho = 7,800 kg/m^3$.

الحل

حساب كمية الحرارة المعطاة (المطروحة) للصفيحة في عملية التسخين (التبريد) خلال فاصل زمني من $\tau = 0$ وحتى τ عملياً يمكن أن نرجعها إلى حساب درجة الحرارة الوسطية اللابعدية في اللحظة الزمنية τ) أي يمكن أن نحسبها بالعلاقة (15-39):

$$\frac{Q_\tau}{Q_o} = 1 - \frac{\bar{\theta}}{\theta_o} = 1 - \frac{\bar{t} - t_f}{t_o - t_f} = 1 - \bar{\Theta}$$

حيث Q_o كمية الحرارة الكلية التي يمكن طرحها (أو كسبها) من الصفيحة خلال الفاصل الزمني من $\tau = 0$ وحتى $\tau \to \infty$، العلاقة (15-37):

$$Q_{,} = 2\delta \rho f c\left(t_{,,} - t_{f}\right)$$

f مساحة أحد وجهي الصفيحة، أما درجة الحرارة الوسطية اللابعدية في اللحظة الزمنية τ من أجل الصفائح فإنها تحسب بالعلاقة (15-40). بتعويض القيم المعطاة لنا في شروط المسألة بالعلاقة (15-37) نحصل على:

$$Q_{,} = 0.4 \times 7{,}800 \times 682 \times 1(800 - 30) = 1{,}630 \times 10^{3}\ kJ/m^{2}$$

حيث: $$c - \frac{\lambda}{\rho a} - \frac{37.2}{7{,}800 \times 7 \times 10^{-6}} - 682\ J/kgK$$

نحسب العددين اللابعديين Bi و Fo:

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^{2}} = \frac{7 \times 10^{-6} \times 7{,}200}{(0.2)^{2}} = 1.26$$

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda} = \frac{200 \times 0.2}{37.2} = 1.075$$

قيمة $Fo \geq 0.3$ ولأجل الحساب بدقة كافية يكتفى استخدام الحد الأول في العلاقة (15-40).

بدلالة Bi Bi ومن الجدول (15-1) نوجد قيمة μ_{1} مستبدلين هذه القيمة في العلاقة (15-40) نجد: $\overline{\Theta} - 0.098$

نعوض قيمة $Q_{,}$ و Θ في العلاقة (15-39) نجد:

$$Q_{,} = 1{,}630 \times 103(1 - 0.098) = 1{,}470 \times 10^{3}\ kJ/m^{2}$$

Damascus University

مسائل غير محلولة

1-15

أدخل لوح فولاذي سماكته $2\delta = 24mm$ ودرجة حرارته البدائية $t_0 = 25°C$ إلى فرن درجة حرارته $t_f = 600°C$. أوجد الزمن اللازم لتسخين مركز اللوح حتى $t = 450°C$. معتبراً قيم معامل التوصيل الحراري للفولاذ $\lambda = 45.4W/mK$ والكثافة $\rho = 7,800kg/m^3$، السعة الحرارية $c = 0.502kJ/kgK$ أما معامل انتقال الحرارة إلى سطح الصفيحة $\alpha = 23.3W/m^2K$.

الجواب: $\tau = 45\min$

2-15

يوضع لوح سماكته $2\delta = 20mm$ مصنوع من مادة عازلة كهربائيا في فرن تسخين درجة حرارة الهواء بداخله $450°C$ بينما درجة حرارة اللوح البدائية $20°C$، معامل انتقال الحرارة إلى اللوح $\alpha = 40W/m^2K$. حدد زمن التسخين اللازم لكي تصل درجة حرارة اللوح إلى $200°C$ علما بأن معامل التوصيل الحراري للمادة العازلة $\lambda = 0.174W/mK$ وعامل الانتشار الحراري $a = 5.8 \times 10^{-8} m^2/s$.

توجيه: اعتبر اللوح بمثابة صفيحة غير منتهية واعتبر أيضا أن زمن التسخين منته عندما تصل درجة الحرارة في وسط الصفيحة إلى القيمة المعطاة.

الجواب: $\tau = 14.4\min$

3-15

للشروط نفسها للمسألة (15-2) حدد قيمة معامل الانتقال الحراري بالحمل إلى سطح اللوح إذا علمت أن درجة حرارة سطح اللوح وصلت حتى $250°C$ وذلك بعد $\tau = 0.5h$.

الجواب: $\alpha = 11.658W/m^2K$

4-15

يوضع لوح مطاطي سماكته $2\delta = 40mm$ ودرجة حرارته $t_0 = 150°C$ في وسط هوائي درجة حرارته $t_f = 15°C$. حدد درجة الحرارة على كل من سطح اللوح ومحوره بعد

$\tau = 30\min$ من بداية التبريد. علماً بأن $\lambda = 0.17W/mK$ ، $a = 8.3\times10^{-8}m^2/s$ وأن α من سطح الصفيحة إلى الهواء $27W/m^2K$.

الجواب: $t_{x=\delta} = 53°C$ ، $t_{x=0} = 112°C$

5-15

من أجل شروط المسألة (4-15) نفسها حدد الزمن اللازم كي تصبح درجة الحرارة على محور اللوح $t_{x=0} = 25°C$.

الجواب: $\tau = 2.8h$

6-15

من أجل شروط المسألة (4-15) حدد درجة الحرارة على مسافة $x = 5mm$.

الجواب: $108°C$

7-15

حدد الزمن اللازم لتبريد لوح فولاذي $2\delta = 10mm$ سماكته من الدرجة البدائية $600°C$ وحتى درجة حرارة تزيد عن درجة حرارة الوسط الخارجي بمقدار درجة مئوية واحدة (علماً بأن درجة حرارة الوسط المحيط $t_f = 20°C$) الخواص الفيزيوحرارية للفولاذ $\lambda = 45W/mK$ ، السعة الحرارية $c = 0.46kJ/kgK$ والكثافة $\rho = 7,900kg/m^3$ ، وقيمة معامل انتقال الحرارة من سطح اللوح إلى الهواء المحيط $\alpha = 35W/m^2K$.

الجواب: $\tau = 0.96h$

8-15

يوضع لوح فولاذي غير منته سماكته $2\delta = 200mm$ درجة حرارته البدائية $t_0 = 250°C$ في وسط هوائي درجة حرارته $t_f = 15°C$. معامل انتقال الحرارة بالحمل من كلا سطحيه $\alpha = 30W/m^2K$ ، معامل التوصيل الحراري لمعدن اللوح $\lambda = 45W/mK$ ومعامل الانتشار الحراري $a = 1.25\times10^{-5}m^2/s$. والمطلوب تحديد درجتي الحرارة في وسط وسطح اللوح وذلك بعد مرور ساعة واحدة من بدء عملية التبريد.

الجواب: $t_{x=\delta} = 182°C$ ، $t_{x=0} = 191°C$

9-15

من أجل شروط المسألة (8-15) حدد درجة الحرارة على مسافة $50mm$ من وسط اللوح.

الجواب: $t_{x\ 0.05} = 189°C$

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل السادس عشر

التبادل الحراري بالحمل

- معلومات ومفاهيم أساسية
- معادلة التبادل الحراري الحملي (بالحمل)
- تشابه عمليات التبادل الحراري بالحمل
- الأعداد التشابهية اللابعدية

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل السادس عشر

التبادل الحراري بالحمل

16-1: معلومات ومفاهيم أساسية

يأخذ انتقال الحرارة الحملي (بالحمل) بين المائع والسطح الصلب (جدار مثلا) الحيز الأكبر في الحسابات الهندسية. التبادل الحراري أو اختصارا انتقال الحرارة هو عملية انتقال الحرارة المشتركة بالحمل والتوصيل من سطح الجسم الصلب إلى تيار المائع (سائل أو غاز) الذي ينساب عليه أو بالعكس من تيار المائع إلى سطح الجدار.

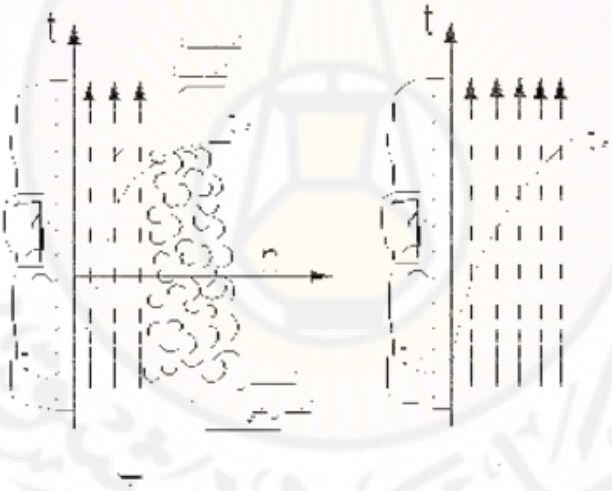
نميز بحسب طبيعة نشوء حركة المائع بين حمل حر وحمل قسري:

الحمل الحر: هو حركة المائع بسبب فرق الكثافات الناتج عن فروق درجات الحرارة، في هذا النوع تسعى الطبقات الساخنة من المائع وتحت تأثير دافعة أرخميدس بالصعود نحو الأعلى، وبالعكس الطبقات الباردة تتحرك نحو الأسفل.

الحمل القسري: تنشأ حركة المائع تحت تأثير القوى الخارجية السطحية والناتجة عن عمل المضخات، والمراوح والضواغط، والخلاطات. غالبا ما يترافق الحمل القسري بالحمل الحر، يكون ذلك جليا كلما ازداد الفرق بين درجات حرارة الأجزاء المستقلة من الوسط من جهة، وانخفضت سرعة الجريان القسري من جهة أخرى. يكون تأثير الحمل الحر محدودا على عملية انتقال الحرارة عند سرعات جريان قسري كبيرة. يمكن أن نأخذ كمثال عن انتقال الحرارة بالحمل القسري عملية انتقال الحرارة من الماء الساخن المار داخل مشع التدفئة المنزلي (الموصول بالمرجل) إلى السطح الداخلي البارد للمشع. يتحرك الماء الساخن ضمن مقاطع المشع تحت تأثير عمل المضخات المائية الموجودة عند المرجل والتي تقوم بدفع الماء الساخن إلى المشع. يجري من السطح الخارجي للمشع إلى هواء الغرفة المراد تدفئتها انتقال حرارة بالحمل الحر (دون وجود مؤثر خارجي على حركة الهواء)، تتم حركة الهواء بالقرب من السطح الخارجي للمشع من جراء الفرق بكثافة الهواء الساخن (الذي يرتفع للأعلى) والهواء البارد (البعيد عن سطح المشع) الذي يهبط نحو الأسفل.

يمكن أن يكون انتقال الحرارة مستقراً أو غير مستقر ففي الحالة الأولى يكون حقل درجة حرارة السائل ثابتا مع الزمن بينما يكون في الحالة الثانية متغيراً مع الزمن. توصل العالم رينولدز عام (1884) إلى وجود نظامين لجريان السوائل أحدهما صفائحي والآخر مضطرب.

عند نظام الجريان الصفائحي تتحرك جميع جزيئات السائل بمسارات غير متقاطعة دون أن تتحرك بالاتجاه الناظمي لجهة الجريان. وبالتالي فإن انتقال الحرارة وفق هذا الاتجاه يتحقق بالتوصيل فقط انظر الشكل (16-1-أ). لذا يمكن حساب عمليات انتقال الحرارة بالحمل بوساطة قانون فوريه (14-4) ونظراً لصغر قيم λ للسوائل نسبياً (وبخاصة الغازات) فإن الحرارة عند نظام الجريان الصفائحي تنتشر على كامل حجم السائل بصورة بطيئة.



الشكل (16-1): انتقال الحرارة بالحمل عند أنظمة الجريان المختلفة: أ) النظام الصفائحي، ب) النظام المضطرب

إن جزيئات السائل المشاركة في الحركة العامة نحو الأمام تتحرك في النظام المضطرب عشوائيا بلا ترتيب مع تشكل الأعاصير، وظهور اضطرابات غير منتظمة في السرعة والضغط والبارامترات الأخرى.

كلما كثرت الأعاصير ازدادت فعالية اختلاط التيار وازداد اضطرابه. يتحقق انتقال الحرارة في التيار الإعصاري المثار عن طريق الحمل ولكن بالقرب من الجدار لا يمكن ملاحظة ذلك والسبب هو التصاق جزيئات السائل على سطح الجدار.

تتشكل نتيجة تأثير قوى اللزوجة التي تفرمل السائل على سطح الجدار طبقة رقيقة من السائل المفرمل والمسماة الطبقة الحدية الهيدروديناميكية الشكل (16-1-ب) وفيها يتحرك السائل بصورة موازية للجدار ويعد العالم براندل عام (1904) أول من وضع فرضية التصاق السائل بالجدار وتشكل الطبقة الحدية.

تتغير سرعة السائل داخل الطبقة الحدية الهيدروديناميكية من الصفر على سطح الجدار وحتى سرعة التيار الخارجية وضمن حدود هذه الطبقة يتحقق انتقال الحرارة بالتوصيل وبهذه الصورة فإن انتشار الحرارة في نظام الجريان المضطرب وفي الاتجاه الناظمي على السطح يتحقق من جراء الحمل والتوصيل بآن واحد. وبالتالي فإن طبيعة جريان السائل تحدد لنا مسبقاً آلية انتقال الحرارة في التيار.

تنشأ عند التبادل الحراري بين الجدار والسائل في المنطقة القريبة من الجدار طبقة حدية حرارية تتغير درجة الحرارة فيها من درجة حرارة الجدار t_w وحتى درجة حرارة التيار الخارجي t_f.

وقد وجد أن المقاومة الحرارية للطبقة الحدية $\frac{\delta}{\lambda}$ (حيث δ سماكة الطبقة الحدية، λ معامل التوصيل الحراري للسائل) أكبر بكثير من المقاومة الحرارية للتيار الخارجي المضطرب (الموجود بعد حدود الطبقة الحدية باتجاه محور الأنبوب) وعليه تعد مقاومة الطبقة الحدية العامل المحدد لعمليات التبادل الحراري بالحمل، لذا فإن تغير درجة الحرارة من t_f وحتى t_w مُركز أساسا في حدود الطبقة الحدية.

16-2: معادلة التبادل الحراري الحملي (بالحمل)

يعد نيوتن أول من أعار اهتماما إلى أن فرق درجتي الحرارة بين الجسم والوسط له الدور الحاسم في عملية التبادل الحراري بالحمل أما العالم الفيزيائي الروسي رحمانوف في القرن السابع عشر فهو أول من أعطى تحليلاً مفصلاً لعمليات تبريد أجسام ساخنة في الهواء وأظهر علاقتها ليس بفرق درجتي الحرارة فقط بل وبمساحة سطح الجسم وحجمه.

و قد أظهرت الدراسات والأبحاث اللاحقة أن كمية الحرارة المتبادلة بين الجسم والوسط المحيط تتناسب طرداً مع:

- مساحة سطح الجسم A ،
- الفرق بين درجتي حرارة الوسط t_f (درجة حرارة السائل) وسطح الجسم t_w ،
- الفترة الزمنية للعملية،
- وكذلك تتعلق بالخواص الفيزيائية للوسط وطبيعة جريانه وبشكل الجسم وأبعاده الهندسية.

تحسب كمية الحرارة التفاضلية dQ التي تكتسبها مساحة dA خلال زمن تفاضلي $d\tau$ من العلاقة:

$$dQ = \alpha (t_f - t_w) dA d\tau \qquad (1\text{-}16)$$

المعادلة (1-16) تحمل تسمية المعادلة الأساسية للتبادل الحراري بالحمل أو قانون نيوتن–رحمانوف حيث:

$t_f - t_w$ ضاغط درجة الحرارة.

α معامل التناسب ويسمى معامل انتقال الحرارة بالحمل $\left[W/m^2K\right]$.

يحسب التدفق الحراري في عمليات التبادل الحراري المستقرة بالمعادلة:

$$Q = \alpha (t_f - t_w) A \qquad (2\text{-}16)$$

أما شدة التيار الحراري فتحسب كالتالي:

$$q = \frac{Q}{A} = \alpha (t_f - t_w) \qquad (3\text{-}16)$$

من معادلة نيوتن–رحمانوف نجد:

$$\alpha = \frac{dQ}{t_f - t_w} \frac{1}{dA d\tau} = \frac{q}{t_f - t_w} \qquad (4\text{-}16)$$

أي أن معامل انتقال الحرارة بالحمل هو كمية الحرارة التي تكتسبها (أو تفقدها) واحدة السطوح خلال واحدة الزمن عند فرق في درجتي حرارة السطح والوسط المناسب مقداره $1°C$ إن معامل انتقال الحرارة بالحمل α يصف فعالية التبادل الحراري بين سطح

الجسم والوسط المنساب عليه. ولما كانت α تتعلق بسرعة جريان الوسط وشكل الجسم وسطحه وأبعاده الهندسية واتجاه السطح في الفراغ وبضاغط درجة الحرارة Δt وبدرجة حرارة الوسط t_f فإن α تختلف عن λ و a بأنها ليست خاصة فيزيوحرارية للمادة وقيمتها لا يمكن أدراجها في جداول.

يمكن كتابة العلاقة التالية التي تظهر تأثير المعاملات المختلفة على قيمة α:

$$\alpha = f(\phi, l_{\alpha}, x_{\alpha}, y_{\alpha}, z_{\alpha}, w_f, \Delta t, c, \lambda, a, \rho, \nu, g, \beta)$$

حيث ϕ شكل السطح المنساب عليه المائع، (سطح مستوي، أنبوب،...).

l_{α} البعد المميز لسطح التبادل الحراري (طول أو ارتفاع الصفيحة – قطر الأنبوب، ...).

$x_{\alpha}, y_{\alpha}, z_{\alpha}$ إحداثيات سطح التبادل الحراري (الجدار).

w_f السرعة المميزة للمائع.

Δt ضاغط درجة الحرارة بين المائع t_f والجدار t_{α}.

λ معامل التوصيل الحراري للمائع.

c الحرارة النوعية للمائع.

ρ كثافة المائع.

a معامل الانتشار الحراري.

g تسارع الجاذبية الأرضية.

β معامل درجة الحرارة للتمدد الحجمي للمائع.

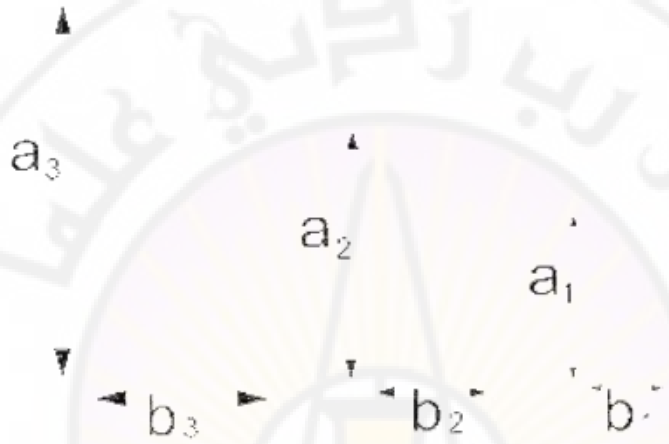
ν اللزوجة الحركية للمائع.

μ اللزوجة التحريكية للمائع.

3-16: تشابه عمليات التبادل الحراري بالحمل

يمكن تصور التشابه بداية في الهندسة، حيث تدرس شروط التشابه الهندسي للأشكال المتماثلة. على سبيل المثال معلوم من الهندسة أن شروط تشابه المستطيلات

يعتبر مساواة نسبة طول المستطيل a إلى عرضه b الشكل (16-2)، وبالتالي إذا كانت النسبة لمستطيل تساوي (10) هذا يعني أن هذه النسبة تبقى صحيحة بالنسبة لجميع المستطيلات المتشابهة معه وتساوي إلى العدد اللابعدي (10). بصورة عامة يكون شرط التشابه من أجل المستطيلات المتشابهة هو من الشكل:



الشكل (16-2): التشابه الهندسي للمستطيلات

$$\frac{a_1}{b_1}=\frac{a_2}{b_2}=...=\frac{a_n}{b_n}=k_n$$

نسمي k_n ثابت التشابه الهندسي.

انطلاقا مما سبق نقول عن أنبوبين مستقيمين إنهما سيكونان متشابهين إذا تحققت النسبة:

$$\frac{l_1}{d_1}=\frac{l_2}{d_2}$$

حيث l_1, l_2 طول الأنبوب الأول والثاني على التوالي.

d_1, d_2 قطر الأنبوب (الداخلي أو الخارجي) الأول والثاني على التوالي.

تصنع أنابيب المبادلات الحرارية أحيانا على شكل حلزون الشكل (16-3)، شرط التشابه الهندسي لحلزونين تعتبر المساوتين التاليتين:

$$\frac{l_1}{d_1}=\frac{l_2}{d_2} \quad , \quad \frac{R_1}{d_1}=\frac{R_2}{d_2}$$

الشكل (16-3) التشابه الهندسي لحلزونين

حيث R_1, R_2 نصف قطر الحلزون (الداخلي أو الخارجي) الأول والثاني على التوالي.

التشابه ليس محصورا بتشابه الشكل الهندسي فقط، بل ولأي قيمة فيزيائية، وكذلك العمليات الفيزيائية، على سبيل المثال عمليات التبادل الحراري بالحمل، الجارية في أجهزة التبادل الحراري وفي النموذج المشابه لها.

إن تحديد قيمة معامل انتقال الحرارة بالحمل α بالطرائق النظرية معقد جدا وفي حالات كثيرة لا يمكن تحديد قيمة α وذلك بسبب العوامل الكثيرة المؤثرة على التبادل الحراري بالحمل. لهذا نستخدم الطرائق التجريبية لتحديد α.

يمكن إجراء مثل هذه التجارب مباشرة على الأجهزة الصناعية (المبادلات الحرارية – المراجل البخارية – مسخنات الماء والموفرات وغيرها...) غير أن هذه الطرائق التجريبية قلما تستخدم لأن ضخامة الأجهزة الصناعية تؤدي إلى زيادة تكاليف مثل هذه التجارب لهذا جرت العادة أن تتم دراسة التبادل الحراري بالحمل على نماذج مصغرة بحيث تنقل نتائج هذه الدراسة إلى الأجهزة الصناعية. لتحقيق ذلك لا بد من أن تكون العمليات الجارية في الأجهزة الصناعية مشابهة لتلك الجارية على النماذج وقد وضعت نظرية التشابه الشروط الضرورية لتحقيق عمليات متشابهة من خلال قيم لاواحدية تحمل تسمية أعداد التشابه. فالظواهر الفيزيائية المتشابهة توصف بأعداد تشابه متساوية. لذا

فإن التعبير عن نتائج التجربة يكون على شكل علاقة لا بعدية تربط فيما بين الأعداد اللابعدية (التشابهية) وليس على شكل علاقة بين القيم الفيزيائية. وفيما يلي نورد بعض الأعداد التشابهية المستخدمة في المعادلات القياسية للتبادل الحراري بالحمل.

16-4: الأعداد التشابهية اللابعدية

16-4-1: عدد نوسلت:

ورمزه Nu وهو يحدد فعالية التبادل الحراري بالحمل على حدود الجدار –المائع. كلما كانت فعالية التبادل الحراري بالحمل أكبر كان عدد Nu أكبر وكانت قيمة α أكبر وهذا يتضح من العلاقة:

$$Nu = \frac{\alpha l_{\perp}}{\lambda} \qquad (5\text{-}16)$$

حيث α معامل انتقال الحرارة بالحمل.

λ معامل التوصيل الحراري للسائل.

$l_{\perp}$ البعد الخطي المميز والذي قد يكون قطر الأنبوب (أو طول صفيحة، أو ارتفاع جدار).

