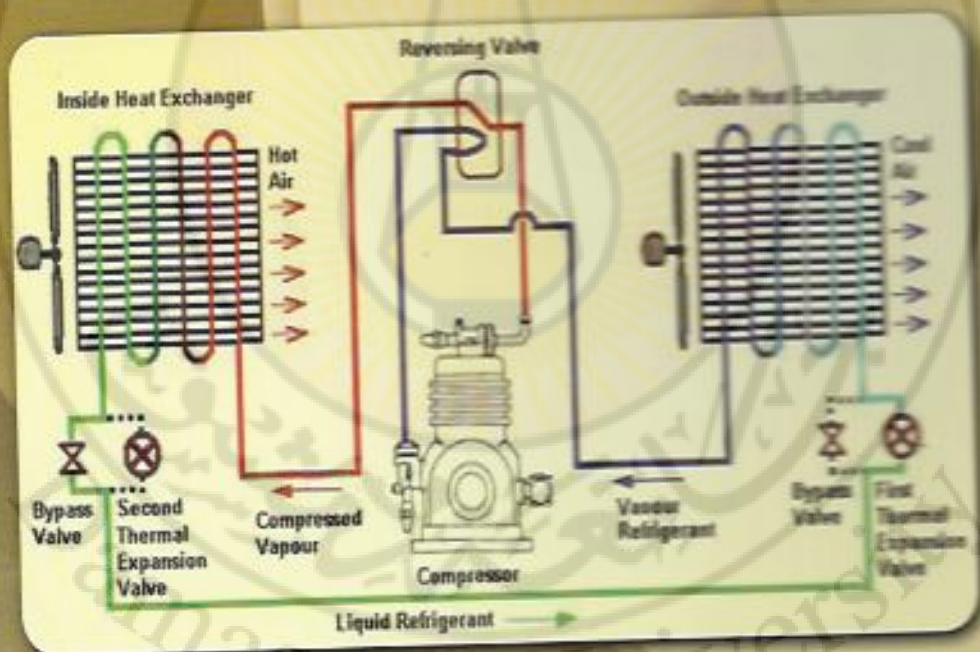


المضخات الحرارية وتطبيقاتها



الدكتور المهندس
 وجيه محمد خير ناعمة
 أستاذ مساعد في قسم الميكانيك العام



المضخات الحرارية وتطبيقاتها



منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

المضخات الحرارية ونظرياتها

الدكتور المهندس وجيه محمد خير ناعمة

أستاذ مساعد في قسم الميكانيك العام

1432-1431 هـ

2011-2010 م

جامعة دمشق

11	مقدمة
13	الفصل الأول: المضخة الحرارية
13	1-1 تعريف
13	1-2 تعريف المضخة الحرارية
15	1-3 عمل المضخة الحرارية
19	1-4 منابع الطاقة للمضخة الحرارية
31	1-5 الطاقة المطلوبة للتدفئة وتأمين الماء الساخن الصحي
32	1-6 مسوغات استخدام المضخة الحرارية
36	1-7 اعتبار مبالاة الطاقة
37	الفصل الثاني: أنظمة المضخات الحرارية
37	1-1-2 دائرة المضخة الحرارية
41	1-1-2-1 مبدأ عمل المضخة الحرارية
43	1-1-2-2 الدارة الترموديناميكية للمضخة الحرارية
48	1-1-2-3 معامل الأداء للمضخة الحرارية
52	1-2 تصنيف المضخات الحرارية
53	1-2-1 التصنيف وفقاً لعمل الدارة الترموديناميكية
53	1-2-1-1 الدارة الانضغاطية التبخيرية
54	1-2-1-2 الدورة الأساسية للمضخة الحرارية الامتصاصية
57	1-2-2 تصنيف المضخات وفقاً ل منابع الطاقة
68	1-2-2-3 التصنيف وفقاً لأنظمة التدفئة
68	1-2-2-1 نظام تدفئة أحادي التكافؤ
68	1-2-2-2 نظام تدفئة ثنائي التكافؤ والمركب