يقصد بالبعد المميز هو ذلك البعد المؤثر في تطور عملية التبادل الحراري. فمرور سائل (الناقل الحراري) ضمن أنبوب دائري أملس فإن قطره الداخلي d نعده البعد المميز . في حال كان مقطع القناة التي يجري بها السائل له شكل معقد، فإن البعد المميز يحدده ما يسمى القطر المكافئ:

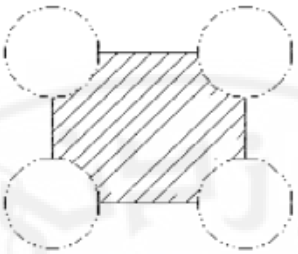
$$d_{eq} = \frac{4A}{\Pi}$$

حيث A مساحة المقطع العرضي للقناة.

Π محيط القناة التي يتم عبرها انتقال الحرارة.

على سبيل المثال، جريان سائل على طول أنابيب متوضعة على صفوف فإن A تساوي المساحة المهشرة كما هو مبين بالشكل (16-4).

لحالة القناة الحلقية ذات المقطع الدائري وعند نقل الحرارة عبر السطح الخارجي (d_{out}) والداخلي (d_{in}) بآن واحد يكون:



الشكل (16-4): التحديد البياني للقطر المكافئ

$$d_{eq} = \frac{\pi\left(d_{out}^2 - d_{in}^2\right)}{\pi\left(d_{out} + d_{in}\right)} = d_{out} - d_{in}$$

إذا كان انتقال الحرارة يتم فقط عبر السطح الداخلي فقط:

$$d_{eq} = \frac{d_{out}^2 - d_{in}^2}{d_{in}}$$

عند جريان تيار على طول حزمة أنابيب، متوضعة ضمن قناة بمقطع دائري D وعند انتقال الحرارة فقط بالأنابيب:

$$d_{eq} = \frac{D^2 - n d_{out}^2}{n d_{out}}$$

حيث n عدد الأنابيب في الحزمة.

d_{out} القطر الخارجي للأنبوب.

لحالة الأقنية المستطيلة الشكل التي بعداها a,b فإن:

$$d_{eq} = \frac{2ab}{a+b}$$

16-4-2: عدد رينولدز

ورمزه Re وهو عدد تشابه هيدروديناميكي يصف العلاقة بين قوى العطالة ولزوجة السائل. ويحدد طبيعة جريان الموائع:

$$\mathrm{Re} = \frac{w_x l_x}{\nu} \qquad (6\text{-}16)$$

حيث $w_{\prime\prime}$ سرعة المائع الوسطية والتي تحدد من العلاقة $w_{\prime\prime} = \frac{\dot{V}}{A}$ ،

حيث $\dot{V}$ التدفق الحجمي للمائع،

A مساحة المقطع العرضي للتيار .

ν اللزوجة الحركية للمائع وهي إحدى خواص المائع.

بالنسبة للجريان في الأنابيب نفترض الجريان صفائحيا إذا كان $\mathrm{Re} < 2{,}300$. أما إذا كان $\mathrm{Re} > 10^4$ فيعد الجريان مضطربا، أما إذا كان $2{,}300 < \mathrm{Re} < 10^4$ فإن الجريان انتقالي.

طالما التشابه الهيدروديناميكي يعتبر أيضا شرط لتشابه عملية التبادل الحراري فإنه للعمليات المتشابهة يجب أن يكون Re واحداً.

16-4-3: عدد براندل

ورمزه Pr ويتحدد بمعرفة خواص المائع الفيزيائية. وهو يأخذ بالحسبان تأثير الخواص الفيزيائية للمائع على التبادل الحراري بالحمل:

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a} \qquad (7\text{-}16)$$

حيث a معامل الإنتشار الحراري للمائع.

في العلاقة الأخيرة فإن كلا من ν و a يعد بارامتر حالة لهذا فإن العدد التشابهي Pr هو أيضا بارامتر حالة.

تتعلق قيم عدد براندل للغازات المثالية بتركيب الذرات في الجزيء:

- للغازات أحادية الذرة $\mathrm{Pr} = 0.67$
- للغازات الثنائية الذرة $\mathrm{Pr} = 0.72$
- للغازات الثلاثية الذرة $\mathrm{Pr} = 0.8$

16-4-4: عدد بكله

و نرمز له بـ Pe وهو جداء Re بـ Pr وهو يصف نسبة التيار الحراري المنتقل بالحمل إلى كثافة التيار الحراري المنتقل بالتوصيل:

$$Pe = \mathrm{Re}\,\mathrm{Pr} = \frac{w_o l_o}{a} \qquad (8\text{-}16)$$

16-4-5: عدد غراشوف Gr

وهو يحدد نسبة قوة الرفع (الناتجة من فرق كثافة جزيئات المائع الساخنة والباردة) وقوى الإحتكاك الجزئي أو بتعبير آخر فإن عدد Gr يصف فعالية الجريان الحر للسوائل:

$$Gr = \frac{\beta g l_o^3 \Delta t}{\nu^2} \qquad (9\text{-}16)$$

حيث β معامل درجة الحرارة للتمدد الحجمي وهو لحالة الغازات المثالية:

$$\beta = \frac{1}{T}$$

g التسارع الأرضي،

Δt ضاغط درجة الحرارة (الفرق بين درجتي حرارة السائل والجدار).

أغلب القيم الداخلة في الأطراف اليمنى للمعادلات العامة الواصفة لعمليات التبادل الحراري تتعلق بدرجة الحرارة. لهذا كان لابد من أن تكون قيمها منسوبة لدرجة حرارة مميزة. مثل هذه الدرجة يمكن أن تكون درجة حرارة الجدار ونرمز لها t_w أو درجة حرارة تيار المائع ونرمز لها t_f.

في أغلب الحالات وكدرجة حرارة مميزة يعتبرون درجة حرارة تيار المائع القادم (أي درجة الحرارة عند الدخول لمقطع القناة) أو أن نعتبرها درجة الحرارة الوسطية على طول القناة.

إذا كانت نسبة درجة حرارة المائع عند الدخول للقناة t_{f1} وعند الخروج t_{f2} أقل من (2) فإن درجة الحرارة الوسطية للمائع على طول القناة يمكن تحديدها على أنها المتوسط الحسابي:

$$t_{f\,mid} = \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2}$$

عند فرق كبير بين درجتي الحرارة t_{f1} و t_{f2} فإن درجة الحرارة الوسطية نحددها بالعلاقة:

$$t_{fmid} = \frac{\Delta t_{in} - \Delta t_{out}}{2.3\log\frac{\Delta t_{in}}{\Delta t_{out}}}$$

حيث Δt_{in} و Δt_{out} الفرق بين درجة حرارة السائل والجدار عند المدخل والمخرج من القناة على التوالي.

مبين في الجدول (16-1) والجدول (16-2) القيم الداخلة في تركيب الأعداد اللابعدية الأنفة الذكر، وكذلك قيم تلك الأعداد وذلك تبعاً لدرجة الحرارة المدرجة قيمها في العمود الأول من الجدولين:

الجدول (16-1): الخواص الفيزيائية للماء على خط الاشباع (عند ضغط $p = 1.01325 bar$)

t [°C]	ρ $[kg/m^3]$	i' $[kJ/kg]$	c_p $[kJ/kgK]$	$\lambda \cdot 10^2$ $[W/mK]$	$\mu \cdot 10^6$ $[Pa\cdot s]$	$\nu \cdot 10^6$ $[m^2/s]$	Pr
0	999.9	0	4.212	0.560	1.788	1.789	13.5
10	999.7	42.04	4.191	0.580	1.306	1.306	9.45
20	998.2	83.91	4.183	0.597	1.004	1.006	7.03
30	995.7	125.7	4.174	0.612	891.5	0.805	5.45
40	992.2	167.5	4.174	0.627	653.2	0.659	4.36
50	988.1	209.3	4.174	0.640	549.4	0.556	3.59
60	983.1	251.1	4.179	0.650	469.9	0.478	3.03
70	977.8	293.0	4.187	0.662	406.1	0.415	2.28
80	971.8	335.0	4.195	0.669	355.1	0.365	2.23
90	965.3	377.0	4.208	0.676	314.9	0.326	1.97
100	958.4	419.1	4.220	0.684	282.5	0.295	1.75

مثال 16-1

لدراسة حركة الهواء الجاري ضمن أنبوب مبادل حراري قطره الداخلي $d_1 = 1.6m$ بسرعة $w_1 = 4m/s$، استخدم نموذجاً للأنبوب قطره $d = 0.15m$. كم يجب أن تكون سرعة الهواء w_2 في النموذج كي يتحقق فيه تشابه هيدروديناميكي للعملية.

الحل

طالما أن جريان الهواء في النموذج يجب أن يكون متشابهاً من الناحية الهيدروديناميكية مع الجريان في الأنبوب الحقيقي هذا يعني أن عددي رينولدز في النموذج والأنبوب الحقيقي متساويان أي:

الجدول (16-2): الخواص الفيزيائية للهواء الجاف (عند ضغط $p = 1.01325 bar$)

t $[^\circ C]$	ρ $[kg/m^3]$	c_p $[kJ/kgK]$	$\lambda \times 10^6$ $[W/mK]$	$\mu \times 10^6$ $[Pas]$	$\nu \times 10^6$ $[m^2/s]$	Pr
-30	1.453	1.013	2.20	15.7	10.80	0.723
-20	1.395	1.009	2.28	16.2	11.79	0.716
-10	1.342	1.009	2.36	16.7	12.43	0.712
0	1.293	1.005	2.44	17.2	13.28	0.707
10	1.247	1.005	2.51	17.6	14.16	0.705
20	1.205	1.005	2.59	18.1	15.06	0.703
30	1.165	1.005	2.67	18.6	16.00	0.701
40	1.128	1.005	2.76	19.1	16.96	0.699
50	1.093	1.005	2.83	19.6	17.95	0.698
60	1.060	1.005	2.90	20.1	18.97	0.696

$$\mathrm{Re}_1 = \mathrm{Re}_2$$

$$\frac{w_1 d_1}{\nu_1} = \frac{w_2 d_2}{\nu_2}$$

حيث d_1, d_2 قطر الأنبوب وقطر النموذج على التوالي،

ν_1, ν_2 اللزوجة الحركية للهواء في الأنبوب والنموذج على التوالي وهما متساويتان.

وعليه:

$$w_2 = w_1 \frac{d_1}{d_2} = 4 \times \frac{1.6}{0.15} \approx 43 m/s$$

أي أنه لتحقيق التشابه الهيدروديناميكي بين جريان الهواء في الأنبوب الحقيقي والنموذج يجب أن تكون سرعة الهواء في النموذج أكبر مما هي عليه في الواقع بمقدار 10 مرات تقريباً.

ملاحظة: في حالة كون اللزوجة الحركية للسائل المتحرك في النموذج ν_2 تختلف عن ν_1 في المبادل الحراري (كأن نستخدم مائعاً غير الهواء في النموذج) فإن المحافظة على التشابه الهيدروديناميكي لجريان الهواء في المبادل وجريان المائع في النموذج تتحقق عند $w_2 = \frac{w_1 d_1 \nu_2}{d_2 \nu_1}$.

الفصل السابع عشر

التبادل الحراري بالإشعاع

- تعاريف ومفاهيم أساسية
- القوانين الأساسية للإشعاع الحراري
  - قانون بلانك
  - قانون الإزاحة فين
  - قانون ستيفان–بولتسمان
  - قانون لامبرت
  - قانون كيرشوف

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل السابع عشر

التبادل الحراري بالإشعاع

17-1: تعاريف ومفاهيم أساسية

ينتشر في بعض فروع الهندسة الحرارية استخدام قيم عالية لدرجات الحرارة سواء أكانت للأبخرة أم لغازات نواتج الاحتراق، ضمن هذه الظروف فإن عملية التبادل الحراري السائدة في أجهزة التبادل الحراري العاملة في تلك الفروع هي التي تتم عن طريق الإشعاع مقارنة مع الأشكال التي سبق أن تعرفنا عليها في الفصول السابقة (التوصيل والحمل). لهذا عند إنشاء هذه الأجهزة العاملة وتنفيذها في شروط درجات الحرارة العالية، لا بد من الأخذ بعين الاعتبار الاستخدام الأعظم للتبادل الحراري الإشعاعي. ينسب هذا قبل كل شيء إلى محطات المراجل والمواقد الصناعية بفراغات متطورة للهب، من أجل تحميص (إحماء) العناصر الإنشائية يبدؤون باستعمال مقاومات المواقد الكهربائية، والتي تنتقل الحرارة فيها للمواد بواسطة الإشعاع من المسخنات الجانبية. يستخدم التبادل الحراري الإشعاعي (بالإشعاع) أيضا عند درجات الحرارة المعتدلة من أجل تجفيف المنتجات السيراميكية بالأشعة تحت الحمراء.

إشعاع الجسم مشروط بعمليات معقدة داخل الذرات، وبنتيجتها تتحول الأشكال الأخرى للطاقة إلى طاقة إشعاع للتذبذبات الكهرومغناطيسية بأطوال موجات مختلفة.

معلوم أن الأشعة تحت الحمراء وفوق البنفسجية والضوئية وأشعة (X) التي يشعها جسم في جميع الاتجاهات وتنتشر بصورة خطية في الفراغ تسير بسرعة الضوء.

من أجل درجات الحرارة المستخدمة في الهندسة الحرارية يشمل طيف الإشعاع الحراري مجال طول موجة بين (0.4) وحتى (800) ميكرون.

الإشعاع الحراري عبارة عن موجات كهرومغناطيسية تنبعث من أي جسم بسبب ارتفاع درجة حرارته وهو ينتشر بسرعة مساوية تقريبا لسرعة الضوء $(3\times10^8 m/s)$، فضوء الشمس يمثل أحد أشكال الإشعاع المرسل في الفضاء إلى سطح الأرض وذلك دون مساعدة السوائل أو المواد الصلبة، حيث يقطع مسافة 93 مليون ميل خلال دقائق

معدودة دون وجود لأجسام صلبة على تماس بين الشمس والأرض (أي أن نقل الحرارة من الشمس وحتى الأرض لا يتم بالتوصيل الحراري)، ولما كان الفضاء الكوني خاليا من السوائل (كالهواء والماء)، فإن الحرارة لا تنتقل من الشمس إلى الأرض بالحمل. بل المسؤول عن نقل الحرارة هو الإشعاع.

مع ارتفاع درجة الحرارة تتزايد طاقة الإشعاع وذلك بسبب تزايد الطاقة الداخلية للجسم وعند درجات حرارة عالية جداً يصبح الإشعاع الحراري الشكل الأساسي لانتقال الحرارة وذلك نظراً لكون تأثر فعالية الإشعاع بدرجة الحرارة أكبر بكثير من تأثر الحمل والتوصيل الحراري بدرجة الحرارة.

تختلف عملية التبادل الحراري بالإشعاع عن عمليات التبادل الحراري بالتوصيل أو الحمل فطاقة الإشعاع تنتقل من الجسم الساخن إلى البارد (كما هو الحال في التوصيل والحمل) وكذلك من الجسم البارد إلى الساخن والنتيجة النهائية لهذا التأثير المتبادل هي كمية الحرارة المنتقلة بالإشعاع.

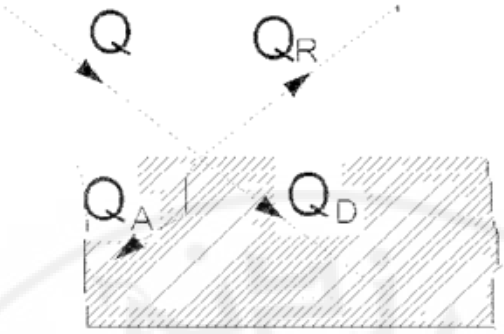
تيار الإشعاع الكلي W هو الطاقة الإجمالية المشعة من سطح الجسم على كامل مجال أطوال طيف الموجات في واحدة الزمن:

$$Q = \int_{l} E\, ds \qquad (1\text{-}17)$$

حيث E هي الطاقة المشعة من واحدة مساحة سطح الجسم في واحدة الزمن في جميع اتجاهات الفراغ النصف كروي أي:

$$E = \frac{dQ}{ds} \qquad (2\text{-}17)$$

القيمة E تتعلق فقط بدرجة حرارة الجسم وخواصه الفيزيائية وندعوها الإشعاع الذاتي أو قابلية الجسم للإشعاع. في الحالة العامة يمكن لكل جسم أن يشع ويعكس ويمتص ويمرر تيار طاقة الإشعاع وهذا يتعلق بطبيعة الجسم وبحالة سطحه ودرجة حرارته. لندرس جسماً يتبادل الإشعاع مع غيره من الأجسام، الشكل (17-1)، تسقط على سطح الجسم المعطى طاقة إشعاع الأجسام الأخرى Q (الإشعاع الساقط)



الشكل (17-1): تبادل الجسم الاشعاع مع غيره من الأجسام

جزء من هذه الطاقة يمتصه الجسم Q_A وجزء يعكسه Q_R وجزء آخر ينفذ عبر الجسم Q_D. كل جزء من الأجزاء السابقة يميز التيارات الموافقة التالية:

تيار الإشعاع الممتص: $Q_A = AQ$ (3'-17)

تيار الإشعاع المنعكس: $Q_R = RQ$ (3"-17)

تيار الإشعاع النافذ: $Q_D = DQ$ (3'"-17)

حيث A قابلية الجسم لامتصاص الأشعة.

R قابلية الجسم لعكس الأشعة.

D قابلية الجسم لتمرير الأشعة (قابلية النفاذ أو العبور)

حسب قانون انحفاظ الطاقة فإن تيار الإشعاع الكلي الساقط على جسم يساوي لمجموع مركباته أي:

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D$$

وبأخذ العلاقة (3-17) بعين الاعتبار نكتب:

$$A + R + D = 1 \quad (4\text{-}17)$$

قيم A, R, D تتعلق بطبيعة الجسم، وبدرجة حرارته، وبطول موجة إشعاعه.

قيمة كل معامل من المعاملات السابقة تتغير في الحالة العامة من الصفر وحتى الواحد فإذا كانت قابلية الامتصاص للجسم $A = 1$ فإن المعاملين الآخرين R, D يساويان الصفر، نسمي مثل هذا الجسم: الجسم المطلق السواد.

إذا كانت لجسم ما $R=1$ بينما $A=D=0$ فإن هذا الجسم يعكس كل طاقة الإشعاع فإذا جرت عملية الانعكاس وفق قانون الضوء الهندسي يسمى سطح الجسم مرآة وإذا جرى الانعكاس بصورة مبعثرة فإننا نسميه السطح المطلق البياض.

إذا سمح الجسم لطاقة الإشعاع بالنفاذ عبره $D=1$ و $A-R-0$ فهو جسم مطلق الشفافية. وإذا كانت $0<D<1$ لأحد الأجسام فهو جسم نصف شفاف.

لا يوجد في الطبيعة أجسام تتفق بصورة كاملة مع الشروط الثلاثة السابقة، لكن يوجد جسم يتوافق بصورة تقريبية معها، على سبيل المثال سطح معدن مصقول له $R=0.97$ ، بينما السخام النفطي، مخمل، الثلج، الجليد لها $A=0.95-0.96$. الغازات الثنائية الذرة (O_2، N_2، H_2) لها $D\approx 1$. يعتبر الهواء النظيف عملياً وسط شفاف من أجل الأشعة، لكن وجود أبخرة الماء فيه (ضباب) أو (CO_2) فإن شفافيته تنخفض بصورة حادة. هناك أجسام تكون شفافة فقط لبعض أطوال الموجات على سبيل المثال: زجاج النوافذ شفاف للأشعة الضوئية ولكنه غير شفاف للأشعة فوق البنفسجية أو الأشعة الحرارية، بينما الكوارتز شفاف للأشعة الضوئية والأشعة فوق البنفسجية ولكنه غير شفاف للأشعة الحرارية (هذه الخصائص لزجاج النوافذ والكوارتز تستخدم بصورة واسعة في الصناعة).

تعتبر الأجسام الصلبة والسائلة عملياً غير شفافة للأشعة الحرارية، وامتصاص طاقة الإشعاع عند هذه الأجسام كما هي القاعدة، تتناهى على عمق ضئيل جداً (أقل من $0.01mm$)، لهذا يمكن القول عن امتصاص الطاقة لسطح الأجسام الصلبة والسائلة.

ندعو الجسم الذي يمتص بنفس الدرجة الشعاع الساقط عليه بجميع أطوال الموجات عند درجات حرارة مختلفة بالجسم الرمادي وفي حالة معاكسة ندعوه الجسم الملون (الغير حديدي). تعتبر جميع الأجسام الحقيقية وبصورة تقريبية رمادية. عند ذلك فإن معامل الامتصاص للمعادن (وسطي وفق طول الموجات) يزداد مع ازدياد درجة الحرارة، بينما ينخفض عند اللامعادن.

يجب التنويه، إلى أنه من اجل امتصاص وانعكاس الأشعة الحرارية فإن العامل الأساسي هو ليس اللون بل حالة سطح الجسم، على سبيل المثال فإن السطح الأبيض

يعكس جيداً فقط الأشعة الملونة أما الأشعة الحرارية الغير مرئية فإنه يمتصها جيداً كما لو كان غامقا.

تكون الإشعاعات الحرارية والتي تصدر عن الأجسام، غير مرئية وذلك عند درجات الحرارة العادية يتركز معظمها حول أطوال موجية أطول بكثير من طول موجة الضوء المرئي، برفع درجة حرارة الجسم عن طريق تسخينه، تزداد الطاقة المنطلقة منه وتصبح الأطوال الموجية لتلك الصادرة عنه أقصر . عندما تصبح درجات الحرارة في المجال $600-700°C$ فإن الجسم يتوهج ومع استمرار تسخينه يصبح لونه أحمر ويزداد سطوعه حتى إن لونه يتحول إلى الأبيض.

في الحالة العامة فإن الدور الحاسم في امتصاص وانعكاس طاقة الإشعاع تلعبه خشونة سطح الجسم فكلما كانت الخشونة أكبر كبرت طاقة الإشعاع والانعكاس لهذا الجسم. بقي أن نقول إنه في الطبيعة لا توجد أجسام مطلقة السواد أو البياض أو مطلقة الشفافية.