71.....	الفصل الثالث: عناصر تجهيزات المضخة الحرارية
71.....	1-3- المبادلات الحرارية
72.....	1-1-3- أنواع المبادلات الحرارية
73.....	2-1-3- حساب فرق درجات الحرارة للو غار ي تم ية الو سط ية للمبادل الحراري
74.....	3-1-3- حساب مساحة سطح التبادل الحراري للمبادل الحراري وفقاً للاستطاعة
75.....	4-1-3- المبخرات
84.....	1-4-1-3- المبخرات الهوائية
90.....	2-4-1-3- مبخرات تبريد السائل
103.....	5-1-3- المكثفات
138.....	2-3- الضواغط
138.....	1-2-3- الضواغط الترددية
142.....	2-2-3- الضواغط الدورانية
144.....	3-2-3- الضواغط اللولبية
145.....	4-2-3- الضواغط الحلزونية
145.....	5-2-3- الضواغط الطاردة المركزية
147.....	6-2-3- تبريد الضواغط
149.....	7-2-3- اختيار الضاغط
152.....	3-3- مضخات الماء
152.....	1-3-3- حساب استطاعة المضخة المطلوبة لنظام انتفاة بالمضخة الحرارية
153.....	2-3-3- المضخات الترددية
155.....	3-3-3- المضخات الدورانية
157.....	4-3-3- المضخات الطاردة المركزية
160.....	5-3-3- منحنيات الأداء لمضخات الطرد المركزي
161.....	6-3-3- القوانين التي تحكم أداء المضخات Affinity Laws
162.....	7-3-3- قوانين مضخة الطرد المركزي عند ثبات قطر التولاب (التوربين) وتغير سرعة دورانها
166.....	8-3-3- تشغيل المضخات على التوازي
166.....	9-3-3- تشغيل المضخات على التوالي

167.....	4-3 المرواح
167.....	1-4-3 أنواع المرواح
168.....	2-4-3 استطاعة المرواح

الفصل الرابع: وسائط التبريد للدارات البخارية الانضغاطية - الامتصاصية الثنائية للمضخات

171.....	الحرارية
171.....	1-4 وسائط التبريد وخصائصها
173.....	1-1-4 وسائط التبريد الأولية
189.....	2-1-4 وسائط التبريد الثانوية
192.....	3-1-4 وسائط التبريد البديلة
197.....	4-1-4 استخدام ثنائيات وسيط التبريد في المضخة الحرارية
201.....	2-4 وسائط التبريد الامتصاصية الثنائية وخصائصها
203.....	3-4 جداول ومخططات وسائط التبريد

الفصل الخامس: المضخات الحرارية البخارية الانضغاطية الميكانيكية

221.....	1-5 مبدأ العمل وتمثيل الدارة
223.....	2-5 العمليات الترموديناميكية للدارة
226.....	3-5 عمل الدارة على مخطط LOG P-H
233.....	4-5 ضاغط المضخة الحرارية
233.....	1-4-5 العوامل المؤثرة على نسبة الانضغاط لعمل الضاغط
235.....	2-4-5 نسبة الانضغاط
236.....	3-4-5 معامل الانضغاط الحجمي γ
237.....	4-4-5 الطاقة الكهربائية للضاغط
237.....	5-4-5 معامل أداء المضخة الحرارية