17-2: القوانين الأساسية للإشعاع الحراري

17-2-1: قانون بلانك

توصل بلانك في عام (1900) إلى علاقة بين الكثافة الطيفية لتيار الإشعاع للجسم المطلق السواد $I_{0\lambda}$ في الفضاء بدلالة درجة الحرارة المطلقة T وطول الموجة λ وهي من الشكل:

$$I_{0\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \qquad (5\text{-}17)$$

حيث λ طول الموجة،

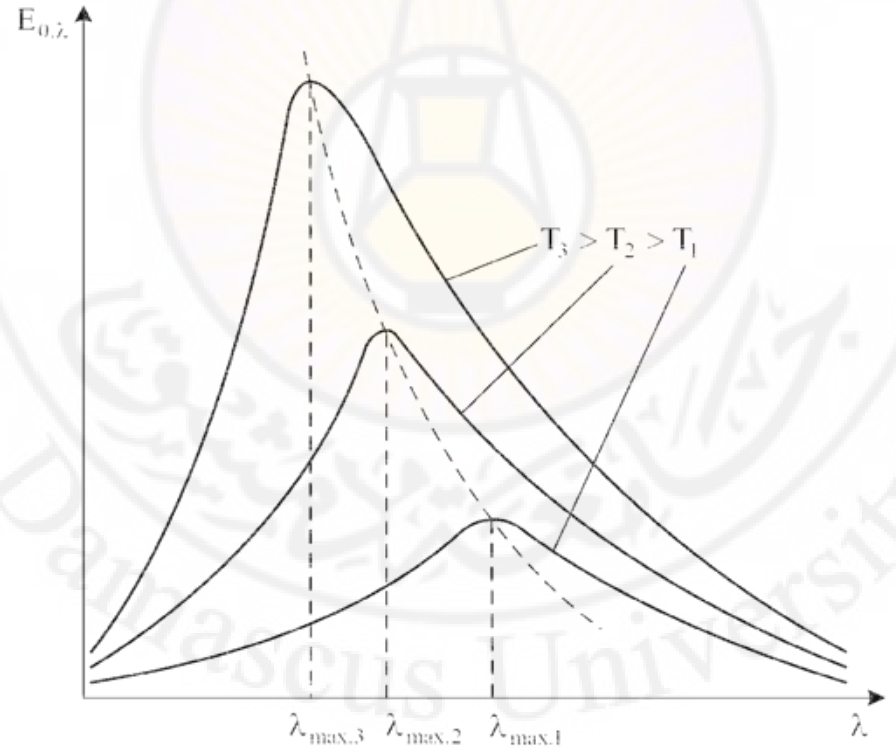
T درجة الحرارة المطلقة للجسم،

c_1, c_2 ثابتين حيث $c_1 = 3.74 \times 10^{-16} W/m^2$ ، $c_2 = 0.0144 mK$ ،

الدليل 0 يدل على أن الجسم مطلق السواد.

تبقى العلاقة السابقة (17-5) صحيحة من أجل الهواء ولبعض الغازات الأخرى والتي معامل الانكسار لها قريب من الواحد. يبين الشكل (17-2) تمثيلا بيانيا لقانون بلانك وكما نلاحظ من الشكل أن منحني فعالية الإشعاع، عند أية درجة حرارة ثابتة $T_1, T_2, T_3, \ldots$ ، لـ λ يحتوي على نهاية عظمى موافقة لـ $\lambda_{opt}(T)$ فعند القيم الصغيرة لـ λ $(\lambda < \lambda_{opt}(T))$ تزداد فعالية الإشعاع مع ازدياد λ. وعند القيم الكبيرة لـ λ $(\lambda > \lambda_{opt}(T))$ فإن فعالية الإشعاع تتناقص مع تزايد λ.

أما تبعية فعالية الإشعاع لدرجة الحرارة فهي طردية عند أية قيمة لـ λ أي أن هذه الفعالية تزداد مع ازدياد درجة الحرارة. تمثل الطاقة الإشعاعية للجسم عند درجة حرارة محددة T على الشكل (17-2) بالمساحة الواقعة تحت الإيزوترم الموافق. واضح من الشكل أن الطاقة الإشعاعية للجسم تزداد مع ازدياد درجة حرارته.



الشكل(17-2): علاقة فعالية الإشعاع للجسم المطلق السواد بطول الموجة

17-2-2: قانون الإزاحة فين

يمكن تحديد طول الموجة الموافق لكثافة تيار الإشعاع الأعظمية من قانون بلانك وذلك بإيجاد النهاية العظمى للتابع (العلاقة 17-5) أي بحل المعادلة $\frac{dE_{o\lambda}}{d\lambda}=0$ حيث نحصل على:

$$\lambda_{opt}=\frac{2.9\times10^{-3}}{T}$$

أو:

$$\lambda_{opt}T=2.9\times10^{-3} \qquad (6\text{-}17)$$

إن العلاقة (17-6) هي الشكل الرياضي لقانون فين ومن الشكل (17-2) نلاحظ أنه إذا كانت $T_1<T_2<T_3$ فإن $\lambda_1>\lambda_2>\lambda_3$ أي أنه مع ازدياد درجة الحرارة فإن شدة الإشعاع الأعظمية تنزاح باتجاه الطول الأقصر للموجة.

17-2-3: قانون ستيفان-بولتسمان

تم الحصول على هذا القانون عام (1879) وذلك بالطرائق التجريبية على يد العالم التشيكي ستيفان وبالطرائق النظرية عام (1884) على يد العالم النمساوي بولتسمان وهو يربط بين قابلية إشعاع الجسم المطلق السواد E_o ودرجة حرارته المطلقة:

$$E_o=\int_0^{\infty}E_{o\lambda}\,d\lambda=\sigma_o T^4 \qquad (7\text{-}17)$$

$\sigma_o=5.77\times10^{-8}W/m^2K^4$ ثابت ستيفان- بولتسمان.

إن الإشعاع التكاملي للجسم مطلق السواد عند درجة حرارة معطاة في المجال من $\lambda=0$ وحتى $\lambda\to\infty$ يمثل بالمساحة التي يحصرها المنحني $T=const.$ مع محور λ على (الشكل 17-2). لتبسيط الحسابات فإن العلاقة (17-7) تكتب بالشكل:

$$E_o=c_o\left(\frac{T}{100}\right)^4 \qquad (8\text{-}17)$$

حيث $c_o=5.77W/m^2K^4$ معامل للجسم المطلق السواد للأجسام الحقيقية أي الأجسام غير مطلقة السواد (الأجسام الرمادية). يعبر عن كثافة تيار الإشعاع بالصيغة (17-8):

$$E=c\left(\frac{T}{100}\right)^4$$

ولكن قيمة c تنسب عندها للأجسام الرمادية.

لمقارنة كثافتي تياري الإشعاع للجسمين المطلق السواد والرمادي (وذلك عند درجة الحرارة نفسها) نستخدم البارامتر ε المسمى درجة سواد الجسم:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{c}{c_0} \qquad (9\text{-}17)$$

إن قانون ستيفان–بولتسمان للأجسام الرمادية يكتب بالشكل:

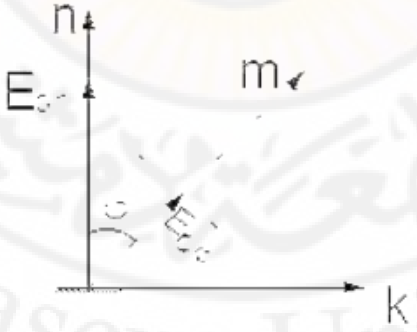
$$E = \varepsilon \sigma_0 T^4 = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4$$

حيث $c = \varepsilon c_0$ معامل إشعاع الجسم الرمادي.

إن قيم ε للأجسام الرمادية دائماً أصغر من الواحد وهي تتعلق بطبيعة الجسم ودرجة حرارته ويتم إيجادها بالطرائق التجريبية.

4-2-17: قانون لامبرت

إن توزع طاقة الإشعاع التي يصدرها الجسم مطلق السواد في الاتجاهات المختلفة من الفراغ ليس منتظماً. في عام (1760) توصل العالم الألماني لامبرت إلى علاقة تربط بين قيمة طاقة الإشعاع وجهة انتشارها. الشكل الرياضي لقانون لامبرت من أجل كثافة تيار الإشعاع وبالاتجاه m الذي يشكل مع الناظم n على سطح الإشعاع زاوية φ، انظر الشكل (17-3) هو:



الشكل (17-3): شرح قانون لامبرت

$$E_{n\varphi} = E_{nn} \cos\varphi \qquad (10\text{-}17)$$

حيث I_{0n} كثافة التيار الإشعاعي للجسم المطلق السواد بالاتجاه الناظمي على السطح $(\varphi = 0)$.

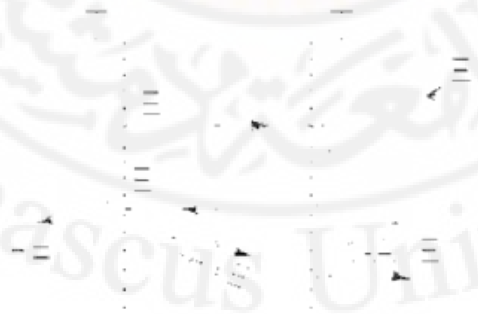
من العلاقة (17-10) نجد أنه في الاتجاه الناظمي على السطح $(\varphi = 0)$ تُطلق بالإشعاع أكبر كمية من الطاقة ومع زيادة φ فإن كمية الطاقة المنطلقة بالإشعاع تتناقص وعند $\varphi = 90°$ تصبح مساوية للصفر.

17-2-5: قانون كيرشوف

يصف هذا القانون العلاقة بين إمكانية الجسم لامتصاص الطاقة وإصدارها، هذه العلاقة يمكن الحصول عليها من دراسة التوازن الترموديناميكي للتبادل الحراري الإشعاعي بين سطحين متوازيين، الشكل (17-4).

السطح الأيسر رمادي بينما السطح الأيمن مطلق السواد. لتكن T درجة حرارة السطح الرمادي و A قابلية امتصاصه و I كثافة تياره الإشعاعي الذاتي وسنرمز للقيم المماثلة والخاصة بالسطح المطلق السواد بـ I_0, A_0, T_0.

الجسم المطلق السواد يمتص كامل الإشعاع الذاتي للسطح الرمادي وخلال الفترة الزمنية نفسها يطلق الجسم المطلق السواد تيارا كثافته I_0 يمتصه الجسم الرمادي جزئيا ما قيمته AI_0 ويعكس جزئيا ما قيمته $(1-A)I_0$. الجزء المنعكس يمتصه من جديد الجسم المطلق السواد وبالتالي فإن كثافة تيار الإشعاع الناتج للحالة $I > I_0$ تحسب من موازنة الطاقة للسطح الرمادي:



الشكل (17-4): استخراج قانون كيرشوف

$$q = E - A E_{\omega} \tag{11-17}$$

عند $T = T_{\omega}$ تكون المجموعة في حالة توازن ترموديناميكي أي أن السطحين يتبادلان الحرارة بالإشعاع لكن كمية الحرارة $q = 0$ وعندها تتخذ العلاقة (11-17) الشكل:

$$E - A E_{\omega} = 0 \;\Rightarrow\; E_{\omega} = \frac{E}{A} \tag{12-17}$$

تعميم العلاقة (12-17) مقبول من أجل أية أجسام رمادية وبالتالي:

$$E_{\omega} = \frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \frac{E_3}{A_3} = ... \tag{13-17}$$

العلاقة (13-17) هي الشكل الرياضي لقانون كيرشوف والذي ينص على أن نسبة كثافة تيار الإشعاع لجسم رمادي إلى قابلية امتصاصه لا تتعلق بطبيعة الجسم وتساوي كثافة تيار الإشعاع للجسم المطلق السواد الذي له درجة الحرارة نفسها.

ولما كان $\varepsilon = \frac{E}{E_{\omega}}$ فإنه ومن العلاقة (12-17) نجد:

$$\varepsilon = A \tag{14-17}$$

وهذه هي الصيغة الثانية لقانون كيرشوف والتي تنص على أنه في حالة التوازن الترموديناميكي فإن قابلية الامتصاص للجسم ودرجة سواده متساويتان عدديا. ومن قانون كيرشوف يمكن استخلاص النتائج التالية:

أ- كلما كبرت خاصية الجسم لإصدار الطاقة الإشعاعية كبرت خاصيته لامتصاص الطاقة الإشعاعية.

ب-كلما صغرت قابلية امتصاص الجسم صغرت قابليته لإصدار الإشعاع وعليه فإن الأجسام التي تعكس الطاقة الإشعاعية تشع القليل (قابلية إشعاع الجسم المطلق مساوية للصفر). وعليه لتخفيض الضياعات الحرارية من التجهيزات يجب أن تكون لسطوحها أصغر قيمة لـ ε.

ت- عند درجة حرارة واحدة فإن القابلية الإشعاعية للجسم مطلق السواد هي دائما أكبر من القابلية الإشعاعية للجسم الرمادي.

الفصل الثامن عشر

انتقال الحرارة والمبادلات الحرارية

- انتقال الحرارة من وسط لآخر عبر جدار
  - جدار مستو متجانس وحيد الطبقة
  - جدار مستو متجانس متعدد الطبقات
  - جدار أسطواني متجانس وحيد الطبقة
  - جدار أسطواني متجانس متعدد الطبقات
- المبادلات الحرارية
  - المبادلات الحرارية المزجية
  - المبادلات الحرارية السطحية
- الحساب الحراري للمبادلات الحرارية السطحية
  - فرق درجة الحرارة الوسطي اللغاريتمي للمبادلات الحرارية ذات التأثير المستمر
- مسائل غير محلولة

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الثامن عشر

انتقال الحرارة والمبادلات الحرارية

18-1: انتقال الحرارة من وسط لآخر عبر جدار

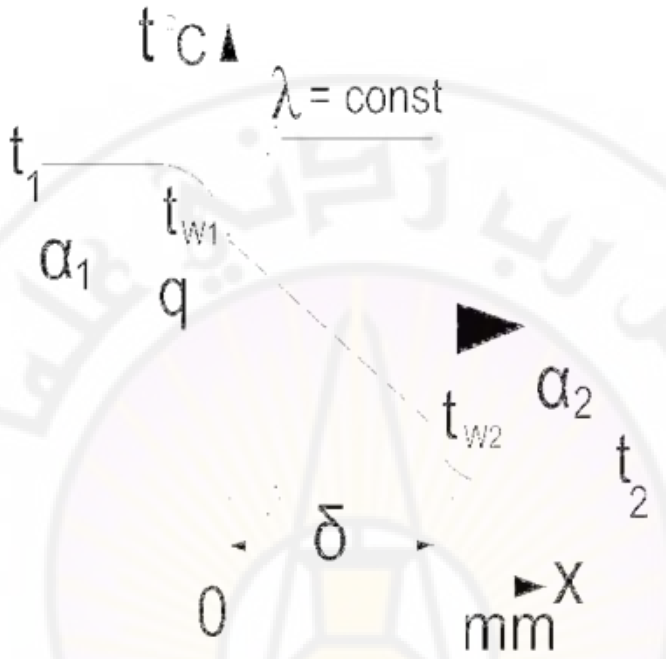
انتقال الحرارة من وسط (سائل أو غاز) إلى وسط آخر عبر جدار فاصل بينهما ندعوه بانتقال الحرارة الإجمالي وكأمثلة عن هذا النوع من انتقال الحرارة نورد انتقال الحرارة من المياه الساخنة المارة ضمن مشعات التدفئة إلى هواء المكان المراد تدفئته وذلك عبر جدران المشع المعدنية وكذلك يمكن أن نورد انتقال الحرارة من أبخرة وسائط التبريد المحمصة الخارجة من ضاغط آلة التبريد الضاغطة البخارية إلى المكثف عبر جدران الأخير (الشبك الأسود الموجود خلف البراد) حيث تطرح فيه كمية من الحرارة عبر جدران أنابيبه إلى مياه التبريد أو الهواء الجوي الخ...

في مثل هذه الحالات يجب أن تتمتع جدران أنابيب المكثف أو المشعات بخاصية جيدة لانتقال الحرارة من أحد الوسطين إلى الآخر لهذا فإن المواد التي تصنع منها الأنابيب يجب أن تمتاز بقيم عالية للموصلية الحرارية. في الحالات المعاكسة عندما يراد تخفيض الضياعات الحرارية إلى الوسط المحيط فإنه من المفضل عزلها بمواد عازلة حراريا (على سبيل المثال في مستودعات التبريد وبغية الحفاظ على درجة حرارة منخفضة بصورة مستمرة والضرورية من أجل حفظ المواد الغذائية المراد تخزينها لفترات طويلة فإننا نقوم بعزل الجدران والأسقف والأرضيات بمواد عازلة حراريا، أو عندما يراد الحفاظ على درجة حرارة المياه الساخنة ضمن أنابيب شبكة التدفئة المركزية القادمة من المرجل إلى المشعات حيث تعزل تلك الأنابيب بعازل حراري). من أجل هذه الغاية لندرس آلية انتقال الحرارة من وسط ساخن درجة حرارته t_1 إلى وسط بارد درجة حرارته t_2 وذلك عبر:

18-1-1: جدار مستو متجانس وحيد الطبقة

نفرض لدينا جدار مستو وحيد الطبقة سماكته δ ومعامل التوصيل الحراري لمادة الجدار $\lambda = const.$ كما هو مبين بالشكل (18-1). يفصل هذا الجدار بين وسطين

أحداهما ساخن درجة حرارته $t_1 = const.$ والآخر بارد درجة حرارته $t_2 = const.$ (أي تتحقق المتراجحة $t_1 > t_2$).



الشكل (18-1): انتقال الحرارة عبر جدار مستو متجانس وحيد الطبقة

إن آلية انتقال الحرارة تتم من الوسط الساخن إلى سطح الجدار الساخن ذي درجة الحرارة t_{w1} الملامس للوسط الساخن عن طريق الحمل حيث أن معامل انتقال الحرارة من الوسط الساخن إلى سطح الجدار α_1 معلوم وثابت. تستمر عملية انتقال الحرارة ضمن مادة الجدار بالتوصيل (كما ذكرنا فإن $\lambda = const.$). تنقل الحرارة بعدها من السطح البارد للجدار ذي درجة الحرارة t_{w2} إلى الوسط البارد بالحمل حيث معامل انتقال الحرارة الحملي α_2 معلوم وثابت. والمطلوب: تحديد درجتي الحرارة على سطحي الجدار t_{w1} و t_{w2} وشدة التيار الحراري الذي يعبر هذا الجدار المستوي q.

تحسب شدة التيار الحراري بالحمل من الوسط الساخن إلى الجدار بالعلاقة (3-16):

$$q = \alpha_1 (t_1 - t_{w1}) \qquad (3\text{-}16)$$

وبالتوصيل عبر الجدار بالعلاقة (14-16):

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{w1} - t_{w2})$$

وبالحمل من الجدار إلى الوسط البارد بالعلاقة (3-16):

$$q - \alpha_2(t_{w2} - t_2)$$

إن شدة التيار الحراري q في جميع العلاقات السابقة واحدة وثابتة وذلك عند استقرار النظام الحراري وبالتالي:

$$t_1 - t_{w1} = \frac{q}{\alpha_1}$$

$$t_{w1} - t_{w2} = \frac{q\delta}{\lambda}$$

$$t_{w2} - t_2 - \frac{q}{\alpha_2}$$

بجمع المعادلات الثلاث الأخيرة نحصل على:

$$t_1 - t_2 = \frac{q}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \qquad (1\text{-}18)$$

وبالتالي شدة التيار الحراري:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

أو بشكل مختصر:

$$q = k(t_1 - t_2) \quad , \quad k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \qquad (2\text{-}18)$$

يسمى العامل k بعامل انتقال الحرارة الإجمالي من وسط إلى وسط آخر وهو بالمقارنة مع معامل انتشار الحرارة a ومعامل التوصيل الحراري λ لا يمكن أن نعده صفة فيزيوحرارية للمادة وهو يصف فعالية انتقال الحرارة وواحدته $\left[W/m^2K\right]$.

يعرف عامل انتقال الحرارة الإجمالي k بأنه هو كمية الحرارة المنتقلة من وسط إلى آخر عبر واحدة مساحة الجدار في واحدة الزمن وذلك عند فرق بين درجتي حرارة الوسطين مقداره $1°C$.

يسمى مقلوب k المقاومة الحرارية ونرمز لها $R = \frac{1}{k}$ وواحدتها $\left[m^2K/W\right]$ والمقاومة الحرارية لحالة جدار مستوي مؤلف من طبقة واحدة:

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \qquad (3\text{-}18)$$

إن كل حد من حدود المعادلة (3-18) هو مقاومة حرارية:

$R_1 = \frac{1}{\alpha_1}$: المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة بالحمل من الوسط الساخن إلى سطح الجدار.

$R_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda}$: المقاومة الحرارية بالتوصيل للجدار.

$R_2 = \frac{1}{\alpha_2}$: المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة بالحمل من سطح الجدار البارد إلى الوسط البارد.

$$R = R_1 + R_{\lambda} + R_2 \qquad (3'\text{-}18)$$

يتم تحديد درجات الحرارة على سطحي الجدار من العلاقات التالية:

$$t_{w1} = t_1 - q\frac{1}{\alpha_1}$$

$$t_{w2} = t_2 + q\frac{1}{\alpha_2}$$

18-1-2: جدار مستو متجانس متعدد الطبقات

إذا كان الجدار المستوي مؤلفاً من عدة طبقات متلاصقة بإحكام، انظر الشكل (2-18) (وذلك منعاً لوجود فجوات هوائية) (يمكن ملاحظة هذه التركيبة في الصناعة على سبيل المثال عند اتساخ أحد سطحي الجدار بطبقة هباب الفحم أو رماد، أما على السطح الآخر فيترسب طبقة من الكلس، وعندها فإنه تزداد المقاومة الحرارية الإجمالية للجدار

وذلك لكون معاملات التوصيل الحراري لمادة الرماد والكلس وهباب الفحم ليست كبيرة) فإن معامل انتقال الحرارة الإجمالي من الوسط الساخن ذي درجة الحرارة t_1 إلى الوسط البارد ذي درجة الحرارة t_2 عبر الجدار المركب والمؤلف من n طبقة مختلفة معاملات توصيلها $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \ldots, \lambda_n$ يساوي إلى:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \ldots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}} \qquad (4\text{-}18)$$

أو :



الشكل (18-2): انتقال الحرارة عبر جدار مستو مؤلف من عدة طبقات متلاصقة بإحكام

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \qquad (5\text{-}18)$$

أما التدفق الحراري عبر جدار مركب مساحته A فيحدد من العلاقة:

$$Q = q\,A = k\,A(t_1 - t_2) = k\,A\,\Delta t \qquad (6\text{-}18)$$

حيث Δt ضاغط درجة الحرارة.

لتحديد درجة الحرارة عند المستوي الفاصل بين طبقتين متجاورتين i و $i+1$ نستخدم العلاقة:

$$t_{w,i+1} - t_1 = q\left[\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i}\frac{\delta_i}{\lambda_i}\right] \qquad (7\text{-}18)$$

بالعودة إلى المعادلة (18-6) نجد أنه عند معرفة ضاغط درجة الحرارة وثبات مساحة سطح التبادل الحراري فإن القيمة التي تلعب دوراً مؤثراً على انتقال الحرارة هي عامل انتقال الحرارة الإجمالي k.

تعد زيادة فعالية انتقال الحرارة في المبادلات الحرارية من أنجع الطرائق المستخدمة لتخفيض أبعادها وبالتالي التقليل من كلفتها ويمكن التوصل إلى هذه الزيادة عن طريق تحليل الحدود الداخلة في العامل k. فمثلاً من أجل جدار معدني نظيف سماكته صغيرة بالمقارنة مع معامل توصيله الحراري (أي $\frac{\delta}{\lambda} \to 0$) فإن العلاقة (18-2) تؤول إلى الشكل التالي:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_1}} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \qquad (8\text{-}18)$$

من هنا نلاحظ أن قيمة عامل انتقال الحرارة الإجمالي k هي دوماً أصغر من أصغر قيمة أي من الحدين α_1 أو α_2. لنفسر ذلك من خلال المثال العددي التالي:

$\alpha_1 \left[W/m^2K\right]$	10	10	50
$\alpha_2 \left[W/m^2K\right]$	2,000	4,000	2,000
$k \left[W/m^2K\right]$	9.95<10	9.99<10	48.7<50

من المعطيات السابقة يمكن أن نستخلص النتائج التالية:

١) عندما $\alpha_2 >> \alpha_1$ فإن زيادة القيمة الأكبر لمعامل انتقال الحرارة بالحمل (هنا α_2) لا يعطي زيادة في قيمة k.

٢) يزداد k بزيادة القيمة الأصغر لمعامل انتقال الحرارة بالحمل (هنا α_1) وبهذه الصورة عندما $\alpha_2 >> \alpha_1$ فإنه يمكن أن نفترض $k \approx \alpha_1$ بينما عندما $\alpha_2 >> \alpha_1$ فإن $k \approx \alpha_2$.

مثال 18-1

حدد التدفق الحراري من الغازات إلى الهواء وشدة التيار الحراري عبر غلاف المرجل ذي المساحة $A = 120 m^2$ المصنوع من الآجر، إذا علمت أن درجة حرارة الهواء $t_2 = 30°C$، معامل انتقال الحرارة من الغازات إلى سطح الجدار $\alpha_1 = 23.6 W/m^2K$ أما معامل انتقال الحرارة من سطح الجدار إلى الهواء فهو $\alpha_2 = 9.3 W/m^2K$. معامل التوصيل الحراري للغلاف الآجري $\lambda = 0.81 W/mK$ أوجد كذلك درجتي حرارة السطحين الداخلي والخارجي للغلاف.

الحل

نجد معامل انتقال الحرارة الإجمالي k:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{23.6} + \frac{0.25}{0.81} + \frac{1}{9.3}} = 2.18 W/m^2K$$

التدفق الحراري:

$$Q = k A (t_1 - t_2) = 2.18 \times 120 (600 - 30) = 149{,}000 W = 149 kW$$

أما شدة التيار الحراري (لواحدة السطح):

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{149 \times 10^3}{120} = 1{,}245 W/m^2$$

درجة حرارة سطح الغلاف من جهة الغازات:

$$t_{w1} = t_1 - q R_1 = t_1 - \frac{q}{\alpha_1} = 600 - \frac{1{,}245 \times 10^3}{23.6} = 546°C$$

أما درجة حرارة سطح الغلاف من جهة الهواء الخارجي:

$$t_{w2} = t_2 + q R_2 = 30 + \frac{1{,}245 \times 10^3}{9.3} = 164°C$$

مثال 18-2

حدد شدة التيار الحراري q عبر جدار مستوٍ فولاذي سماكته $\delta = 10 mm$ ومعامل توصيله الحراري $\lambda = 50 W/mK$، درجة حرارة الغازات $t_1 = 1{,}127°C$ ودرجة

حرارة المياه المسخنة $t_2 = 227°C$، معامل انتقال الحرارة بالحمل من الغازات إلى الجدار $\alpha_1 = 100 W/m^2K$ ومن الجدار إلى المياه الساخنة $\alpha_2 = 5{,}000 W/m^2K$، حدد كذلك درجات حرارة السطوح وعامل انتقال الحرارة الإجمالي عبر الجدار k. أوجد الحساب للحالتين التاليتين:

أ- سطح التسخين نظيف،

ب-نتيجة الاستثمار يتشكل على سطح التسخين طبقة مترسبة من هباب الفحم سماكتها $\delta = 2 mm$ ومعامل توصيله الحراري $\lambda = 0.09 W/mK$. حدد بكم مرة سينخفض عامل انتقال الحرارة الإجمالي k نتيجة ظهور طبقة الهباب.

الحل

أ- شدة التيار الحراري في هذه الحالة تتحدد من المعادلة (18-2):

$$q = k(t_1 - t_2)$$

حيث k عامل انتقال الحرارة الإجمالي لحالة الجدران المستوية والمساوي لـ:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

بالتعويض نجد:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{0.01}{50} + \frac{1}{5{,}000}} = 96.2 W/m^2K$$

$$q = 96.2 \times (1{,}127 - 227) = 86{,}600 W/m^2$$

درجة حرارة سطح الجدار من جهة الغازات:

$$t_{w1} = t_1 - \frac{q}{\alpha_1} = 1{,}127 - \frac{86{,}600}{100} = 261°C$$

درجة حرارة سطح الجدار من جهة المياه:

$$t_{w2} = t_2 + \frac{q}{\alpha_2} = 227 + \frac{86{,}600}{5{,}000} = 244.3°C$$

ب-

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{0.002}{0.09} + \frac{0.01}{50} + \frac{1}{5,000}} = 30.7 W/m^2 K$$

وبالتالي شدة التيار الحراري لهذه الحالة:

$$q = k(t_1 - t_2) = 30.7(1,127 - 227) = 27,600 W/m^2$$

درجة حرارة السطح الخارجي لطبقة الهباب (من جهة غازات الاحتراق):

$$t_{w1} = 1,127 - \frac{27,600}{100} = 851°C$$

درجة حرارة السطح الداخلي لطبقة الهباب (المتلامسة مع جدار الأنبوب):

$$t_{w2} = t_{w1} - q\frac{\delta_1}{\lambda_1} = 851 - 27,600 \times \frac{0.002}{0.09} = 238°C$$

درجة حرارة السطح الداخلي للجدار (من جهة الماء):

$$t_{w3} = 227 + \frac{27,600}{5,000} = 232,5°C$$

وكما نلاحظ أن وجود طبقة هباب الفحم (السخام) بسماكة $\delta = 2mm$ على سطح الجدار يعمل على تخفيض معامل انتقال الحرارة الإجمالي بمقدار 3.13 مرة.

3-1-18: جدار أسطواني متجانس وحيد الطبقة

تتحدد استطاعة التيار الحراري المنتقل من السائل الساخن إلى السائل البارد عبر جدار أسطواني بالطريقة نفسها المتبعة لحالة الجدران المستوية.

بفرض لدينا سائل ساخن درجة حرارته t_1 يجري داخل أنبوب طوله l وقطراه الداخلي d_1 والخارجي d_2. معامل التوصيل الحراري لمادة جدار الأنبوب $\lambda = const.$، ينساب على سطحه الخارجي سائل بارد درجة حرارته t_2، الشكل(3-18). بفرض أن معامل انتقال الحرارة بالحمل من الوسط الساخن إلى السطح الخارجي للأنبوب $\alpha_1 = const.$ ومن السطح الداخلي للأنبوب إلى السائل البارد $\alpha_2 = const.$ وأن درجتي الحرارة $t_1 = const, t_2 = const.$.

إذا كانت نسبة طول الأنبوب / إلى سماكته δ أكبر بكثير من الواحد يصبح بالإمكان إهمال الضياعات الحرارية من نهايتي الأنبوب. في النظام الحراري المستقر تكون شدة التيار الحراري المنتقل بالحمل من السائل الساخن إلى السطح الداخلي لجدار الأنبوب مساوية لشدة التيار الحراري المنتقل بالتوصيل عبر الجدار ومساوية لشدة التيار الحراري المنتقل بالحمل من السطح الخارجي لجدار الأنبوب إلى الوسط البارد أي:

$$q_l = \frac{Q}{l} = \alpha_1 A(t_1 - t_{w1}) = \alpha_1 \pi d_1 (t_1 - t_{w1}) \qquad (9\text{-}18)$$

$$q_l = \frac{2\lambda\pi(t_{w1} - t_{w2})}{\ln\frac{d_2}{d_1}} \qquad (9'\text{-}18)$$

$$q_l = \alpha_2 \pi d_2 (t_{w2} - t_2) \qquad (9''\text{-}18)$$



الشكل (18-3): انتقال الحرارة الاجمالي عبر جدار اسطواني وحيد الطبقة

نحصل من المعادلات السابقة على فرق درجات الحرارة كالتالي:

$$t_1 - t_{w1} = q_l \frac{1}{\pi d_1 \alpha_1}$$

$$t_{w1} - t_{w2} - q_l \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}$$

$$t_{w2} - t_2 = q_l \frac{1}{\pi d_2 \alpha_2}$$

بجمع العلاقات الثلاثة الأخيرة نجد ضاغط درجة الحرارة الكلي:

$$t_1 - t_2 = \Delta t = \frac{q_l}{\pi}\left(\frac{1}{d_1\alpha_1} + \frac{1}{2\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2\alpha_2}\right) \quad (10\text{-}18)$$

$$q_l = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{d_1\alpha_1} + \frac{1}{2\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2\alpha_2}} \quad (11\text{-}18)$$

أو بشكل مختصر:

$$q_l = \pi k_l (t_1 - t_2) \quad (11'\text{-}18)$$

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{d_1\alpha_1} + \frac{1}{2\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2\alpha_2}} \quad (12\text{-}18)$$

حيث k_l: عامل انتقال الحرارة الإجمالي الخطي والذي يشير إلى كمية الحرارة التي تعبر جدار أسطواني طوله $1m$ خلال $1s$ وعند فرق درجتي حرارة الوسيطين الحراريين مقداره $1°C$.

بإدخال مفهوم المقاومة الحرارية الإجمالية الخطية وهي مقلوب k_l يمكن التعبير عن R_l على النحو التالي:

$$R_l = \frac{1}{k_l} = \frac{1}{d_1\alpha_1} + \frac{1}{2\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2\alpha_2} \quad (13\text{-}18)$$

$$R_l = R_{l1} + R_{lw} + R_{l2} \quad (14\text{-}18)$$

يمثل الحد الأوسط في هذه العلاقة R_{lw} المقاومة الحرارية بالتوصيل لمادة الجدار، بينما الحدين الآخرين R_{l1}, R_{l2} المقاومتين الحراريتين لانتقال الحرارة بالحمل لكل من السطح الداخلي والخارجي على التوالي.

من العلاقة الأخيرة نلاحظ أن المقاومة الحرارية الخطية R_{li} من الوسط إلى الجدار وبالعكس تتعلق بقيم d_i, α_i أي: $R_{l1} = f(d_1, \alpha_1), R_{l2} = f(d_2, \alpha_2)$.

بالنتيجة التدفق الحراري الكلي المنتقل من الوسط الساخن إلى الوسط البارد عبر الجدار الأسطواني وحيد الطبقة يتحدد بالعلاقة:

$$Q = q_l \, l = \pi k \, \Delta t \, l \qquad (15\text{-}18)$$

تتحدد درجتي الحرارة المجهولتين على السطحين الداخلي t_{w1} والخارجي t_{w2} لجدار الأنبوب من العلاقات:

$$t_{w1} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{d_1 \alpha_1} \qquad (16\text{-}18)$$

$$t_{w2} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \right) \qquad (17\text{-}18)$$

أو:

$$t_{w2} = t_2 + \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{d_2 \alpha_2} \qquad (18\text{-}18)$$

4-1-18: جدار أسطواني متجانس متعدد الطبقات

في حالة انتقال الحرارة من وسط ساخن إلى آخر بارد عبر جدار أسطواني متعدد الطبقات (انظر الشكل 18-4) فإن k_l تحسب بالمعادلة:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{d_1 \alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{d_2 \alpha_2}} \qquad (19\text{-}18)$$

والمقاومة الحرارية الإجمالية الخطية:

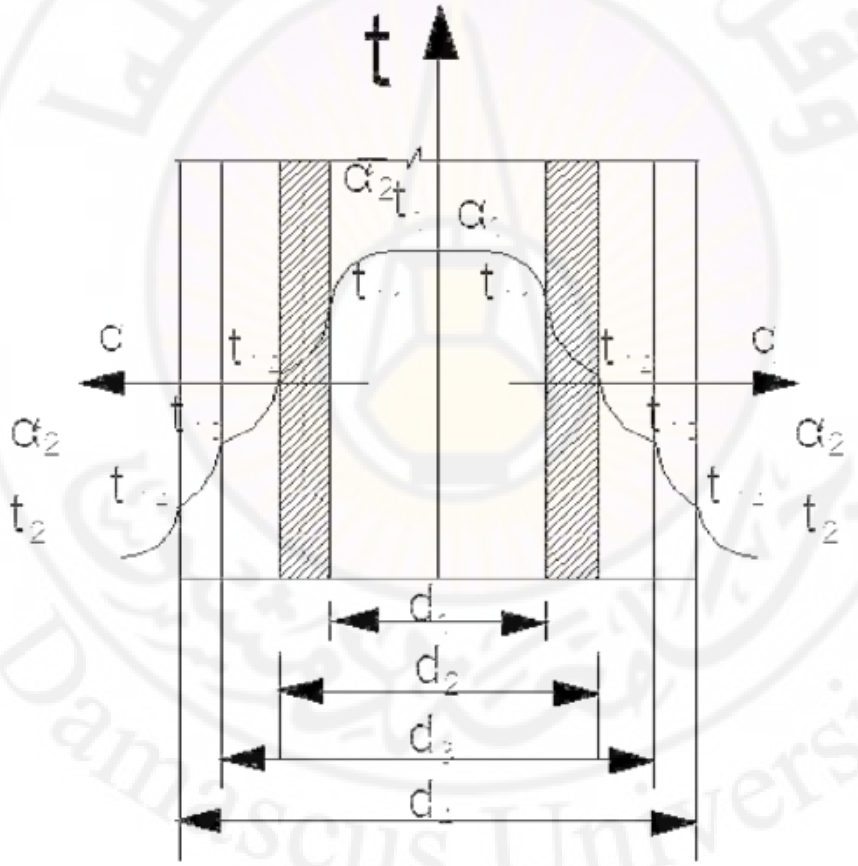
$$R_l = \frac{1}{k_l} = \frac{1}{d_1 \alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{d_2 \alpha_2} \qquad (20\text{-}18)$$

نحدد كثافة التيار الحراري منسوبا إما إلى السطح الداخلي A_1 أو على السطح الخارجي A_2 انطلاقا من العلاقة المعروفة:

$$q_1 = \frac{q_l}{\pi d_1} \quad , \quad q_2 = \frac{q_l}{\pi d_2}$$

$$q_1 = \frac{k_l}{d_1}\Delta t = k_1 \Delta t \quad , \quad q_2 = \frac{k_l}{d_2}\Delta t = k_2 \Delta t$$

حيث k_1, k_2 معاملي انتقال الحرارة الإجمالي للجدران الأسطوانية منسوبين إلى واحدة السطح الداخلي أو الخارجي على التوالي، ويتحددان بالعلاقتين:



الشكل (18-4) انتقال الحرارة الاجمالي عبر جدار اسطواني متعدد الطبقات

$$k_1 = \frac{k_l}{\pi d_1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{d_i}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{d_1}{d_2}\frac{1}{\alpha_2}} \quad (21\text{-}8)$$

$$k_2 = \frac{k_l}{\pi d_2} = \frac{1}{\frac{d_2}{d_1}\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{d_i}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (22\text{-}8)$$

أما درجات الحرارة المجهولة على حدود الفصل بين الطبقات يمكن أن يتم تحديدها بيانيا أو تحليلا (انظر الفقرة 14-3-2).

عند استعمال جدران أسطوانية رفيعة (نحيفة) فإن قيمتي k_1, k_2 تتحددان بنفس العلاقة (18-1) (لحالة الجدران المستوية).

مثال 18-3

يغلف أنبوب بخار فولاذي قطراه $\frac{d_2}{d_1} = \frac{200mm}{180mm}$ ومعامل توصيله الحراري $\lambda_1 = 50W/mK$ بطبقة مقاومة للحرارة سماكتها $\delta_2 = 50mm$ و $\lambda_2 = 0.18W/mK$ وتغلف طبقة العزل المذكورة طبقة فلين سماكتها $\delta_3 = 50mm$ ومعامل توصيلها $\lambda_3 = 0.06W/mK$. فإذا علمت أن درجة حرارة البخار الجاري في الأنبوب $t_1 = 427°C$ ودرجة حرارة الهواء الخارجي $t_2 = 27°C$ وأن معامل انتقال الحرارة بالحمل من البخار إلى الأنبوب $\alpha_1 = 200W/m^2K$ ومن سطح العازل الفليني إلى الهواء $\alpha_2 = 10W/m^2K$ أوجد الضياعات الحرارية لـ $1m$ من أنبوب البخار وكذلك درجات الحرارة على سطوح طبقاته المختلفة.

الحل:

معامل انتقال الحرارة الإجمالي لجدار أسطواني متعدد الطبقات يحسب من العلاقة (19-18):

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{d_1\alpha_1} + \frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_3}\ln\frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{d_4\alpha_2}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{0.18\times 2000} + \frac{1}{100}\ln\frac{200}{180} + \frac{1}{0.36}\ln\frac{300}{200} + \frac{1}{0.12}\ln\frac{400}{300} + \frac{1}{0.4\times 10}}$$

$$= 0.263 W/mK$$

وبالتالي فإن شدة التيار الحراري لواحدة طول الأنبوب q_l:

$$q_l = k_l \pi (t_1 \quad t_2) = \pi \times 0.263 \times (427 \quad 27) = 330 W/m$$

نحدد درجة حرارة السطح الداخلي للأنبوب من العلاقة:

$$t_{w1} - t_1 - \frac{q_l}{\pi d_1 \alpha_1} - 427 - \frac{330}{\pi \times 0.18 \times 200} - 424°C$$

وإذا أهملنا المقاومة الحرارية لجدار الأنبوب الفولاذي يمكن أن نفترض أن درجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب مساوية لـ $t_{w2} \cong 424°C$. وتتحدد درجة السطح الخارجي للعازل المقاوم للحرارة من العلاقة:

$$t_{w3} = t_{w2} - \frac{q}{2\pi\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} = 424 - \frac{330}{2\times\pi\times 0.18}\ln\frac{300}{200} = 306°C$$

درجة حرارة السطح الخارجي للعازل الفليني:

$$t_{w4} = t_2 + \frac{q}{\pi d_4 \alpha_2} = 27 + \frac{330}{\pi \times 0.4 \times 10} = 53.3°C$$

2-18: المبادلات الحرارية

يعد المبادل الحراري أحد العناصر الأساسية والهامة في التجهيزات المستخدمة لتأمين شروط العمل والراحة المناسبة لحياة الإنسان سواء على مستوى المنزل أو في الصناعة باختلاف فروعيا. ترافق أية عملية تحويل للطاقة من شكل إلى آخر وكذلك نقل الطاقة من أحد الأجهزة أو الآلات إلى أخرى بانتقال بعض أجزاء أشكال الطاقة المعروفة إلى طاقة حرارية. لهذا فإن التبادل الحراري عملياً لجميع الآلات والأجهزة له أهمية كبيرة.

تظهر البيانات المنشورة على أن حصصاً كبيرة من الموازنة المخصصة لبناء محطات الطاقة ينفق على أجهزة التبادل الحراري، وكذلك الحال في المحطات التكنولوجية

(على سبيل المثال عند بناء محطات طاقة كهروحرارية، وإذا افترضنا أن مولد البخار هو أيضا مبادل حراري فإن حصة تجهيزات المبادلات الحرارية يبلغ 70% من الموازنة المخصصة لتجهيزات كامل المحطة). تبلغ حصة المبادلات الحرارية من موازنة معامل معالجة وتحويل النفط بحدود 50% – 40.

تعمل المبادلات الحرارية مع بقية العناصر الداخلة في تركيبة المحطات التكنولوجية والطاقية في شروط متغيرة لعمل تلك المحطات، غير أن الشروط الاستثمارية للمبادلات الحرارية لا تتعلق فقط بتغير أنظمة العمل والبارامترات التكنولوجية للتيارات، بل تتعلق أيضا بعوامل أخرى مثل: ترسب الأوساخ، الكلس، هباب الفحم، القطران على جدران الأنابيب، ظهور الصدأ وغيرها والتي بدورها تتعلق مع الزمن.

المبادلات الحرارية: هي الأجهزة المخصصة لتبادل الحرارة بين وسطين أحدهما ساخن والآخر بارد (يقصد بالوسط هو الناقل الحراري). تظهر عملية نقل الحرارة من وسط إلى آخر (من ناقل إلى آخر) في أغلب فروع التكنولوجيا: محطات الطاقة – محطات التبريد – الصناعات الكيميائية والمعدنية – الغذائية – النفطية – وفروع أخرى.

العمليات الحرارية الجارية في أجهزة التبادل الحراري متنوعة: تسخين – تبريد – تبخير – غليان – تكاثف – انصهار – تجمد وعمليات أخرى أكثر تعقيداً مؤلفة من جمع أكثر من عملية من العمليات الآنفة الذكر.

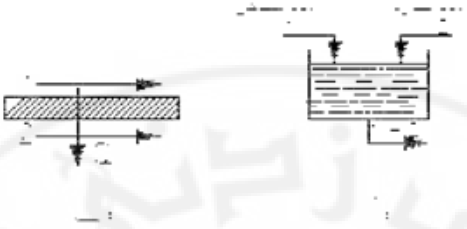
يمكن تصنيف المبادلات الحرارية حسب:

- وظيفتها: محمصات – مكثفات – مبردات – مبخرات – محولات بخار – أبراج التبريد –مسترجعات – ...
- أسلوب التأثير المتبادل للوسطين المستخدمين في الجهاز (المبادل) إلى مبادلات حرارية مزجية ومبادلات حرارية سطحية.

18-2-1: المبادلات الحرارية المزجية

في المبادلات الحرارية المزجية يحدث اندماج تيارين للمادة نفسها لهما درجتا حرارة مختلفتان وعندها لا يمكن عمليا تحديد مساحة سطح التبادل الحراري بينهما لأن جزيئات

التيارين تتداخل بعضها مع بعض. كمثال على هذه المبادلات ندرج خلاط الماء الساخن والبارد، انظر الشكل (18-5-أ).



الشكل (18-5): أنواع المبادلات الحرارية حسب مبدأ التأثير

18-2-2: المبادلات الحرارية السطحية

المبادلات الحرارية السطحية وفيها تجري عملية انتقال الحرارة من أحد الوسطين إلى الوسط الآخر عبر السطح الفاصل بين الوسطين الذي قد ينفذ من مادة مغايرة للوسطين أو يتشكل خلال عملية التأثير المتبادل بين الوسطين. عند التبادل الحراري في مثل هذه الأجهزة فإن التيار الحراري في كل نقطة من سطح جدار الفصل يحافظ على اتجاه ثابت. يمكن أن تستخدم كنواقل حرارية (بحسب خصوصية العملية الإنتاجية) مواد مختلفة: قد تكون مواد غازية – سائلة – صلبة. يجب على المواد المستخدمة كنواقل حرارية من وجهة نظر تقنية واقتصادية أن تحقق المتطلبات التالية:

أ- أن تكون لها سعة حرارية وحرارة كامنة مرتفعتين.

ب- لزوجة منخفضة.

إن تحقيق هاتين الخاصتين للناقل الحراري يضمن لنا فعالية عالية للتبادل الحراري ويخفض من كتلتها وحجمها وذلك من أجل الحمل الحراري المعطى للمبادل الحراري.

ت- أن تكون متحملة للحرارة ولا تظهر تأثير غير مستحب على المواد المصنعة منها الأجهزة.

ث- يجب أن تكون مستقرة كيميائيا حتى لو تعرضت لفترة طويلة لدرجات حرارة عالية.

ج- يفضل عدم ترسب الناقل الحراري على سطح التبادل، حيث يؤدي ذلك إلى انخفاض معامل انتقال الحرارة الإجمالي k وكذلك انخفاض الإنتاجية الحرارية للمنشأة.

ح- أن تكون متوفرة ورخيصة الثمن .

يجب على المبادلات الحرارية أن تتضمن مجموعة من المتطلبات: الإنتاجية الحرارية العالية والاقتصاد في العمل، ضمان الشروط التكنولوجية المحددة للعملية وكذلك ضمان تجهيز المنتج بنوعية عالية (من أجل المحطات التكنولوجية، ضمان عدم تلوث البيئة، بساطة في التصميم، رخص بمواد الصنع وكلفة أقل بالتصنيع، محكمة وكتلة أقل للجهاز ، بساطة في التركيب، سهولة الصيانة، وثوقية وخدمة أطول في العمل).

تصنف المبادلات الحرارية السطحية حسب طريقة ترتيب السطح ودوره في عملية التبادل الحراري إلى:

1- المبادلات الحرارية ذات التأثير المستمر : وفيها يتبادل الوسطان الحرارة عبر سطح فاصل ذي طبيعة مغايرة (جدار مثلا) كما هو مبين بالشكل (18-5-ب). إن مساحة سطح التبادل الحراري لهذه الأنواع ثابتة ويمكن تحديدها عند تصميم المبادل وهنا عملية التبادل الحراري تجري بصورة مستمرة ولها طبيعة مستقرة وكمثال عليها المراجل البخارية والمكثفات السطحية.