239.....	الفصل السادس: الدارة الامتصاصية للمضخات الحرارية
239.....	مقدمة
240.....	6-1- مبدأ العمل آلة التبريد الامتصاصية ذات المرحلة الواحدة
243.....	6-2- الأسس الترموديناميكية لمبدأ التشغيل
247.....	6-2-1- مخطط الضغط ودرجة الحرارة $\log p \cdot \frac{1}{T}$ لآلة التبريد - المضخة الحرارية الامتصاصية
249.....	6-2-2- الكمية النوعية لدوران محلول مزيج التبريد
250.....	6-2-3- مخطط الانثالبي والتركيز
252.....	6-3- معادلات توازن الطاقة والكتل لآلة المضخة الحرارية-التبريد الامتصاصية
252.....	6-3-1- المبخر
252.....	6-3-2- المكثف
253.....	6-3-3- الماص (وعاء الامتصاص)
253.....	6-3-4- المولد
254.....	6-3-5- المبادل الحراري
254.....	6-3-6- مضخة تكوير المحلول
255.....	6-4- توازن الاستطاعات لآلة التبريد الامتصاصية
255.....	6-5- معامل الاستطاعة
256.....	6-6 الدارات الثنائية للالات الامتصاصية
256.....	6-6-1- مبدأ عمل آلة المضخة الحرارية الامتصاصية ثنائية المراحل والدورة الترموديناميكية
258.....	6-6-2- مخطط الضغط- الحرارة $(\log p \cdot \frac{1}{T})$ لآلة التبريد الامتصاصية ثنائية المراحل
260.....	6-7- تصميم آلة المضخة الحرارية الامتصاصية
260.....	مقدمة علمية
260.....	6-7-1- معادلات التوازن الطاقة لعناصر الآلة الأساسية
261.....	6-7-1-1- المعادلة الطاقة للمكثف
261.....	6-7-1-2- المعادلة لطاقة للمبخر
261.....	6-7-1-3- المعادلة لطاقة للماص
263.....	6-7-1-4- المعادلة لطاقة للمبادل الحراري لمطول مزيج التبريد
264.....	6-7-1-5- المعادلة الطاقة للمولد

265	6-1-7-6- المعادلة لظيقة لمضخة محلول مزيج التبريد
266	7-1-7-6- معادلة لتوازن الطاقة
266	8-1-7-6- للفعالية الحرارية للألة الامتصاصية
266	2-7-6- حساب مساحات تبادل الحراري اللازمة لمبادلات آلة التبريد الامتصاصية اعتماداً على الاستطاعة المطلوب تبادلها عبر المبادل
266	1-2-7-6- حساب معامل الانتقال الحراري الكلي
267	2-2-7-6- حساب معامل نقل الحراري α_1
268	3-2-7-6- حساب معامل نقل الحراري α_2
270	4-2-7-6- حساب مساحة التبادل الحراري للمبادل
271	8-6- الدارة الامتصاصية العاملة على ماء - بروميد الليثيوم
281	9-6- دورة التبريد بالامتصاص باستخدام محلول الأمونيا والماء
291	الفصل السابع: تطبيقات المضخة الحرارية
291	مقدمة
291	1-7- التطبيقات المنزلية للمضخة الحرارية
291	1-1-7- أهمية استخدام المضخة الحرارية المنزلية
294	2-1-7- مصادر منابع الحرارة
294	3-1-7- تخزين الحرارة
294	4-1-7- حساب كمية الحرارة اللازمة للتدفئة
304	5-1-7- التطبيقات المنزلية
308	2-7- التطبيقات التجارية
313	3-7- التطبيقات الصناعية للمضخات الحرارية
313	1-3-7- عمليات فصل المواد والتقطير
321	2-3-7- تزياع الرطوبة
324	3-3-7- تجفيف الأخشاب بواسطة المضخة الحرارية واسترجاع الحرارة
326	4-3-7- التكييف الصناعي
331	4-7- التطبيقات الزراعية

339.....	الفصل الثامن: الدراسة الاقتصادية والحرارية للمضخة الحرارية
339.....	1-8 مقارنة مع بعض أنظمة التدفئة المألوفة
339.....	2-8 توصيف النظام (تبريد - تكيف)
339.....	3-8 الطريقة الحسابية
343.....	4-8 أمثلة تطبيقية
355.....	المراجع المستخدمة
357.....	الملحق A
363.....	الملحق B



مقدمة

دفع انخفاض موارد الطاقة الأولية عجلة البحث العلمي لإيجاد طاقات جديدة ومتجددة والاستفادة من الطاقات الضائعة وطاقه الوسط المحيط. إن المضخة الحرارية هي إحدى التطبيقات العملية لدارة كارنو العكسية لتعمل باعتبارها جهاز تدفئة أو تسخين ذا استهلاك منخفض للطاقة يعمل بدون طرح غازات ملوثة للبيئة ويساهم في حماية البيئة.