2- المبادلات التماسية: فيها تنتقل الحرارة من وسط إلى آخر عند التأثير المتبادل المباشر بينها (عند تلامسهما). ولكن الأوساط المتبادلة للحرارة هنا هي مواد ذات حالات طورية واحدة ولكنها غير قابلة للانحلال ببعضها. مما يؤدي إلى وجود سطح فصل بين الوسطين المتبادلين للحرارة وذلك خلافا للأجهزة المزجية.

إن سطح الفصل في الأجهزة التماسية يتعلق بكل من تصميم الجهاز وشروط عمله مما يميز الأجهزة التماسية عن أجهزة التأثير المستمر حيث يتحدد سطح التماس من خلال تصميم الجهاز حصرا. كمثال على الأجهزة التماسية نورد غرف الري وأبراج التبريد الشكل (18-6).



الشكل (18-6): برج التبريد

3- المبادلات الحرارية الاسترجاعية: فيها تجري عملية انسياب الوسط الساخن ومن ثم الوسط البارد على سطح التبادل الحراري نفسه وعادة تزود هذه المبادلات بحشوات وظيفتها إدخار الحرارة وكحشوات تستخدم مواد معدنية مختلفة مشكلة بحيث تمرر الوسطين الساخن والبارد عبر الفتحات المتوافرة بغزارة والتي تشكل سطوح تماس كبيرة (مثال الشبك المعدني). في هذه المبادلات يكون سطح التبادل الحراري عبارة عن سطح الحشوة وآلية عمل هذه الأنواع من المبادلات هو أن الوسط الساخن ولفترة من الزمن ينساب على الحشوة مما يؤدي إلى تسخينها ومن ثم نمرر على الحشوة الوسط البارد فيسخن بينما تبرد الحشوة ونظراً لتكرار عملية التسخين والتبريد في هذه المبادلات بصورة مستمرة ولكي يعمل المبادل باستمرار فإننا نلجأ إلى جمع المبادل من جزأين وعندها تجري في الوقت نفسه عملية تبريد لأحد الوسطين في أحد الجزأين بينما تجري عملية تسخين الجزء الآخر.

4- المبادلات الحرارية ذات المنابع الحرارية الداخلية: وفيها لا نستخدم وسيطين حراريين كما هي العادة بل وسيطاً حرارياً واحداً هو الذي يطرح الحرارة المتشكلة في

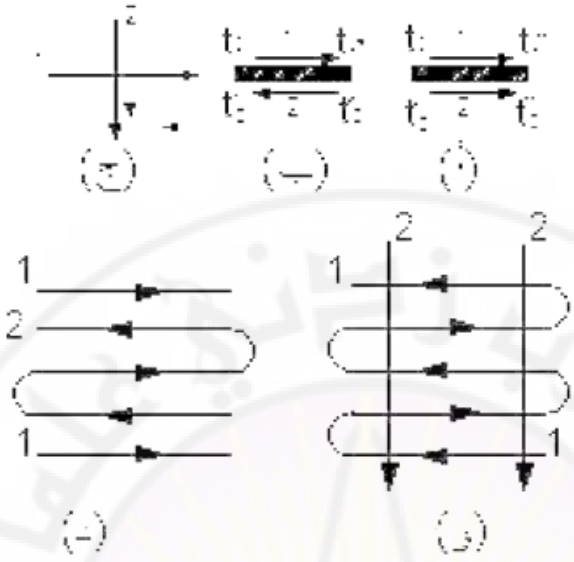
الجهاز (المبادل) نفسه وكمثال على هذه الأنواع من المبادلات هي المفاعلات النووية والسخانات الكهربائية.

إن المبادلات الحرارية السطحية ذات التأثير المستمر هي الأكثر انتشاراً في الصناعة وبحسب اتجاه حركة الوسيطين الساخن والبارد نميز الحالات التالية:

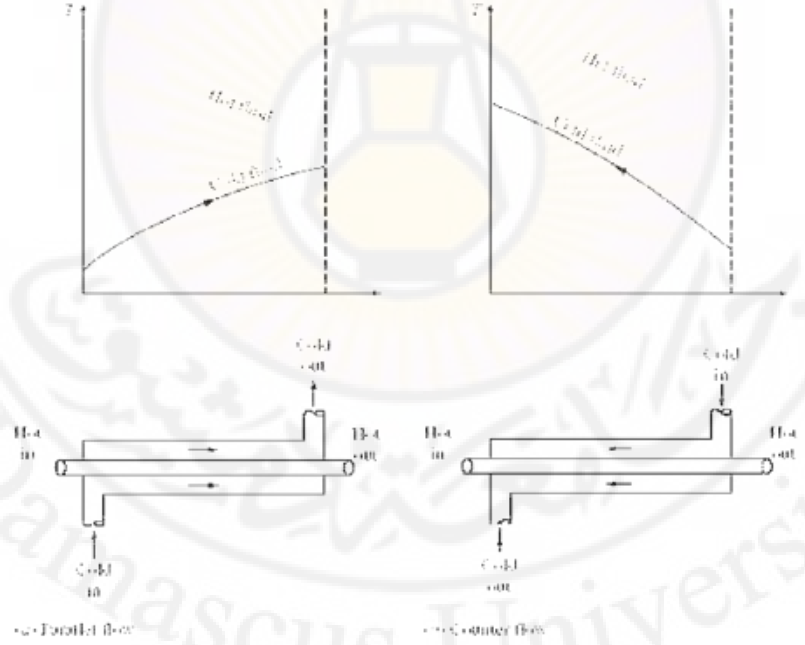
- الوسيطان يتحركان بمسارين متوازيين وبالاتجاه نفسه. يسمى هذا النوع من الجريان: الجريان الموازي أو الجريان المباشر الشكل (18-7-أ).
- الوسيطان يتحركان بمسارين متوازيين ولكن باتجاهين مختلفين يسمى هذا النوع من الجريان: الجريان المتعاكس الشكل (18-7-ب).
- الوسيطان يتحركان باتجاهين متعامدين يسمى هذا النوع من الجريان: الجريان المتصالب الشكل(18-7-جـ).

بالإضافة لمخططات الجريان البسيطة السابقة للوسيطين الحراريين تصادف في الواقع العملي مخططات أكثر تعقيدا: كأن يكون الجريان متوازيا ومتعاكساً في آن واحد أو أن يكون الجريان متصالبا ولعدة مرات كما هو مبين بالشكل (٧-١٨-د، و). تصميميا فإن سطوح التبادل الحراري في المبادلات الحرارية السطحية ذات التأثير المستمر إما أن تكون على شكل أنابيب وإما على شكل صفائح.

يبين الشكل (18-8) المنحنيات المميزة لعلاقة درجة الحرارة على طول سطح التبادل الحراري A (الممثل على محور السينات) بقيم درجات الحرارة للوسيطين الحراريين (الممثلة على محور العينات) وذلك من أجل المبادلات ذات التيار المباشر الشكل (18-8-أ) والمبادلات ذات التيار المتعاكس الشكل (18-8-ب).



الشكل (18-7): المبادلات الحرارية السطحية ذات التأثير المستمر



المبادلات ذات التيار المتعاكس المبادلات ذات التيار المباشر

الشكل (18-8)

3-18: الحساب الحراري للمبادلات الحرارية السطحية

يوجد شكلان للحساب: تصميمي وآخر تحققي.

الحساب التصميمي: ويتم عندما نريد تصميم المبادل الحراري المعلوم له إنتاجيته الحرارية (الحمل الحراري للمبادل)، نوع النواقل الحرارية، تدفقاتها وبارامتراتها. هدف هذا التصميم هو تحديد مساحة سطح التبادل الحراري ومن ثم تحديد الأبعاد الهندسية الأساسية لنموذج المبادل الحراري المختار وهو يتضمن حساباً حرارياً وهيدروليكياً.

الحساب التحققي: يجري من أجل التحقق من استخدام مبادل حراري نظامي في عملية تكنولوجية محددة. يعطى في هذا الحساب أبعاد الجهاز وشروط عمله ويطلب تحديد بارامترات الحالة النهائية للناقلين الحراريين والإنتاجية الحرارية للجهاز.

وبالعودة إلى الحساب الحراري فإن المعطيات الضرورية الواجب معرفتها عند بدء الحساب هي:

أ- نوع المبادل الحراري (صندوقي، أنبوبي، صفائحي، مريش، مغمور ....)

ب-نوع الناقل الحراري (غاز، بخار، سائل)

ت-الإنتاجية الحرارية للجهاز (الحمل الحراري للمبادل)

ث-تدفق أحد الناقلين ودرجة حرارته البدائية والنهائية.

أما المطلوب حسابياً:

أ- البارامترات الفيزيائية وسرعة جريان الناقلين.

ب-تدفق الناقل الآخر وذلك من معادلة الموازنة الحرارية للجهاز.

ت-ضاغط درجة الحرارة (فرق درجات الحرارة الوسطي).

ث-معامل انتقال الحرارة الحملي والإجمالي.

ج- سطح التبادل الحراري والأبعاد الهندسية.

ح- قطر فوهة الدخول والخروج لكلا الناقلين.

تحديد البارامترات الفيزيائية وسرعة جريان الناقلين:

يتعلق التبادل الحراري بين الناقلين بصورة ملحوظة بالخواص الفيزيائية ولبارامترات الوسطين المتحركين، وكذلك بالشروط الهيدروديناميكية للجريانين.

تتعلق البارامترات الفيزيائية للناقلين بدورها بدرجة حرارتهما ويتم تحديدها من المراجع بدلالة درجة الحرارة الوسطية لكل ناقل والتي يتم حسابها من العلاقة:

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} \qquad (23\text{-}18)$$

أما الخواص الفيزيائية للوسطين فهي: الكثافة، اللزوجة الحركية والتحريكية، معامل التوصيل الحراري، الحرارة الكامنة لتشكيل البخار وغيرها... والتي يمكن تحديدها من المراجع.

تورد الخواص الفيزيائية للمواد ضمن المراجع إما في جداول أو في مخططات ولكن يجب الإشارة إلى أنه عند البحث عن تلك الخواص يجب الأخذ بعين الاعتبار عند أي درجة حرارة مأخوذة تلك القيم وبأية واحدات مكتوبة. علما بأن جميع الخواص الفيزيائية الواردة في أغلب المراجع مدونة عند درجة الحرارة $20°C$، فإذا اختلفت درجة الحرارة الوسطية للناقل الحراري عن $20°C$ وجب علينا إدخال تصحيح على درجة الحرارة. كذلك يؤثر اختيار السرعة المثلى للناقل الحراري ضمن المبادل تأثيرا كبيرا في نوعية عمله، فمع ازدياد سرعة الناقل تتزايد فعالية التبادل الحراري (يزداد من جراء ذلك معامل انتقال الحرارة الإجمالي k وينخفض سطح التبادل A أي أن المبادل يصبح أكثر إحكاما ووثوقية، لكن مع زيادة سرعة الجريان تزداد بصورة كبيرة المقاومة الهيدوليكية التي تؤدي بدورها إلى ازدياد مطرد بمصروف الطاقة الكهربائية وكذلك يساعد على **إمكانية ظهور خطر المطرقة المائية واهتزاز بأنابيب المبادل**. لهذا فإنه غالبا ما يلجؤون إلى الحساب الاقتصادي من أجل اختيار السرعة الاقتصادية للناقلين ضمن المبادل الحراري. يختارون عادة قيمة السرعة في المبادل لتلك الموافقة لجريان الناقل الحراري الموافقة لبدء الجريان المضطرب للتيار أي الموافقة لعدد رينولدز أكبر من 10^4.

أقطار الأنابيب المستخدمة في صناعة المبادلات $25.38.57mm$ وسرعة الجريان المنصوح بها $1.5-2m/s$ ولا يجوز أن تزيد عن $3m/s$، يسمح أن تصل سرعة الغازات الموجودة عند الضغط الجوي حتى $25m/s$ وللأبخرة المشبعة عند تكاثفها حتى $10m/s$.

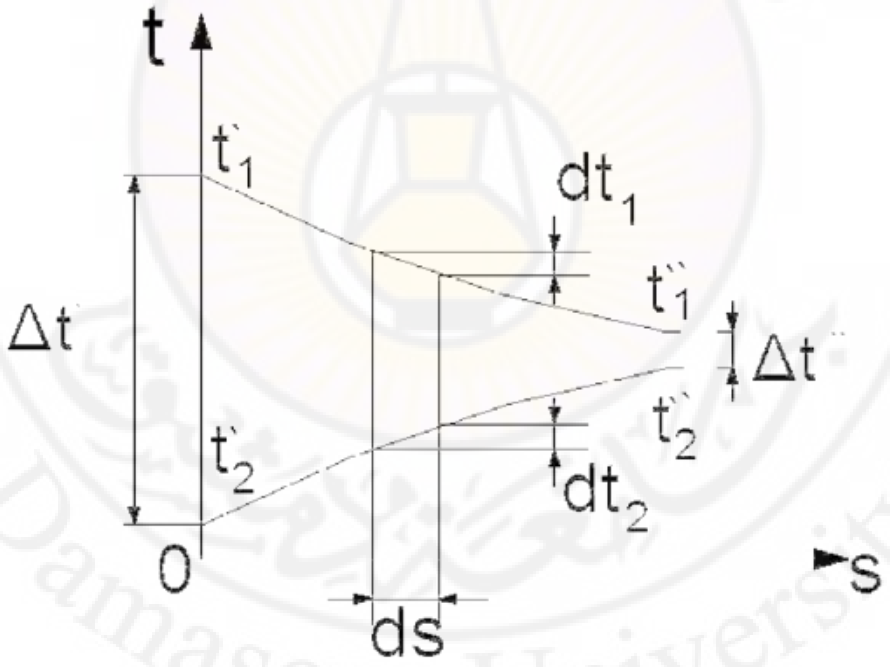
18-3-1: فرق درجة الحرارة الوسطي اللغاريتمي للمبادلات الحرارية ذات التأثير المستمر

غالباً ما تتغير درجة حرارة الناقلين الحراريين في عملية انتقال الحرارة وعندها فإنه لحساب التدفق الحراري نستخدم معادلة تكاملية لها الشكل:

$$Q = \int_A k\,\Delta t\,dA \qquad (24\text{-}18)$$

لدراسة مبادل حراري بسيط ذي جريان مباشر حيث طبيعة تغير درجة حرارة الناقلين الحراريين فيه مبينة على الشكل (18-9) نكتب معادلة انتقال الحرارة بين الوسيطين لعنصر السطح dA:

$$dQ = k\,(t_1 - t_2)\,dA = k\,\Delta t\,dA \qquad (أ)$$



الشكل (18-9): فرق درجة الحرارة الوسطى للمبادلات الحرارية ذات التأثير المستمر

نتيجة انتقال الحرارة dQ تنخفض درجة حرارة الوسط الساخن بمقدار $-dt_1$ وتزداد درجة حرارة الوسط البارد بمقدار dt_2 وعليه:

$$dQ = -c_1\,dt_1 = c_2\,dt_2 \qquad (ب)$$

ومنه: $$dt_1 = \frac{dQ}{c_1} \quad , \quad dt_2 = \frac{dQ}{c_2} \qquad (ج)$$

حيث c_1, c_2 المكافئ المائي للوسط الساخن والبارد:

$$d(t_1 - t_2) = dt_1 - dt_2 = -\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}\right) dQ$$

$$d(t_1 - t_2) = -m\, dQ \qquad (د)$$

حيث:

$$m = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}$$

بتبديل قيمة dQ من المعادلة (أ) في المعادلة (د) نحصل على:

$$d(t_1 - t_2) = -mk(t_1 - t_2)dA$$

فإذا رمزنا لـ $t_1 - t_2$ بـ Δt فإن المعادلة الأخيرة تكتب على الشكل التالي:

$$\frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = -mk\, dA \qquad (هـ)$$

فإذا افترضنا أن m و k ثابتتان فإنه وبمكاملة المعادلة (هـ) من الصفر وحتى A ومن $\Delta t'$ وحتى Δt نحصل:

$$\int_{\Delta t'}^{\Delta t} \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = -mk \int_0^A dA$$

$$\ln \frac{\Delta t}{\Delta t'} = -mk\, A \qquad (25\text{-}18)$$

$$\Delta t = \Delta t' e^{-mk\, A} \qquad (26\text{-}18)$$

نلاحظ من المعادلة الأخيرة أن ضاغط درجة الحرارة يتغير وفق قانون أسي على طول سطح التبادل الحراري وبالتالي في المبادلات الحرارية ذات الجريان المباشر يتناقص هبوط درجة الحرارة بين الناقلين الحراريين باستمرار على طول سطح التبادل الحراري.

لتحديد فرق درجتي الحرارة الوسطي للناقلين على سطح التبادل الحراري A نستخدم العلاقة التالية:

$$\Delta t = \frac{1}{A} \int_0^A \Delta t\, dA \qquad (و)$$

حيث Δt قيمة ضاغط درجة الحرارة المكاني $t_1 - t_2$ منسوباً لعنصر سطح التبادل الحراري.

إن قيمة Δt محسوبة في العلاقة (18-26) والتي بتعويضها في (و) نحصل على:

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t'}{A}\int_0^A e^{-mkA}\,dA = \frac{\Delta t'}{-mkA}\left(e^{-mkA} - 1\right) \qquad (22\text{-}18)$$

بتبديل قيمة mkA و e^{-mkA} من العلاقتين (18-25) و(18-26) في العلاقة (18-27) نحصل على:

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t'}{\ln\dfrac{\Delta t}{\Delta t'}}\left(\frac{\Delta t}{\Delta t'} - 1\right) = \frac{\Delta t - \Delta t'}{\ln\dfrac{\Delta t}{\Delta t'}} \qquad (28\text{-}18)$$

وإذا أجرينا حساب ضاغط درجة الحرارة الوسطي على كامل سطح التبادل الحراري فإن $\Delta t = \Delta t'$ وعندها فالعلاقة (18-28) تأخذ الشكل:

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t'' - \Delta t'}{\ln\dfrac{\Delta t''}{\Delta t'}} \qquad (29\text{-}18)$$

والتي غالبا ما تكتب بالشكل التالي:

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_G - \Delta t_M}{\ln\dfrac{\Delta t_G}{\Delta t_M}} \qquad (30\text{-}18)$$

حيث Δt_G الفرق الأعظمي لدرجتي حرارة الناقلين الحراريين،

Δt_M الفرق الأصغري لدرجتي حرارة الناقلين الحراريين،

$\overline{\Delta t}$ ندعوها بضاغط درجة الحرارة الوسطي اللوغاريتمي.

العلاقة (18-30) صالحة من أجل المبادلات الحرارية ذات الجريان المباشر والمتعاكس على حد سواء. كما أنها صالحة للمبادلات الحرارية ذات المخططات البسيطة وذلك عند شروط ثبات التدفق الكتلي لكلا الناقلين الحراريين وكذلك ثبات معامل انتقال الحرارة الكلي k على طول سطح التبادل الحراري. في الحالات التي لا تتغير فيها درجتا

حرارة الناقلين الحراريين بدرجة كبيرة يمكن حساب فرق درجة الحرارة الوسطي باعتباره المتوسط الحسابي للضاغطين الحديين النهائيين أي:

$$\overline{\Delta t} = = \frac{1}{2}(\Delta t_{is} + \Delta t_{1t}) = \frac{\Delta t_{is}}{2}\left(1 + \frac{\Delta t_{1t}}{\Delta t_{is}}\right) \qquad (31\text{-}18)$$

بما أن قيم المتوسط الحسابي لضاغط درجة الحرارة دائما أكبر من الضاغط الوسطي اللوغاريتمي فإن فرق درجة الحرارة يمكن أن نحسبه وبدقة كافية بوساطة العلاقة (31-18) وذلك عندما تتحقق المتراجحة $\frac{\Delta t_{is}}{\Delta t_{1t}} < 2$.

تحديد معاملات انتقال الحرارة بالحمل α_1 و α_2 والإجمالي k:

كما وجدنا سابقا فإن k تتعلق بمجموعة من العوامل: معامل انتقال الحرارة بالحمل لكلا الناقلين الحراريين α_1, α_2، وبالمقاومة الحرارية للسطح الفاصل بينهما بما عليه من ترسبات وأوساخ.

تعطي العلاقة (18-4) قيمة k لحالة الجدران المستوية بينما تعطي العلاقة (18-19) قيمة k لحالة الجدران الأسطوانية. يمكن تحديد k لحالة الجدران الأسطوانية الرقيقة (لحالة الأنابيب التي يتحقق لها $\frac{d_{in}}{d_{out}} < 2$) بنفس العلاقة الخاصة بالجدران المستوية وذلك مع خطأ لا يتجاوز 4%.

إذا لم يكن معلوم لدينا التوصيل الحراري لطبقة الاتساخ المترسبة على سطح التبادل الحراري فإن k يتم حسابه اعتمادا على حالة الجدران النظيفة وبإدخال معامل تصحيح φ يأخذ بعين الاعتبار الترسبات الممكن حدوثها على سطوح التبادل الحراري:

$$k_{sk} = k\varphi \qquad (32\text{-}18)$$

تتراوح قيمة φ لأغلب أجهزة التبادل الحراري في المجال $0.85 - 0.65$.

تتحدد قيمة α_1, α_2 الداخلة في العلاقتين (18-4) و (18-7) من معادلة نوسلت (العلاقة 16-5).

ينصح الباحثون بالعلاقة التالية من أجل حساب القيمة الوسطية لمعامل انتقال الحرارة بالحمل عند الجريان المضطرب للسوائل (ما عدا مصاهير المعادن) ولمجال أعداد رينولدز $\mathrm{Re} = 10^4 - 5\times10^6$ وبراندل $\mathrm{Pr} = 0.6 - 2,500$:

$$Nu_f = 0.021\,\mathrm{Re}_f^{0.8}\,\mathrm{Pr}_f^{0.43}\left(\frac{\mathrm{Pr}_f}{\mathrm{Pr}_w}\right)^{0.25}\varepsilon_l \qquad (33\text{-}18)$$

حيث Re عدد رينولدز المحدد عند درجة حرارة السائل والبعد المميز للأنبوب.

Pr_f عدد براندل المحدد عند درجة حرارة السائل.

Pr_w عدد براندل المحدد عند درجة حرارة جدار الأنبوب.

ε_l معامل تصحيح يأخذ بعين الاعتبار تغير القيمة الوسطية لـ α على طول الأنبوب.

عندما $\frac{l}{d} \geq 50$ فإن: $\varepsilon_l = 1$

نعتبر في العلاقة (33-18) كدرجة حرارة مميزة درجة حرارة السائل، وكبعد مميز يأخذون قطر الأنبوب.