مما سبق كان لا بد من تقديم هذا الكتاب وتكريس مقرر المصنخات الحرارية وتطبيقاتها لطلاب السنة الخامسة ميكانيك عام - شعبه الطاقات المتجددة والسنة الرابعة - كهرباء طاقه - شعبه الطاقات المتجددة في كليه الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق.

يتضمن هذا الكتاب فصول ثمانية:

- الفصل الأول:

قدم تعريف للمضخة الحرارية ومنابع الطاقة ومسوغات استخدامها والطاقة المطلوبة للتدفئة وتأمين الماء الساخن الصحي.

- الفصل الثاني:

شرح أنظمة المصنخات الحرارية وداراتها.

- الفصل الثالث:

درس عناصر المضخة الحرارية وتجهيزاتها مثل المبادلات الحرارية والمصنخات والمراوح مع بعض الأمثلة الحسابية المحولة.

- الفصل الرابع:

عرض لوسائط التبريد للدارات الانضغاطية والامتصاصية.

- الفصل الخامس:

دراسة المصنخات الحرارية الانضغاطية مع أمثلة محلولة.

- الفصل السادس:

شرح الدارة الامتصاصية للمضخات الحرارية وعناصرها.

- الفصل السابع:

علاج معظم التطبيقات العملية للمضخات الحرارية مثل المنزلية - التجارية - الصناعية - والزراعية.

- الفصل الثامن:

قدم الدراسة الاقتصادية والحرارية للمضخة الحرارية ومقارنتها مع بعض انظمته التدفئة المألوفة مع أمثلة حسابية.

بالإضافة للمراجع والملحقات التي تناولت الرموز والوحدات الدولية.

تمت معالجة الفصول وفقاً لأسس علمية مبسطة تضمنت الشرح النظري مع إعطاء مثال مبسط كما استخدمت الطرق المبسطة في الحل لتسهيل عملية الفهم. اعتمدت في هذا الكتاب الرموز والوحدات الدولية ومراجع ألمانية وأمريكية.

تم إعداد منهاج هذا الكتاب بالتعاون مع الأساذ الدكتور سلمان عجيب - جامعة الميناء، والبروفسور فيليكس زيكلر من جامعة برلين التقنية، من خلال مشروع تيمبوس الممول من الاتحاد الأوروبي بين عامي 2004-2008.

أرجو أن أكون قد وفقت في وضع لبنة علمية لإغناء المكتبة العربية في مجال المضخات الحرارية وتطبيقاتها ويكون عوناً لطلابنا في دراستهم.

وأخيراً؛ أود أن أشكر كل من ساهم بمجهود في هذا الكتاب، ومن قدم لي النصائح والملاحظات العلمية القيمة. وأخص بالشكر أساتذتي د. مروان شرباتي، ود. محمد سعيد الجراح، لما بذلاه من جهد في تقويم مضمونه وتصحيحه.

والله ولي التوفيق

دمشق 11 نيسان 2010

د.م. وجيه محمد خير ناعمة

الفصل الأول المضخة الحرارية

1.1 تعريف:

مبدأ عمل المضخة الحرارية معروف من أكثر من مائة عام ومع تطور علم الترموديناميك، استخدمت المضخة الحرارية ولأول مرة عام 1938 في مدينة زيوريخ السويسرية، وفي ذلك الحين أجريت عدة تجارب علمية لتطبيقات المضخة الحرارية في جامعه درسن الألمانية، وقد قدم معهد التبريد وتكييف الهواء في مدينه درسن أول مضخة حرارية هواء - هواء باعتباره جهاز تدفئة للمنزل عام 1978 نتيجة انخفاض موارد الطاقة الأولية (فحم - بترول - غاز طبيعي).