سطح التبادل الحراري المطلوب:

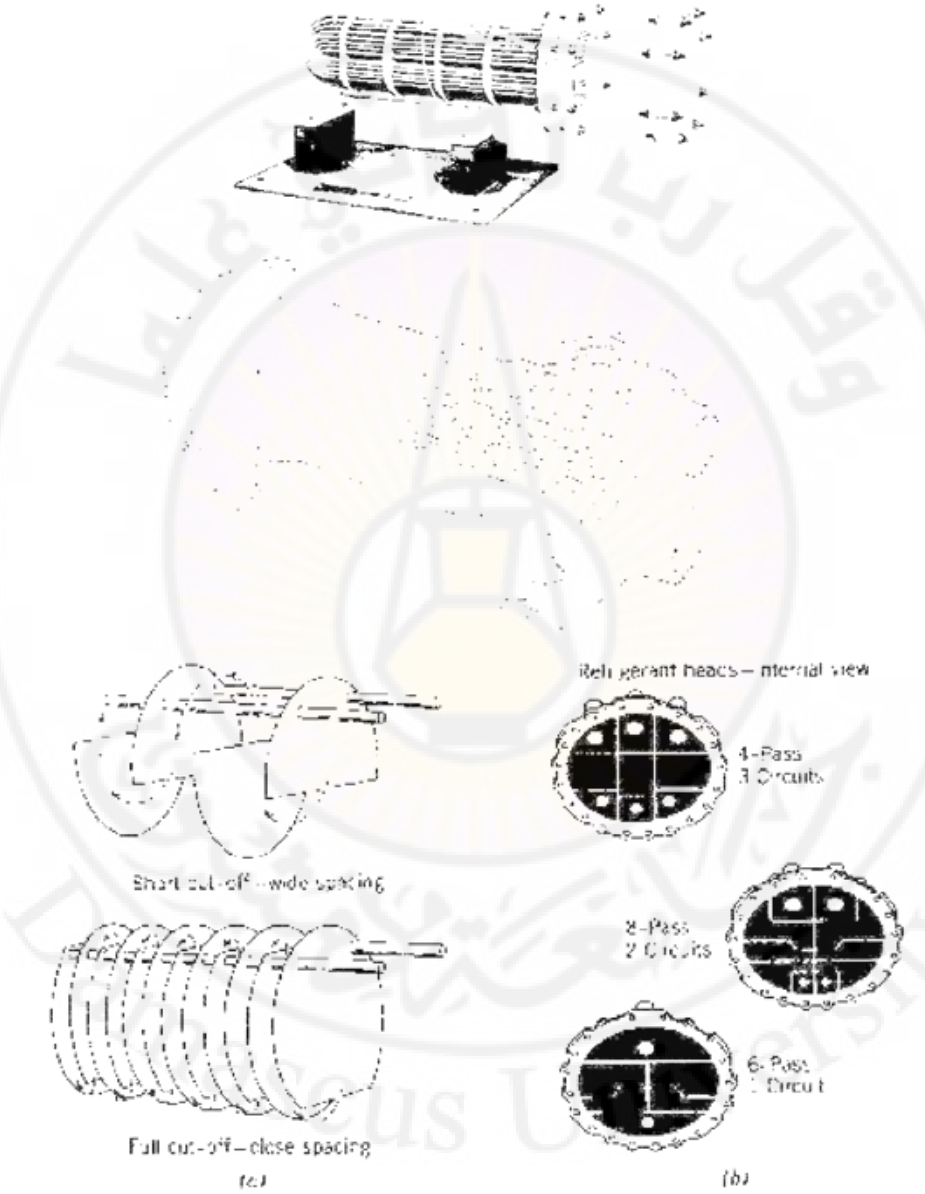
يتحدد سطح التبادل الحراري للمبادلات السطحية من العلاقة:

$$A = \frac{Q}{k\,\Delta t} \qquad (34\text{-}18)$$

حيث Q الحمل الحراري المطلوب من المبادل الحراري.

k معامل انتقال الحرارة الإجمالي.

Δt ضاغط درجة الحرارة الوسطي اللغاريتمي.



صورة لمبادل حراري صندوقي بحزمة أنبوبية مع العناصر الداخلة في تركيبه

مسائل غير محلولة

1-18

حدد معامل انتقال الحرارة الإجمالي k في مبادل حراري مصنوع من أنابيب فولاذية قطراها $\frac{d_2}{d_1}=\frac{320mm}{310mm}$ وذلك للحالتين التاليتين:

أ- سطوح الأنابيب نظيفة،

ب-سطوح الأنابيب مغطاة بطبقة صدأ سماكتها الكلية $\delta=0.5mm$ وطبقة كلس سماكتها $\delta'=2mm$.

معامل انتقال الحرارة بالحمل من أحد وجهي الجدار $\alpha_1=7,000W/m^2K$ ومن الجهة الأخرى للجدار $\alpha_2=10,000W/m^2K$. حل المسألة بالصيغ المستخدمة لحالة الجدران المستوية.

الجواب: $k=2,826W/m^2K, k=518W/m^2K$

2-18

مبادل حراري ذو أنابيب فولاذية سماكة جدرانها $8mm$. تتشكل نتيجة الاستثمار على السطوح الخارجية للأنابيب طبقة صدأ سمكها $2mm$ وعلى داخلها طبقة كلس سمكها $3mm$، فإذا افترضنا أن معاملي انتقال الحرارة بالحمل من كلتا جهتي الجدار للأنبوب كبيران كم ستكون قيمة معامل انتقال الحرارة الأعظمي الممكنة؟

الجواب: $k=280W/m^2K$

3-18

كيف يتغير معامل انتقال الحرارة الكلي k إذا بدلنا بأنابيب فولاذية قطراها $\frac{d_2}{d_1}=\frac{38mm}{32mm}$ أنابيب نحاسية لها القطر نفسه وذلك في المبادلين الحراريين التاليين:

أ- من أجل الكالوريفر (المسخن الهوائي) والذي فيه $\alpha_1=1,100W/m^2K$ و $\alpha_2=40W/m^2K$

ب-لجهاز التبخير حيث $\alpha_1=1,100W/m^2K$ و $\alpha_1=2,300W/m^2K$.

أجري الحساب بصيغ الجدران المستوية.

الجواب: أ- ليس هناك أي تغير عملياً.

ب- يزداد بحدود 9%.

4-18

في محطة للمعالجة الحرارية للنفط تتحرك المنتجات النفطية في أنبوب من التيتانيوم قطراه $\frac{d_2}{d_1}=\frac{118mm}{110mm}$ ودرجة حرارتها الوسطية $350°C$. يسخن الأنبوب من الخارج بالغاز ذي درجة الحرارة $1,400°C$. معاملا انتقال الحرارة بالحمل من جهة السطحين الخارجي والداخلي للأنبوب هما على التوالي: $\alpha_1=100W/m^2K$ و $\alpha_2=300W/m^2K$. أوجد كلا من معامل انتقال الحرارة الإجمالي وكثافة التدفق الحراري منسوبين لواحدة الطول من جدار الأنبوب ثم حدد درجتي الحرارة على السطحين وذلك للحالتين التاليتين:

أ- الأنبوب نظيف،

ب- عند شرط ترسب مكونات نفطية على السطح الداخلي سمكها $5mm$ ومعامل توصيلها الحراري $\lambda=0.1W/mK$.

الجواب: $q_l=28.09kW/m, k_l=8.5kW/mK, t_{w1}=621°C, t_{w2}=642°C$

5-18

يتوضع خط أنابيب فولاذي قطراه $\frac{d_2}{d_1}=\frac{200mm}{186mm}$ في الهواء الطلق ذي درجة الحرارة $-17°C$. يتحرك بداخل الأنبوب ماء درجة حرارته الوسطية $93°C$ ومعامل انتقال الحرارة بالحمل من الماء إلى السطح الداخلي للأنبوب $\alpha_1=820W/m^2K$.

حدد الضياع الحراري من خط الأنابيب إذا علمت أن طوله $23m$ وأن معامل انتقال الحرارة من السطح الخارجي للأنبوب إلى الهواء الخارجي $\alpha_2=9W/m^2K$.

الجواب: $Q=14.1kW$

6-18

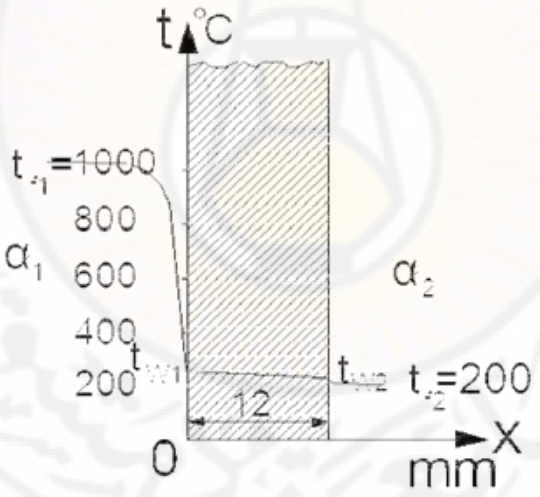
احسب لشروط المسألة (18-5) الضياع الحراري من خط الأنابيب بفرض أنه تمت في هذه المسألة تغطيته بطبقة إسفلتية سماكتها $50mm$ ومعامل توصيلها الحراري

$\lambda = 0.1W/mK$ أما معامل انتقال الحرارة بالحمل إلى الهواء الخارجي فانخفض حتى $\alpha_2 = 9W/m^2K$. حدد كذلك درجتي الحرارة على السطحين الداخلي والخارجي لطبقة الإسفلت.

الجواب: $Q = 3.16kW, 3.86°C, 92.7°C$

7-18

احسب شدة التدفق الحراري عبر $1m^2$ من سطح التسخين لمرجل بخاري ودرجتي الحرارة على سطحي الجدار إذا علمت القيم التالية: درجة حرارة غازات الدخان $t_{f1} = 1,000°C$ ، درجة حرارة المياه المغلية $t_{f2} = 200°C$ ، أما معاملا انتقال الحرارة من الغازات للجدار $\alpha_1 = 100W/m^2K$ ومن الجدار إلى الماء المغلي $\alpha_2 = 5,000W/m^2K$ ، معامل التوصيل الحراري لمادة الجدار $\lambda = 50W/mK$ أما سماكة الجدار $\delta = 12mm$ ، الشكل (10-18).



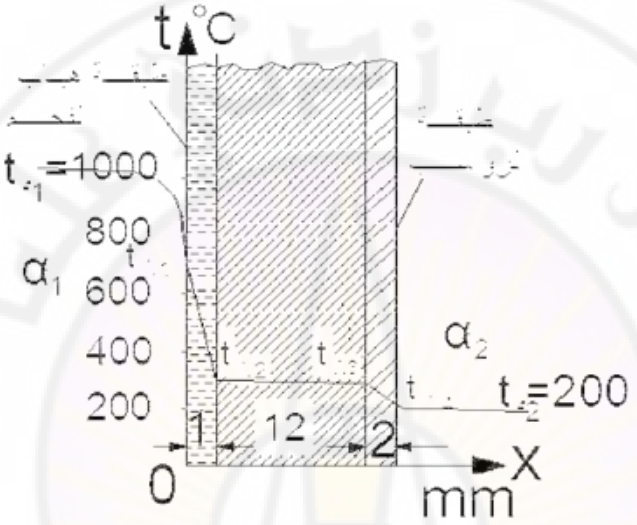
الشكل (10-18): تابع للمسألة (7-18)

الجواب: $q = 76,500W/m^2, t_{w1} = 235°C, t_{w2} = 215°C$

8-18

حل المسألة (7-18) بفرض أنه أثناء عملية الاستثمار يغطى سطح المرجل البخاري من جهة غازات الدخان بطبقة من هباب الفحم سماكتها $\delta_1 = 1mm$ ، $\lambda_1 = 0.08W/mK$ أما من جهة الماء فتغطى بطبقة من رواسب الغليان سماكتها

$\delta_{ss} = 2mm$، ومعامل توصيلها الحراري $\lambda_{ss} = 0.8W/mK$. احسب شدة التدفق الحراري عبر $1m^2$ من سطح التسخين المتسخ ودرجات الحرارة $t_{w1}, t_{w2}, t_{w3}, t_{w4}$، قارن نتائج الحساب مع جواب المسألة (18-7) وحدد مقدار انخفاض التبادل الحراري من جراء الاتساخ، الشكل (18-11).



الشكل (18-11): تابع للمسألة (18-8)

$q = 31,500W/m^2, t_{w1} = 685°C, t_{w2} = 291°C,$

$t_{w3} = 283°C, t_{w4} = 206°C, \frac{\Delta q}{q} = 58.9\%$ الجواب:

9-18

لدينا خزان مغلق مستطيل الشكل أبعاده $1.6 \times 0.9 \times 0.7m$، يوجد في داخله محلول كلور الصوديوم درجة حرارته $t_{f2} = -20°C$. يكتسب هذا الخزان من الهواء المحيط ذي درجة الحرارة $t_{f1} = 14°C$ كمية من الحرارة. جدار الخزان فولاذي بسماكة $4mm$ ومعامل توصيله الحراري $\lambda = 49W/mK$. معامل انتقال الحرارة من جدار الخزان إلى المحلول $\alpha_2 = 535W/m^2K$ ومن الهواء إلى الجدار $\alpha_1 = 24.4W/m^2K$ حلل عملية انتقال الحرارة، أوجد المقاومات الحرارية لانتقال الحرارة R_1, R_2 والتوصيل الحراري R_λ والمقاومة الكلية R. حدد معامل انتقال الحرارة الإجمالي k وشدة التدفق

الحراري q وكمية الحرارة الكلية المكتسبة Q وكذلك درجتي الحرارة على السطحين الداخلي والخارجي t_{w1}, t_{w2}.

$R_1 = 0.041 m^2K/W, R_2 = 0.0000815 m^2K/W,$
$R_3 = 0.00187 m^2K/W, R = 0.043 m^2K/W$

الجواب:

$k = 23.3 W/m^2K, q = 790.8 W/m^2, Q = 5,045 W$
$t_{w1} = -18.5°C, t_{w2} = -18.4°C$

10-18

حدد شدة التدفق الحراري عبر $1m^2$ لجدار مسكن آجري سماكته بمقدار ضعف سماكة الآجرة $\delta = 510 mm$ وبمعامل توصيل حراري $\lambda = 0.8 W/mK$، درجة حرارة الهواء داخل المسكن $t_{f1} = 18°C$ معامل انتقال الحرارة للسطح الداخلي للجدار $\alpha_1 = 7.5 W/m^2K$، درجة حرارة الهواء الخارجي $t_{f2} = -30°C$، معامل انتقال الحرارة من السطح الخارجي المعرض للهواء $\alpha_2 = 20 W/m^2K$. احسب أيضا درجتي الحرارة على سطحي الجدار.

الجواب: $q = 58.6 W/m^2, t_{w1} = 10.2°C, t_{w2} = -27.1°C$

11-18

حل المسألة (10-18) إذا علمت أن الجدار مغطى من الخارج بطبقة عازلة حرارياً سماكتها $\delta = 50 mm$ ومعامل توصيلها الحراري $\lambda = 0.08 W/mK$ وقارن بين الضياع الحراري لحالة الجدار المعزول وغير المعزول.

الجواب: $q = 33.2 W/m^2, t_{w1} = 13.6°C, t_{w2} = -28.3°C, \frac{\Delta q}{q} = -76.5\%$

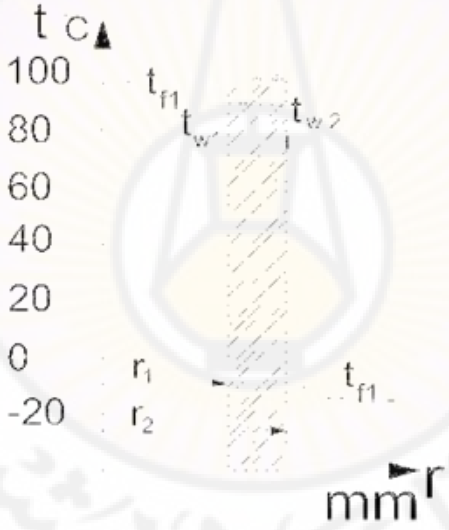
12-18

معامل انتقال الحرارة من أحد وجهي جدار معدني غير سميك محدد بالقيمة $\alpha_1 = 6,050 W/m^2K$ أما من الجهة الأخرى $\alpha_2 = 291 W/m^2K$، أي من المعاملين يجب زيادته حتى نزيد من فعالية انتقال الحرارة؟

الجواب: من أجل زيادة فعالية انتقال الحرارة لابد من زيادة معامل انتقال الحرارة الأقل.

13-18

احسب الضياع الحراري لمتر طولي من خط أنابيب غير معزول قطراه $\frac{d_1}{d_2}=\frac{150mm}{165mm}$ معرض للهواء الخارجي وذلك إذا كان يجري داخل الأنبوب ماء ساخن بدرجة حرارة وسطية $t_{f1}=90°C$، أما درجة حرارة الهواء المحيط $t_{f2}=-15°C$. معامل التوصيل الحراري لمادة الأنبوب $\lambda=50W/mK$ معامل انتقال الحرارة من الماء الساخن إلى سطح الأنبوب الداخلي $\alpha_1=1{,}000W/m^2K$ ومن السطح الخارجي للأنبوب إلى الهواء الخارجي $\alpha_2=12W/m^2K$. حدد كذلك درجتي الحرارة على السطح الداخلي والخارجي للأنبوب، الشكل (18-12).



الشكل (18-12): تابع للمسألة (18-13)

الجواب: $q_l=625W/m, t_{w1}=89.8°C, t_{w2}=89.6°C$

14-18

يغطى أنبوب بخار بطبقتين عازلتين حراريا لهما السماكة نفسها، القطر الوسطي للعازل الثاني أكبر بمرتين من القطر الوسطي للعازل الأول أما معامل التوصيل الحراري للعازل الثاني فهو أقل بمرتين بالمقارنة مع العازل الأول. درجتا الحرارة على السطحين الداخلي والخارجي للعازلين معلومتان. إلى أية قيمة وبأي اتجاه سوف يتغير الضياع

الحراري من $1m$ لخط البخار وذلك بعد تبديل مواقع العازلين مع الإبقاء على الشروط الأخرى دون تبديل، الشكل (18-13)؟ من أجل الحل استخدم العلاقة التقريبية لحساب q

الجواب: بعد تبديل أمكنة الطبقتين العازلتين فإن الضياع الحراري ينخفض إلى حدود 20%



الشكل (18-13) تابع للمسألة (18-14)

15-18

مسخن هوائي أنبوبي قطراه $\begin{matrix} d_1 = 43mm \\ d_2 = 39mm \end{matrix}$، إنتاجيته $2.78kg/s$ ومعامل التوصيل الحراري لمادة الأنبوب $\lambda = 50W/mK$. يتحرك داخل الأنبوب غاز ساخن بينما ينساب على السطح الخارجي للأنبوب وبصورة عرضية تيار هوائي، درجة الحرارة الوسطية لغازات الدخان $t_{f_1} = 250°C$، ودرجة الحرارة الوسطية للهواء المسخن $t_{f_2} = 145°C$، الفرق في درجة حرارة الهواء عند المدخل والمخرج من المسخن يساوي $\Delta t = 250°C$. معامل انتقال الحرارة من الغازات إلى الجدار $\alpha_1 = 45W/m^2K$، ومن الجدار إلى الهواء $\alpha_2 = 25W/m^2K$. احسب معامل انتقال الحرارة الكلي (الإجمالي)

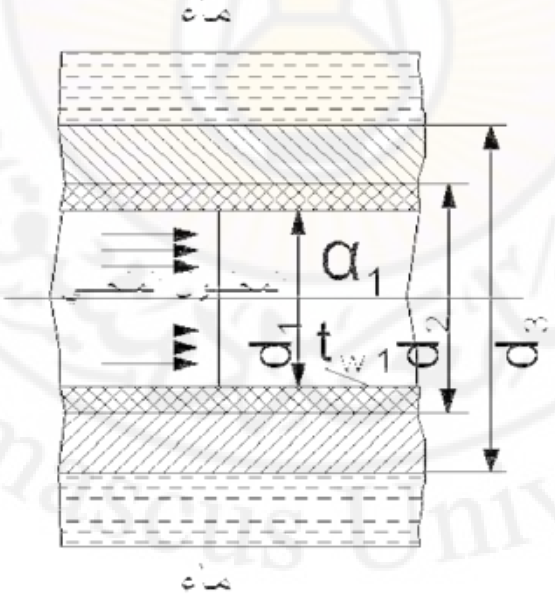
وحدد سطح التسخين للمسخن. أجر الحسابات باستخدام علاقات الجدران الأسطوانية والجدران المستوية، ثم قارن نتائج الحساب.

الجواب: للجدران الأسطوانية $k = 0.75 W/m^2K$ ، $A = 412 m^2$

للجدران المستوية $k = 16 W/m^2K$ ، $A = 418 m^2$

16-18

يغمر أنبوب فولاذي $\lambda = 45.4 W/mK$ قطراه $\frac{d_1}{d_2} = \frac{45mm}{50mm}$ يمر بداخله محلول ملحي بغية تبريد الماء كما هو مبين بالشكل (14-18)، بحيث نحافظ على درجة حرارة وسطية للمحلول مساوية $t_{f2} = -10°C$. معامل انتقال الحرارة من السطح الداخلي لجدار الأنبوب إلى المحلول الملحي $\alpha_1 = 1.450 W/m^2K$ ، ودرجة حرارة السطح الداخلي للأنبوب $t_{w1} = 9°C$. احسب أعظم سماكة لطبقة الجليد ($\lambda = 2.25 W/mK$) التي يمكن أن تتشكل على السطح الخارجي للأنبوب.