أخذ الاهتمام بتطبيق المضخة الحرارية لأغراض التدفئة وتأمين الماء الساخن في المنازل - الصناعية - الزراعية... الخ على أنه يدل كلي أو جزئي لمراجلة التدفئة التقليدية بغية تخفيض استهلاك حرق الوقود التقليدي، وبالتالي خفض نواتج احتراق الوقود المنبعثة والضارة مثل ثنائي أكسيد الكربون - أكسيد النتروجين - ميثان... الخ. حيث إن المضخة الحرارية تسحب خمسا وسبعين بالمائة تقريبا من الطاقة المطلوبة منها (للتدفئة - والتسخين) عبر الوسط المحيط (المنبع الحراري) هواء - ماء كما هو موضح في الشكل (1-1) أي توفير في الطاقة المستهلكة وحماية البيئة.

2.1 تعريف المضخة الحرارية :

المضخة الحرارية تأخذ الحرارة من مصدر حرارة وتنقلها إلى مصرف (مستهلك) ذي درجة حرارة أعلى. ووفقاً لهذا التعريف، فكل معدات التبريد، بما في ذلك أجهزة تكييف الهواء ومبردات الماء العاملة على وسائط التبريد، تعتبر مضخات حرارية. ولكن هندسياً فإن مصطلح المضخة الحرارية، يستخدم عموماً للمعدات التي تسخن

لأغراض مفيدة، تمييزاً عن الأجهزة التي تزيل الحرارة للتبريد فقط. هناك نوع ثانوية المهام من المضخات الحرارية للتدفئة والتبريد.

المضخات الحرارية ذات الاسترجاع الحراري تعطي تدفئة فقط أو تبريداً وتدفئة في آن معاً.

المضخات الحرارية المستعملة تتضمن المضخات الحرارية المجمعة (مكونة من عناصر مجمعة في الموقع أو بطريقة خاصة) والمضخات الحرارية للعمليات الصناعية. معظم المضخات الحرارية الحديثة تستعمل انضغاط البخار (دورة رانكين المعدلة) أو دورة التبريد الامتصاصية.

أي من دورات التبريد الأخرى المعروفة تعتبر مناسبة أيضاً.

بالرغم من أن معظم الضواغط في المضخات الحرارية تشغل بواسطة محركات كهربائية إلا أن هناك أيضاً استعمالاً محدوداً لضواغط تقاد بواسطة محرك احتراق داخلي أو عتفة.

تستعمل تطبيقات المضخة الحرارية عادة في تدفئة المباني وتكييفها، ولكنها تكتسب شعبية أيضاً في تطبيقات التدفئة الفعالة لمياه الاستعمال والخدمة وتدفئة أحواض السباحة وتسخين العمليات الصناعية.

تتراوح الاستطاعات لتطبيقات المضخة الحرارية من 1.75 kW وحتى 44 MW وتستعمل في الكثير من النواحي. حيث يمكن لبعض التجهيزات أن تعطي ماء ساخناً حتى 105 درجة مئوية وبخاراً ضغطه حتى 400 kPa (ضغط مقاييس).

إن الضواغط في الأنظمة الكبيرة تختلف من ضاغط واحد أو أكثر من النوع الترددي أو اللولبي إلى الأنواع النابذية متعددة المراحل.

يستعمل غالباً نظام واحد أو نظام مركزي ولكن في بعض الحالات تستعمل أنظمة مضخات حرارية متعددة لتأمين حاجة المناطق المتعددة.

إن المصادر الحرارية تتضمن التربة ومياه الآبار والمياه السطحية والمياه الرمادية والطاقة الشمسية والهواء وحرارة البناء الداخلية.

يمكن للانضغاط أن يكون أحادي المرحلة أو متعدد المراحل، في بعض الأحيان تعطي التدفئة والتبريد بنفس الوقت لمناطق مختلفة.

إن الأنظمة اللامركزية ذات المضخات الحرارية بدارات الماء هي الشائعة، وتستخدم مضخات حرارية ذات مصادر مائية متعددة موصولة إلى دائرة تدوير ماء مشتركة.

ويمكن أيضاً أن تحوي مزدوجة أرضية، وطارادات الحرارة مثل أبراج التبريد والمبردات الجافة والمسخنات الإضافية المساعدة (مثل المراجل والمبادلات الحرارية البخارية) والمضخات الحرارية ذات الدارة الاسترجاعية وأجهزة الالتقاط الشمسي والخزانات الحرارية.

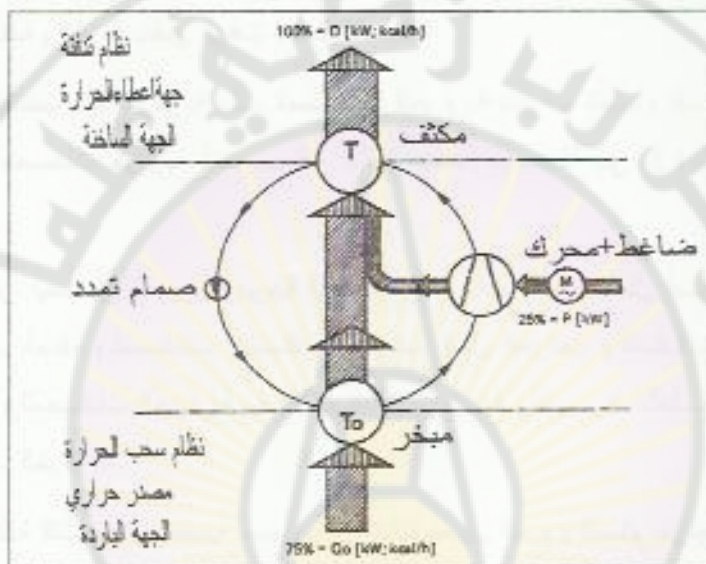
إن كلفة التأسيس منخفضة نسبياً، وإن إعادة تعديل البناء والتحكم بدرجة حرارة كل مكان على حدة سهلة.

إن أنظمة التدفئة والتكييف المركزية يمكن أن تعتمد على كل من أنظمة المضخات الحرارية المركزية والتوزيعية.

3-1- عمل المضخة الحرارية:

في نظام التبريد المسمى المضخة الحرارية يتم امتصاص الحرارة من مستوى ذي درجة حرارة منخفضة بوساطة وسيط تبريد في المبخر وتنتقل (تسخن) بوساطة الضاغط إلى مستوى ذي درجة حرارة أعلى لتعطي من قبل المكثف إلى وسيط ثانوي (هواء - ماء) بغية الاستفادة منها في تسخين الوسيط (هواء - ماء).

مما تقدم نلاحظ انه تم استهلاك طاقة كهربائية في المضخة الحرارية لرفع الطاقة الكامنة للقدرة الحرارية إلى مستوى درجات حرارة قابل للاستفادة منه كما هو مبين في الشكل (1-1).



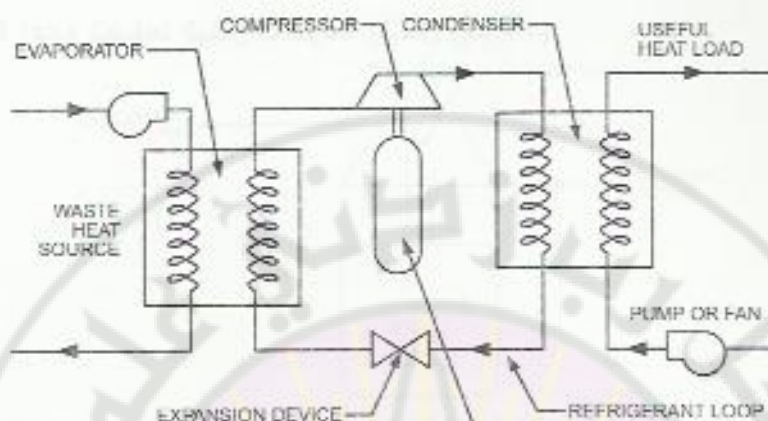
الشكل (1-1) مخطط الطاقة أثناء عمل المضخة الحرارية