الشكل (14-18): تابع للمسألة (16-18)

الجواب: $\delta_2 = 21.3 mm$

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الملاحق

الملحق -1-: جدول بخار الماء المشبع الرطب بدلالة الضغط

الملحق -2-: جدول بخار الماء المشبع الرطب بدلالة درجة الحرارة

الملحق -3-: مخطط $(i-s)$ الفعلي لبخار الماء

الملحق -4-: مخطط $(i-\log p)$ للأمونيا R717

الملحق -5-: مخطط $(i-\log p)$ للفريون R134a

المحلق -6-: جدول بخار الفريون R134a المشبع الرطب

الملحق -7-: جدول بخار الأمونيا المشبع الرطب

الملحق -8-: جدول بخار الفريون R22 المشبع الرطب

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الملحق -1-

جدول بخار الماء المشبع الرطب بدلالة الضغط



الملحق -2-

جدول بخار الماء المشبع الرطب بدلالة درجة الحرارة



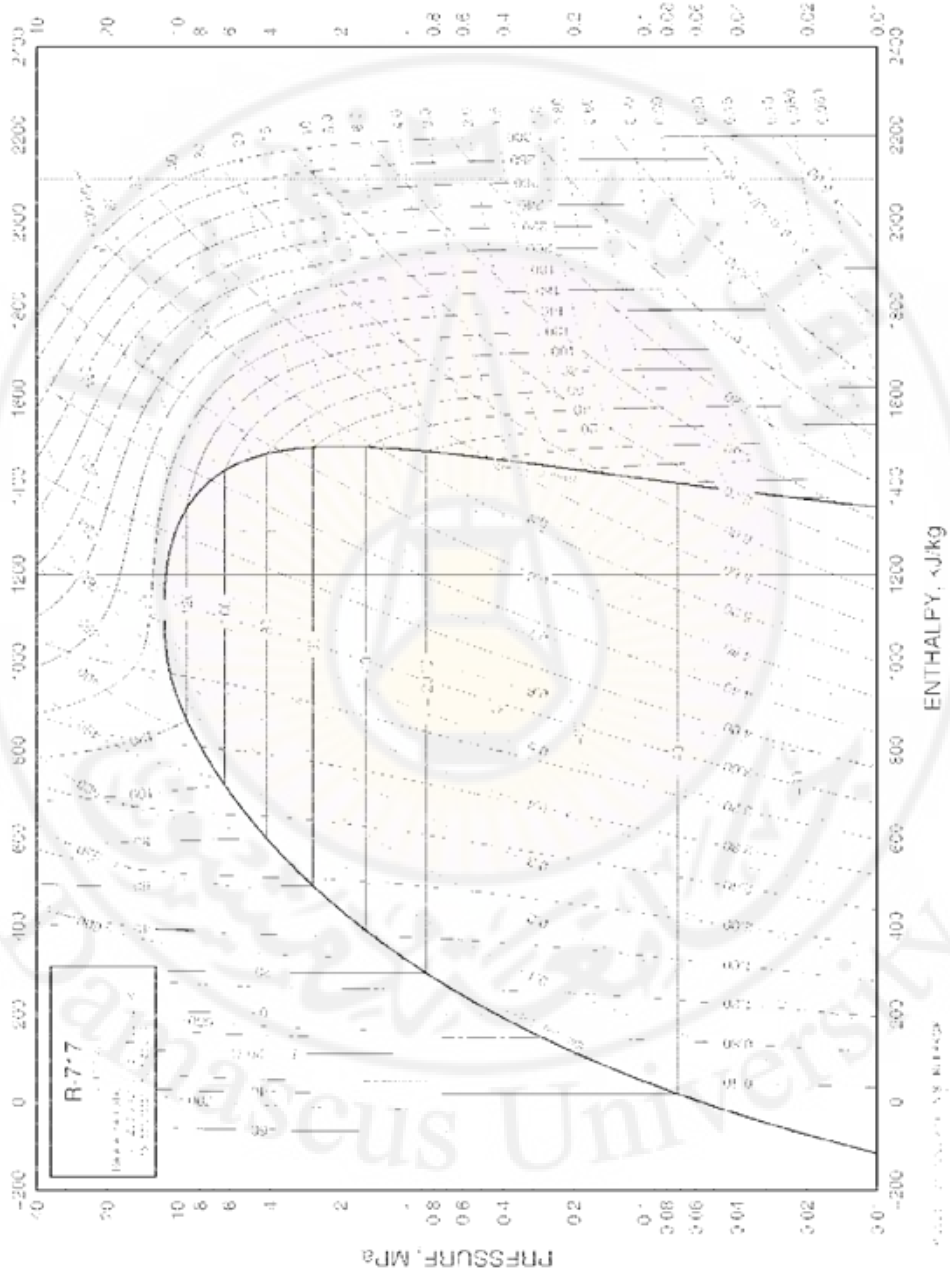
Damascus University

الملحق -3-

مخطط i-s الفعلي لبخار الماء

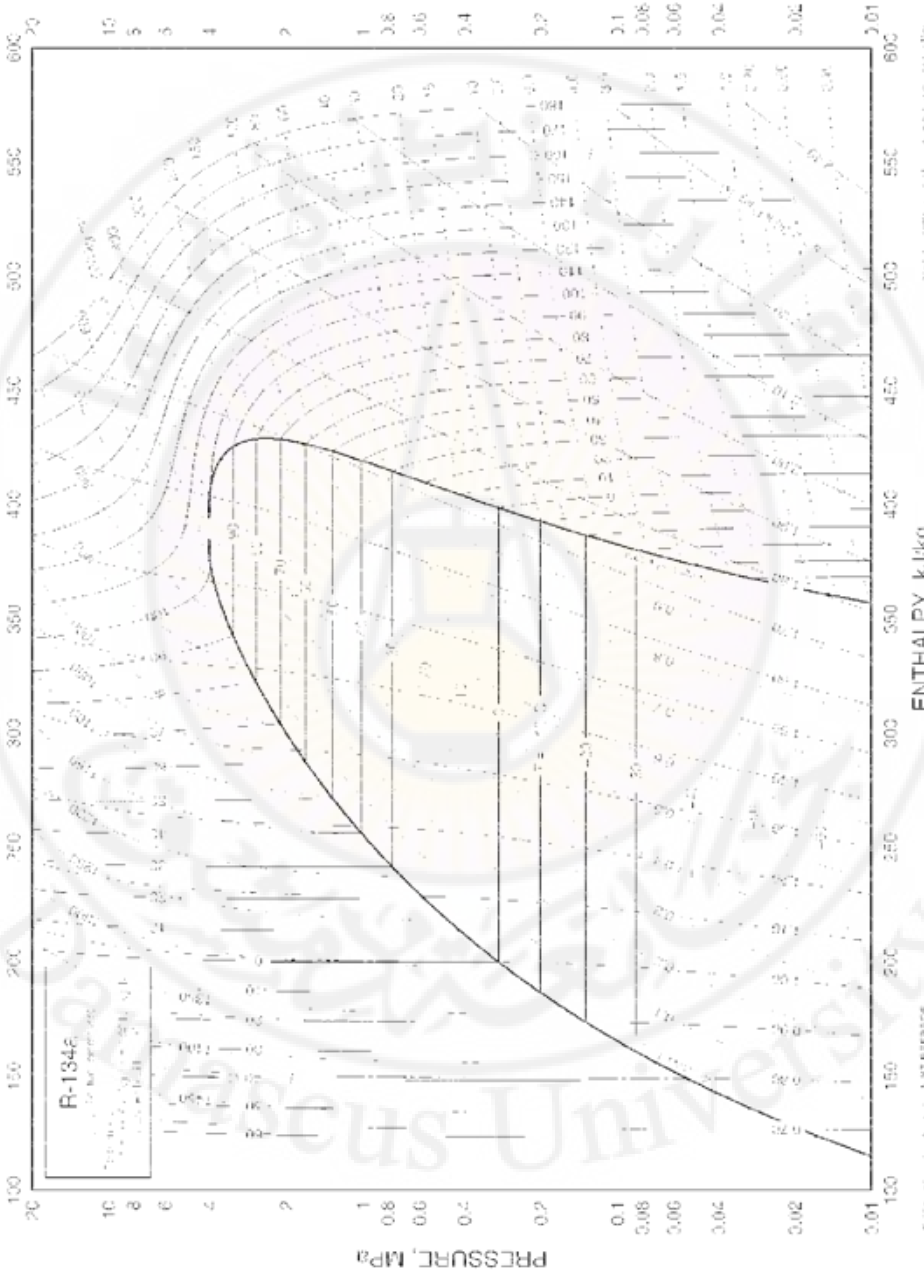
الملحق -4-

مخطط i-log p للأمونيا R717



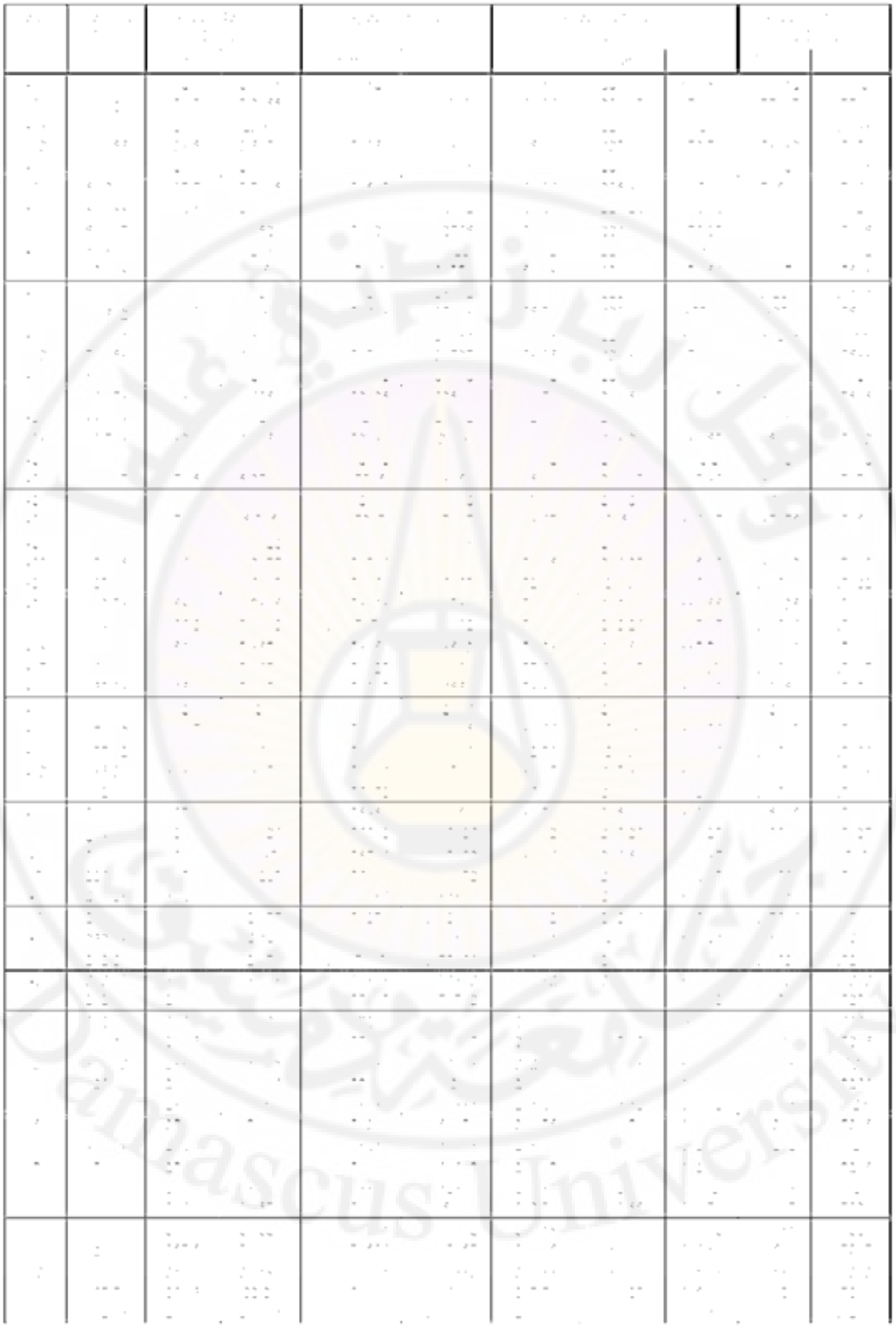
الملحق -5-

مخطط i-log p للفريون R134a

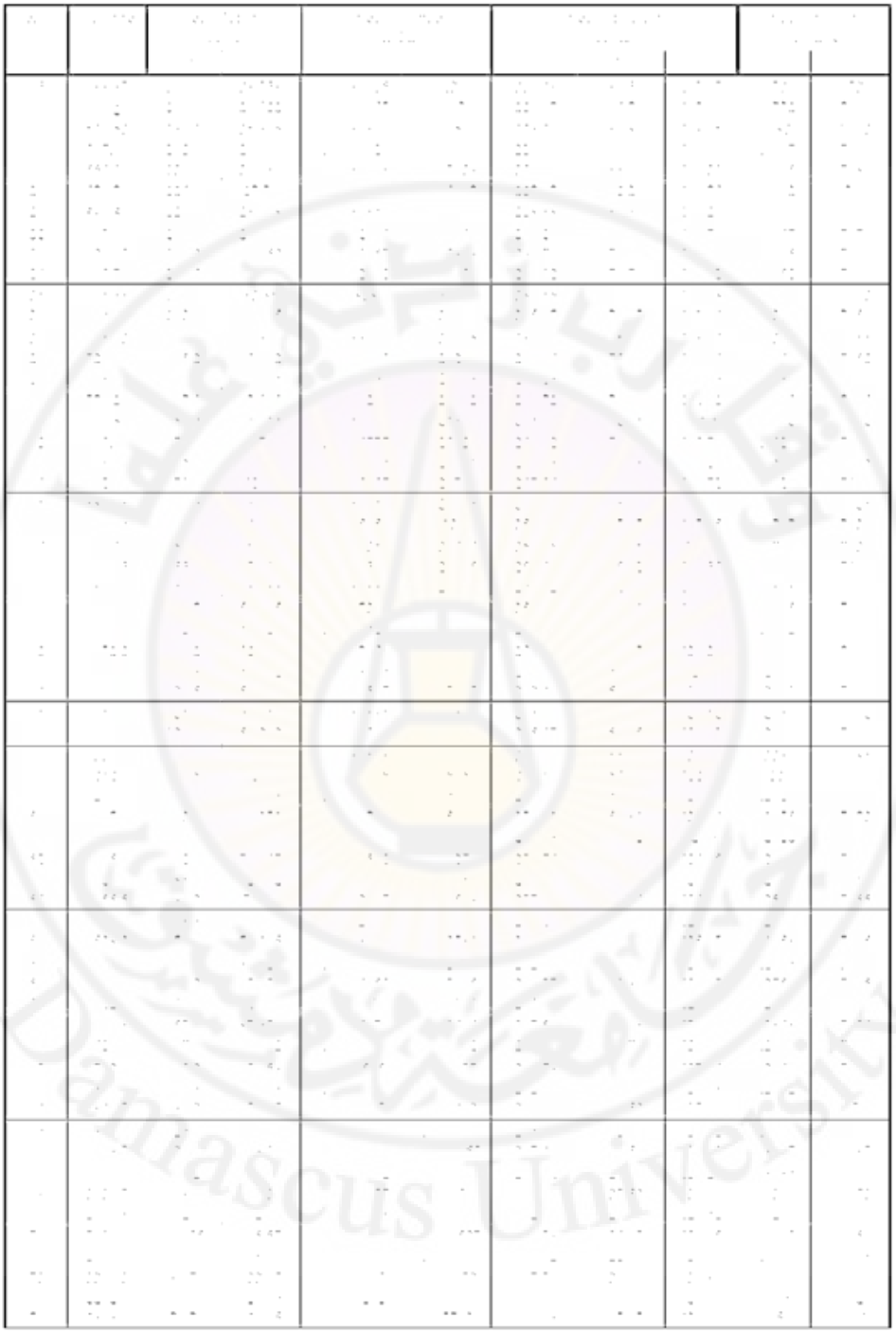


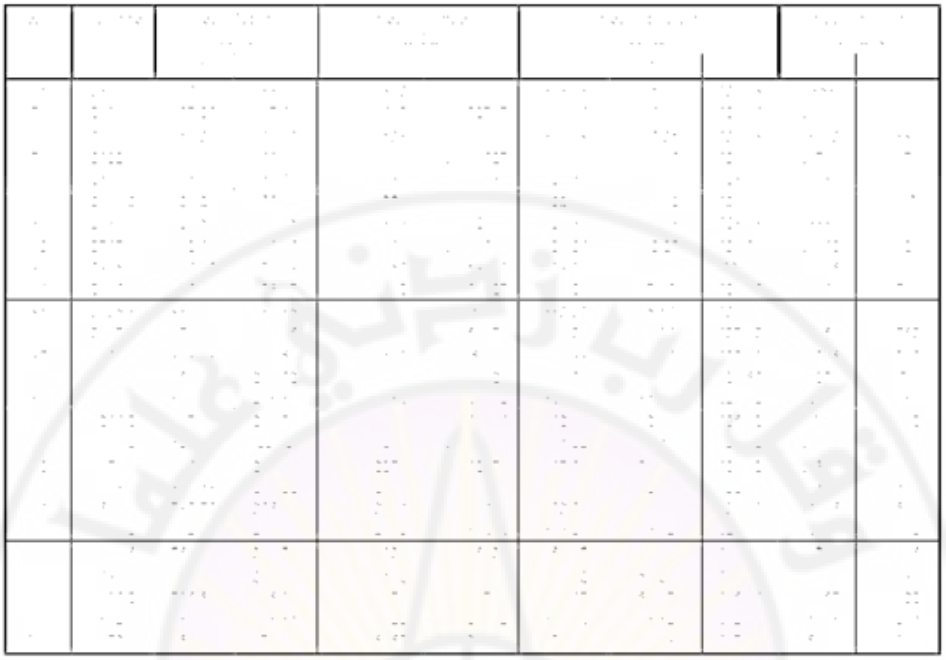
الملحق -6-

جدول بخار الفريون R134a المشبع الرطب



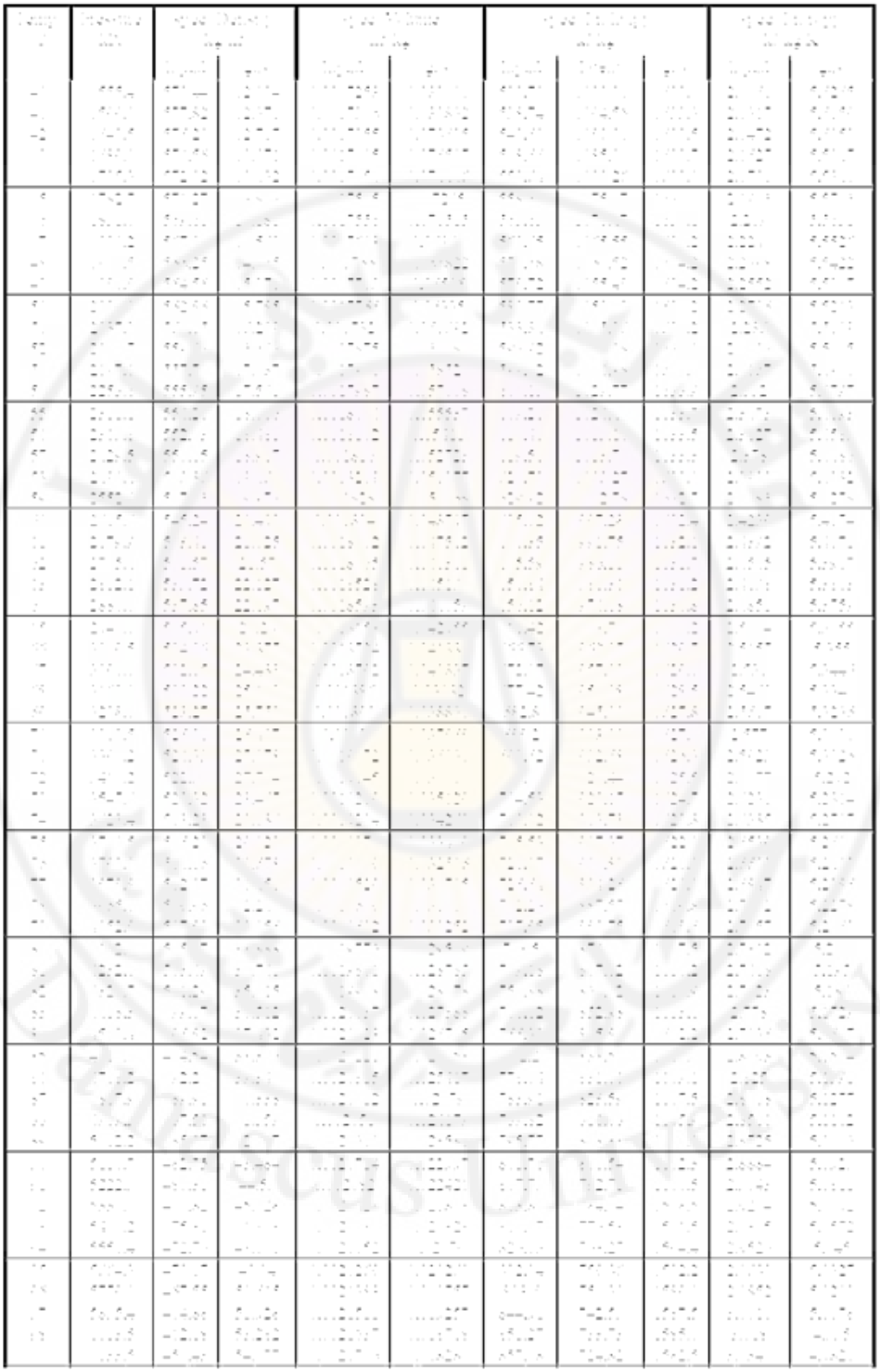
Damascus University





الملحق -7-

جدول بخار الأمونيا المشبع الرطب



Damascus University

الملحق -8-

جدول بخار الفريون R22 المشبع الرطب

Damascus University

معجم المصطلحات العلمية باللغة الإنكليزية

A

Absolute humidity	الرطوبة المطلقة
Absorption refrigerator	آلات التبريد الامتصاصية
Accelerated flow	الجريان المتسارع
Actual compressor cycle	دورة عمل الضاغط الفعلي
Actual Rankine cycle	دورة رانكين الحقيقية
Adiabatic process	العملية الأديباتية
Adiabatic compression process	عملية الانضغاط الأديباتية
Air conditioning	تكييف الهواء
Air mixing	مزج الهواء
Atmospheric air	الهواء الجوي
Available heat drop	الهبوط الحراري المتاح

B

Boiler	المرجل
Boiling	الغليان
Boundary conditions	الشروط الحدية

C

Centrifugal Compressor	ضاغط طارد مركزي
Coefficient of performance	معامل التبريد
Cold stores	مستودعات التبريد
Cooling process	عملية التبريد
Combined gas and steam cycle	الدورة البخارية الغازية
Compressor	ضاغط

Compressor dead space	الفراغ الميت للضاغط
Compressor mass flow	الإنتاجية الكتلية للضاغط
Compressor pressure ratio	نسبة ازدياد الضغط للضاغط
Compressor volumetric flow	الإنتاجية الحجمية للضاغط
Condenser	مكثف
Conduction heat transfer	انتقال الحرارة بالتوصيل
Conduction thermal resistance	المقاومة الحرارية بالتوصيل
Convection heat transfer	انتقال الحرارة بالتوصيل
Convection heat transfer coefficient	معامل انتقال الحرارة بالحمل
Convection thermal resistance	المقاومة الحرارية بالحمل
Critical point	النقطة الحرجة
Critical pressure ratio	نسبة الانضغاط الحرجة
Critical speed	السرعة الحرجة
D	
Decelerated flow	الجريان المتباطئ
Dew point temperature	درجة حرارة نقطة الندى
Diffuser	القوهة المتوسعة
Dimensionless quantity	الأعداد التشابهية اللابعدية
Dry air	الهواء الجاف
Drying	التجفيف
Drying process	عملية التجفيف
Dynamic equilibrium	التوازن الديناميكي
E	
Evaporation	التبخر

Evaporation latent heat	الحرارة الكامنة لتشكيل البخار
Evaporator	المبخر

F

Filling mixing	المزج عند التعبئة
Flows mixing	المزج عند الحركة
Forced convection	الحمل القسري
Free convection	الحمل الحر

G

Gas	غاز
Gas and vapor mixing	مزج الغازات والأبخرة
Gas constant for moist air	الثابت النوعي للهواء الرطب

H

h-p diagram	مخطط $i - \log p$
Heat exchanger	مبادل حراري
Heat flux	التدفق الحراري
Heat pump	مضخة حرارية
Heat transfer	انتقال الحرارة
Heating process	عملية التسخين
Humidity ratio	مضمون الرطوبة
Humidification process	عملية الترطيب

I

Ideal Compressor	ضاغط مثالي
Ideal Rankine cycle	دورة رانكين المثالية
Inversion curve	منحني الانقلاب

Inversion temperature	درجة حرارة الانقلاب
Isobaric process	العملية الإيزوبارية
Isochoric process	العملية الإيزوخورية
Isothermal compression process	عملية الانضغاط الإيزوترمي
Isothermal process	العملية الإيزوترمية
Isothermal surface	السطح الإيزوترمي

J

Joule Thomson effect	تأثير جول–طومسون التفاضلي

L

Laplace operator	معامل لابلاس
Liquid tables	جداول السائل

M

Mass flow rate	معدل التدفق الكتلي
Mixing at constant available volume	المزج في الحجم الإجمالي
Mixing heat exchanger	المبادل الحراري المزجي
Moist air	الهواء الرطب
Moist air degree of saturation	درجة إشباع الهواء الرطب
Moist air density	كثافة الهواء الرطب
Moist air enthalpy	إنتالبي الهواء الرطب
Moist air Mollier diagram	مخطط I-d للهواء الرطب
Moist air (p-v) diagram	مخطط p-v للهواء الرطب
Moist air specific heat	الحرارة النوعية للهواء الرطب
Multi stage Compressor	ضاغط متعدد المراحل

N

Nozzle	فوهة
Nozzle critical cross section	المقطع الحرج للفوهة
O	
Overall heat transfer coefficient	عامل انتقال الحرارة الإجمالي
P	
Partial pressure	الضغط الجزئي
Polytropic compression process	عملية الانضغاط البوليتروبية
Porperties	بارامترات
Psychrometric chart	المخطط السايكرومتري
R	
Radiation heat transfer	انتقال الحرارة بالإشعاع
Reciprocating compressor	ضاغط مكبسي
Refrigerant	وسيط التبريد
Refrigerator	آلة تبريد
Refrigeration capacity	الإنتاجية التبريدية
Refrigeration cycle	دورة تبريدية
Regenerative heat exchange	مبادل حراري استرجاعي
Relative humidity	الرطوبة النسبية
S	
Saturated liquid line	المنحنى الحدي الأدنى
Saturated vapor line	المنحني الحدي الأعلى
Saturated moist air	الهواء الرطب المشبع
Saturated moist air curve	منحني الهواء الرطب المشبع
Saturated vapor	البخار المشبع الجاف

Saturated vapor properties	بارامترات البخار المشبع الجاف
Saturated water	الماء المشبع
Saturated liquid properties	بارامترات السائل عند الغليان
Saturation tables	جداول البخار الرطب
Saturation Temperature	درجة حرارة الإشباع
Speed of sound	سرعة الصوت
State	حالة
Steam	بخار
Steam Carnot cycle	دورة كارنو لبخار الماء
Steam engine cycle	دورة المحرك البخاري
Steam quality	كسر الجفاف
Steam turbine	العنفة البخارية
Suction stroke	شوط السحب
Superheated Steam	البخار المحمص
Superheated steam tables	جداول البخار المحمص
Supersonic flow	الجريان فوق الصوتي
Surface heat exchanger	مبادل حراري سطحي
T	
Temperature field	حقل درجات الحرارة
Temperature gradient	تدرج درجة الحرارة
Thermal efficiency	المردود الحراري
Thermodynamic processes	العمليات الترموديناميكية
Throttling	الخنق

Throttling valve	صمام التمدد
Transient convection	التوصيل غير المستقر
Turbine	عنفة
Turbo compressor	ضاغط توربيني

V

Vapor	بخار
Vapor-compression refrigerator	آلات التبريد البخارية الضاغطية
Vapor jet refrigerator	آلات التبريد القاذفة للبخار
Volumetric compressor	ضاغط حجمي
Vortex tube	الأنبوبة الإعصارية

W

Water Steam (p-v) diagram	مخطط p-v لبخار الماء
Water Steam (T-s) diagram	مخطط T-s لبخار الماء
Water Steam (h-s) diagram	مخطط i-s لبخار الماء
Wave length	طول الموجة
Wet vapor	البخار الرطب
Wet bulb thermometer	ميزان درجة الحرارة الرطبة

Damascus University

جدول الرموز المستخدمة

الرموز اللاتينية

A	المساحة؛ قابلية الجسم لامتصاص الأشعة
A_a	قابلية امتصاص الجسم مطلق السواد للأشعة
a	معامل الانتشار الحراري؛ سرعة الصوت
Bi	عدد بيو
C	الفراغ النسبي الميت
COP	معامل الأداء للأنبوبة الإعصارية
c	السعة الحرارية؛ سرعة الغاز ؛ ثابت
c_{cr}	سرعة الغاز الحرجة
c_p	السعة الحرارية عند ضغط ثابت
c_{pa}	السعة الحرارية عند ضغط ثابت للهواء الجاف
c_{pv}	السعة الحرارية عند ضغط ثابت لبخار الماء
c_v	السعة الحرارية عند حجم ثابت
$const.$	ثابت
D	قطر أنبوب؛ قابلية الجسم لتمرير الأشعة
DB	درجة الحرارة الجافة
DP	درجة حرارة نقطة الندى
d	قطر أنبوب؛ مضمون الرطوبة للهواء الرطب
d_{eq}	القطر المكافئ
d_{in}	القطر الداخلي للأنبوب
d_{out}	القطر الخارجي للأنبوب

d_{sa} مضمون الرطوبة للهواء الرطب المشبع

E الطاقة المشعة من واحدة مساحة سطح الجسم في واحدة الزمن

E_a قابلية إشعاع الجسم مطلق السواد

$E_{\omega a}$ كثافة التيار الإشعاعي للجسم مطلق السواد بالاتجاه الناظمي على السطح

$E_{\omega\lambda a}$ الكثافة الطيفية لتيار الإشعاع للجسم مطلق السواد

e الأساس الطبيعي

f مساحة السطح

Fo عدد فوريه

g تسارع الجاذبية

Gr عدد غراشوف

h الإنتالبي النوعي

h_v الهبوط الحراري المتاح

I الإنتالبي

I_{max} إنتالبي المزيج

i الإنتالبي النوعي

i' الإنتالبي النوعي للماء المشبع

i'' الإنتالبي النوعي للبخار المشبع الجاف

i_a الإنتالبي النوعي للهواء الجاف

i_v الإنتالبي النوعي لبخار الماء

i_χ الإنتالبي النوعي للبخار المشبع الرطب

k أس الأديبات؛ عامل انتقال الحرارة الإجمالي

k_a ثابت التشابه الهندسي

l	طول
l_c	البعد المميز لسطح التبادل الحراري
ℓ	طول شوط المكبس
M	عدد ماخ
m	الكتلة
m'	كتلة الماء المشبع
m''	كتلة البخار المشبع الجاف
$\dot{m}$	معدل التدفق الكتلي
$\dot{m}_{max}$	معدل التدفق الكتلي الأعظمي
$\dot{m}_r$	الإنتاجية الكتلية للضاغط الفعلي
$\dot{m}_v$	الإنتاجية الكتلية للضاغط النظري
m_{mix}	كتلة الخليط
m_a	كتلة الهواء الجاف في الهواء الرطب
m_v	كتلة بخار الماء في الهواء الرطب
N	الاستطاعة
N_i	الاستطاعة النظرية للضاغط الإيزوترمي
N_k	الاستطاعة النظرية للضاغط الأدياباتي
N_p	الاستطاعة النظرية للضاغط البوليتروبي
Nu	عدد نوسلت
n	أس البوليتروب؛ نسبة الكتل خلال المزج
Pe	عدد بكله
Pr	عدد براندل
p	الضغط

p_A الضغط المطلق

p_a الضغط الجزئي للهواء الجاف في الهواء الرطب

p_B الضغط البارومتري (الجوي)

p_{cr} الضغط الحرج

p_M الضغط المانومتري

p_s ضغط الإشباع

p_v الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء الرطب

p_{vs} الضغط الجزئي لبخار الماء المشبع في الهواء الرطب

Q كمية الحرارة؛ التدفق الحراري

Q_A تيار الإشعاع الممتص

Q_a كمية الحرارة المطروحة في وعاء امتصاص آلة التبريد الامتصاصية

Q_c الحمل الحراري المطبق على المكثف

Q_D تيار الإشعاع النافذ

Q_d كمية الحرارة المقدمة في مولد آلة التبريد الامتصاصية

Q_k كمية الحرارة المطروحة في مكثف آلة التبريد الامتصاصة

Q_R تيار الإشعاع المنعكس

Q_0 الإنتاجية التبريدية لآلة التبريد

Q_τ كمية الحرارة المطروحة (أو المكتسبة) بعد فاصل زمني τ

Q_∞ كمية الحرارة المطروحة (أو المكتسبة) في نهاية عملية التبريد (أو التسخين)

q كمية الحرارة النوعية؛ التيار الحراري

q_a كمية الحرارة النوعية المكتسبة خلال دورة حرارية عكسية

q_i كمية الحرارة النوعية المكتسبة خلال دورة حرارية مباشرة

q_2	كمية الحرارة النوعية المطروحة خلال دورة حرارية مباشرة
q_c	كمية الحرارة النوعية المطروحة في المكثف
q_{fr}	كمية الحرارة النوعية الناتجة عن الاحتكاك
q_l	التيار الحراري لواحدة طول الجدار الأسطواني
q_p	كمية الحرارة النوعية في عملية إيزوبارية
R	ثابت الغاز المثالي؛ المقاومة الحرارية؛ قابلية الجسم لعكس الأشعة
RH	الرطوبة النسبية
R_a	ثابت الغاز المثالي للهواء الجاف
R_g	المقاومة الحرارية للطبقة الغازية
R_k	المقاومة الحرارية في منطقة التماس
R_v	ثابت الغاز المثالي لبخار الماء
R_w	المقاومة الحرارية للجدار
R_δ	المقاومة الحرارية للتماس
Re	عدد رينولدز
r	الحرارة الكامنة لتشكيل البخار؛ نصف قطر الأنبوب
r_a	الحصة الحجمية للهواء الجاف في الهواء الرطب
r_v	الحصة الحجمية لبخار الماء في الهواء الرطب
s	الإنتروبي النوعي
s'	الإنتروبي النوعي للماء المشبع
s''	الإنتروبي النوعي للبخار المشبع الجاف
s_x	الإنتروبي النوعي للبخار المشبع الرطب
T	درجة الحرارة المطلقة
T_c	درجة الحرارة في المكثف

T_0	درجة الحرارة في المبخر ؛ درجة حرارة السطح مطلق السواد
T_{bn}	درجة حرارة الانقلاب
t	درجة الحرارة
t	درجة الحرارة الوسطية
t_{cr}	درجة الحرارة الحرجة
t_d	درجة الحرارة الجافة للهواء الرطب
t_{dc}	درجة حرارة نقطة الندى
t_f	درجة حرارة الوسط (سائل، غاز)
$t_{f\,mid}$	درجة الحرارة الوسطية للمائع
t_0	درجة الحرارة الابتدائية
t_s	درجة حرارة الإشباع
t_w	درجة الحرارة الرطبة للهواء الرطب؛ درجة حرارة سطح الجدار
Δt	فرق درجات الحرارة
$\overline{\Delta t}$	فرق درجات الحرارة الوسطي اللغاريتمي
Δt_m	الفرق بين درجة حرارة السائل والجدار عند المدخل
Δt_{mm}	الفرق بين درجة حرارة السائل والجدار عند المخرج
U	الطاقة الداخلية
U_{mix}	الطاقة الداخلية للمزيج
ΔU	تغير الطاقة الداخلية
u	الطاقة الداخلية النوعية
u'	الطاقة الداخلية النوعية للماء المشبع
u''	الطاقة الداخلية النوعية للبخار المشبع الجاف
u_x	الطاقة الداخلية النوعية للبخار المشبع الرطب

Δu	تغير الطاقة الداخلية النوعية
V	حجم
V'	حجم الماء المشبع؛ حجم السحب الفعلي للضاغط
V''	حجم البخار المشبع الجاف
$\dot{V}$	معدل التدفق الحجمي؛ الإنتاجية الحجمية للضاغط
$\dot{V}_z$	الإنتاجية الحجمية للضاغط الفعلي
$\dot{V}_t$	الإنتاجية الحجمية للضاغط النظري
V_c	حجم الفراغ الميت
V_h	الحجم العامل للضاغط
V_{mix}	حجم الخليط
v	الحجم النوعي
v'	الحجم النوعي للماء المشبع
v''	الحجم النوعي للبخار المشبع الجاف
v_{cr}	الحجم النوعي الحرج
v_{mix}	الحجم النوعي للمزيج
v_z	الحجم النوعي للبخار المشبع الرطب
W	العمل
W_1	عمل شوط السحب
W_2	عمل شوط الطرد
W_c	عمل الانضغاط
W_o	العمل النظري
WB	درجة حرارة الميزان الرطب
w	العمل النوعي

w_c العمل النوعي للضاغط

w_k العمل النوعي لعملية الانضغاط

w_{id} العمل النوعي النظري؛ العمل النوعي المفيد خلال دورة حرارية مباشرة؛ السرعة المميزة للمائع

$w_{id,g}$ العمل النوعي المفيد لدورة حرارية غازية

$w_{id,steam}$ العمل النوعي المفيد لدورة حرارية بخارية

w_i' العمل النوعي الفعلي

$w_{id,i}$ العمل النوعي النظري للضاغط الإيزوترمي

$w_{id,k}$ العمل النوعي النظري للضاغط الأديباتي

$w_{id,n}$ العمل النوعي النظري للضاغط البوليتروبي

w_{pol} العمل النوعي في العملية البوليتروبية

w_m السرعة الوسطية لحركة الجزيئات

Δw_v الضياع في قابلية العمل

X الإحداثية المكانية اللابعدية

x إحداثي للموضع

Y كسر الرطوبة؛ إحداثي للموضع

z عدد مراحل الانضغاط؛ الارتفاع؛ إحداثي للموضع

الرموز اليونانية

α معامل انتقال الحرارة بالحمل؛ معامل الاستهلاك النوعي للبخار

α_l معامل جول–طومسون التفاضلي للخنق

β نسبة الانضغاط؛ معامل التدفئة؛ نسبة قطر الطرف البارد للأنبوبة الإعصارية؛ معامل درجة الحرارة للتمدد الحجمي للمائع

β_{cr} نسبة الانضغاط الحرجة

Λ الطول الوسطي لمسار الجزيء

δ سماكة جدار

χ كسر الجفاف؛ نسبة الانضغاط

ε معامل التبريد؛ نسبة الرطوبة الحرارية لعملية تغير حالة الهواء الرطب؛ درجة سواد الجسم

φ الرطوبة النسبية؛ معامل السرعة للفوهات؛ زاوية

η_{ad} المردود الأديباتي

η_c نسبة هبوط الحرارة الفعلي إلى النظري

η_{is} المردود الإيزوانتروبي للأنبوبة الإعصارية

η_t المردود الحراري

η_{tc} المردود الحراري لدورة كارنو

ν معامل لابلاس

λ معامل التوصيل الحراري؛ معامل التغذية (الملء)؛ طول الموجة

λ_v المعامل الحجمي

λ_{fr} معامل الخنق

λ_{eq} معامل التوصيل الحراري المكافئ

λ_0 معامل التوصيل الحراري عند $t = 0°C$

λ_{opt} طول الموجة الموافق لكثافة تيار إشعاع أعظمية

λ_r معامل الإحكام

λ_w المعامل الحراري

Π المحيط المبلل

π عدد باي (3.1416)

Θ درجة الحرارة اللابعدية

$\overline{\Theta}$	درجة الحرارة الوسطية اللابعدية
θ	درجة الحرارة الزائدة
$\overline{\theta}$	درجة الحرارة الزائدة الوسطية
θ_0	درجة الحرارة الزائدة الابتدائية
μ	الوزن الجزيئي؛ اللزوجة التحريكية للمائع
μ_a	الوزن الجزيئي للهواء الجاف
μ_c	الكسر البارد للأنبوبة الإعصارية
μ_{mix}	الوزن الجزيئي للخليط
μ_{H_2O}	الوزن الجزيئي للماء
ν	اللزوجة الحركية للمائع
ρ	الكثافة
ρ'	كثافة الماء المشبع
ρ'_1	الرطوبة المطلقة للهواء
ρ'_{1s}	الرطوبة المطلقة للهواء المشبع
ρ''	كثافة البخار المشبع الجاف
ρ_a	كثافة الهواء الجاف
ρ_{cr}	الكثافة الحرجة
σ_0	ثابت ستيفان–بولتسمان
τ	الزمن؛ درجة حرارة الإشباع الأديباتي للهواء
ω	مضمون الرطوبة للهواء الرطب
ξ	التركيز ؛ معامل الطاقة للفوهات
ψ	درجة إشباع الهواء الرطب

المراجع المعتمدة

المراجع باللغة العربية

١- الترموديناميك: د. مفيد هلال، د. سهيل مرشة – منشورات جامعة دمشق، ٢٠٠٠.

٢- الترموديناميك -١-: د.مفيد هلال – ميكانيك عام، منشورات جامعة دمشق، ٢٠٠٧.

٣- أسس الهندسة الميكانيكية "الترموديناميك": د.مروان شرباتي، د.محمد سعيد الجراح، م. برهان داغستاني – منشورات جامعة دمشق، ١٩٩٠.

٤- الترموديناميك -٢-: د.مفيد هلال – منشورات جامعة دمشق، ١٩٨٦.

٥- الكيمياء العامة: جيروم ل، روز بزج، سلسلة ملخصات شوم، ترجمة الدكتور محمد عبد الباري – جمهورية مصر العربية، ١٩٧٧.

٦- محركات الاحتراق الداخلي جزء -١- : د.جميل غوجل – منشورات جامعة دمشق.

٧- الحرارة والديناميكا الحرارية: مارك وريمانسكي، ريتشارد وديتمان ترجمة الدكتور محسن سالم رضوان – جامعة حلوان – جمهورية مصر العربية، طبعة رابعة ١٩٩٨.

٨- الهندسة الميكانيكية ٢ -ترموديناميك هندسي-: د. رضوان المصري منشورات جامعة البعث، ١٩٩٨.

٩- المرشد في الترموديناميك التكنيكي: ترجمة د.مفيد هلال، منشورات مطبعة الزهراء، ١٩٨٤.

١٠- الآلات حرارية -العنفات الغازية- د. أحمد حميد، د. جمال العباس، منشورات جامعة دمشق (٢٠٠٣).

١١- مسائل في انتقال الحرارة – د. نديم مخيبر، د. سهيل مرشة – منشورات جامعة دمشق، ١٩٩٧.

١٢- آلات ومحطات التبريد - د. نديم مخيبر ، د. علي عيسى - منشورات جامعة دمشق، ٢٠٠٨.

١٣- آلات حرارية - د. أحمد حميد، د. جمال العباس - منشورات جامعة دمشق ٢٠٠٧.

المراجع باللغة الروسية

١- الهندسة الحرارية: (لاريكوف ن، ن) الطبعة الثالثة ١٩٨٥-موسكو.

٢- الترموديناميك وانتقال الحرارة: (بولغارسكي أ.ب، موخانتشييف غ أ، شوكين ف.ك) موسكو، ١٩٧٥.

٣- الهندسة الحرارية وانتقال الحرارة: (ناشوكين ف ف) - موسكو، ١٩٨٠.

٤- مسائل بالترموديناميك الهندسي: (رابينوفيتش) - موسكو ١٩٥٣.

٥- الترموديناميك الهندسي وانتقال الحرارة: (يودايف ب ن) - موسكو ١٩٨٨.

٦- الترموديناميك الهندسي وأسس انتقال الحرارة والهيدروليك (لاشوتينا ن غ، ماكاشلوفا أو ف، مدفديف ب م) لينينغراد، ١٩٨٨.

٧- الترموديناميك الهندسي: (كيريلين ف أ، سيتشوف ف ف، شندلين أ ي) - موسكو، ١٩٦٨.

٨- الهندسة الحرارية: (تشتشتكين أ ف، زانمونيتس ن أ) موسكو، ١٩٨٦.

٩- مسائل بالترموديناميك الهندسي ونظرية التبادل الحراري والكتلي (كوموفا ف ي، بيتراجيتسكوفا غ ب) موسكو، ١٩٨٦.

١٠- مسائل بالترموديناميك الهندسي الطبعة الثالثة مجموعة من المؤلفين موسكو ١٩٨١.

١١- مسائل بالترموديناميك الهندسي وانتقال الحرارة الطبعة الثانية بإشراف (يودايف) - موسكو ١٩٦٨.

١٢- الهندسة الحرارية: مجموعة من المؤلفين - موسكو ١٩٨٦.

١٣- الترموديناميك الهندسي وأسس انتقال الحرارة (كوزوفليوف ف أ) - موسكو ١٩٧٥.

١٤- أسس الهندسة الحرارية: (ايليوخين م س، سيدرونكوف ف ت) موسكو ١٩٨٧.

١٥- الترموديناميك الهندسي الطبعة الرابعة: (فوكالوفيتش م ب، نوفيكوف ي ي) موسكو ١٩٦٨.

١٦- الترموديناميك الهندسي والمحركات الحرارية: الطبعة الثانية (باليان س ف) لينغراد ١٩٧٣

١٧- الهندسة الحرارية: قنسطنطين س.م و آخرين - كييف ١٩٨٦.

١٨- الترموديناميك الهندسي وانتقال الحرارة: (كوشنيرف ف ي) وآخرين موسكو ١٩٨٦ .

١٩- أسس الترموديناميك والهندسة الحرارية: الطبعة الثانية (بورشاكوف ب ب، رومانوف ب أ) - موسكو ١٩٨٨.

٢٠- مسائل بالترموديناميك وانتقال الحرارة: مجموعة مؤلفين - موسكو ١٩٧٢.

٢١- محاضرات معهد باومن التقني في موسكو ١٩٩٨ (كوتوف ف ي).

٢٢- محركات الاحتراق الداخلي لآلات البناء والطرق: الطبعة الخامسة (رانيف أ ب) - موسكو ١٩٨٦.

٢٣- الترموديناميك وانتقال الحرارة ومحركات الاحتراق الداخلي (جيليزكاه ب أ) وآخرين: مينسك ١٩٨٥.

٢٤- محركات الاحتراق الداخلي: مجموعة مؤلفين، موسكو ١٩٩٠.

٢٥- فيزياء-١- في مجلدين مترجم من الانكليزي إلى الروسي (دوغلاس س جيانكولي) ١٩٨٤.

٢٦- الترموديناميك - (بالاييف ن م): كييف ١٩٨٧.

٢٧- التهوية وتكييف الهواء (بيتروف يو س) لينغراد ١٩٨٤.

٢٨- التدفئة والتهوية (ادروزدوف ف ف) موسكو ١٩٨٤.

٢٩- انتقال الحرارة (كاستشنكه ف ب وآخرين) موسكو ١٩٨١.

٣٠- المضخات –المراوح – الضواغط (تشركاسي ف م) موسكو ١٩٧٧.

٣١- مسائل في التبادل الحراري والتبريد الصناعي (مجموعة مؤلفين) موسكو ١٩٧٦.

٣٢- أسس الهندسة الحرارية (أوخوتين ف س و أخرين) موسكو ١٩٨٤.

٣٣- الآلات الضاغطية (ميخيلاف ف ك، فوروشيلوف ف ب) موسكو ١٩٨٩.

٣٤- مسائل في انتقال الحرارة (فوسكرسسكي ك د) موسكو لينتغراد ١٩٥٩.

المراجع باللغة الإنكليزية

1- SONNTAG R.E, BORGNAKKE, C: FUNDAMENTALS of Thermodynamics, seventh Edition , Wiley& Sons Inc, 2009.

2- Moran, M. J., Shapiro , H.N: Fundamentals of Thermodynamics, Fifth Edition, Wiley& Sons Inc, 2006.

3- MERLE C. POTTER, CRAIG W. SOMERTON: THEORY AND PROBLEMS of THERMODYNAMICS FOR ENGINEERS, 1993

4- Yunus A. Cengel, Michael A. Boles: Thermodynamics An Engineering Approach.

5- ASHRAE Handbook of fundamentals, ASHRAE , New York, 1997.

6- ANDREWD . ALTHOUS, CARI H, TURNQUIS, ALFREDF .B MCCIANO: Modern Refrigeration and Air Conditioning.

7- WolfgangWagner, Hans-Joachim Kretzschmar: International Steam Tables, Second Edition, 2008.

8- Donald R. Pitts, PhD, Leighton E. Sissom , PE: Theory and Problems of Heat Transfer Second Edition .

9- Adrian Bejan, Allan D. Kraus: FUNDAMENTALS OF HEAT EXCHANGER DESIGN, 2003.

اللجنة العلمية

أ.د. مروان شرباتي

أ.د. وجيه ناعمة

أ.د. عبد الرحمن الشياح

المدقق اللغوي

د. حمود يونس

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة (مديرية الكتب والمطبوعات)

وقل رب زدني علما
Damascus University