دارات المضخات الحرارية:

هناك عدة أنواع متاحة من أنظمة المضخة الحرارية (بنوعها المفتوحة والمغلقة) فبعض الدارات تؤمن كلا من التدفئة والتكييف في أنظمة التكييف والتدفئة. بينما البعض الآخر يؤمن التدفئة فقط في أنظمة التدفئة والتكييف أو في عمليات التسخين الصناعي.

وفيما يلي الأنواع الرئيسية لدارات المضخات الحرارية:

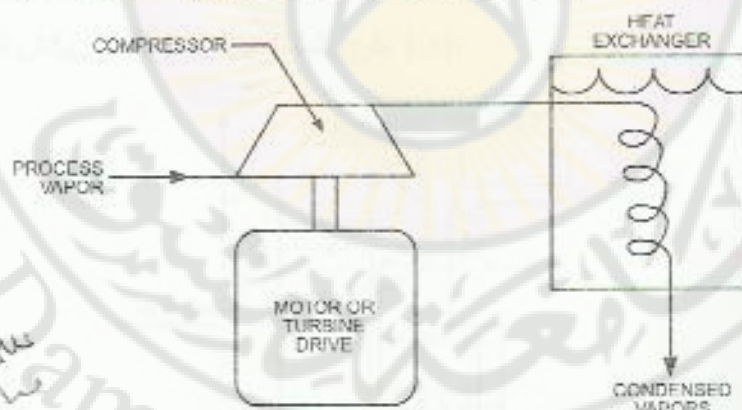
a- دورة انضغاط البخار المغلقة (الشكل رقم 2-1) وهو النوع الأكثر شيوعاً في أنظمة التدفئة والتكييف والعمليات الصناعية.



الشكل (2-1) دورة انضغاط البخار المغلقة

وفيها تستعمل دارة تبريد منفصلة تقليدية يمكن أن تكون وحيدة المرحلة أو مختلطة أو متعددة المراحل أو تعاقبية.

b- دورة إعادة انضغاط البخار الميكانيكية مع مبادل حراري (الشكل رقم 3-1).



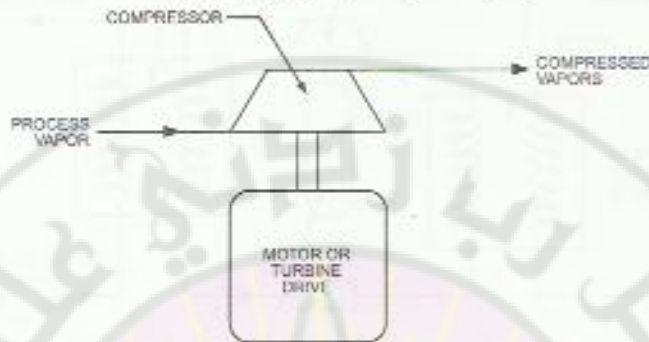
الشكل (3-1) دورة إعادة انضغاط البخار الميكانيكية مع مبادل حراري

حيث يضغط بخار العملية لدرجة حرارة وضغط كافٍ لإعادة الاستعمال مباشرة في عملية ما.

حيث يكون استهلاك الحرارة أصغرياً لأن درجات الحرارة مثالية من أجل العملية.

هناك تطبيقات معروفة تتضمن المبخرات (المركبات) وأعمدة التقطير.

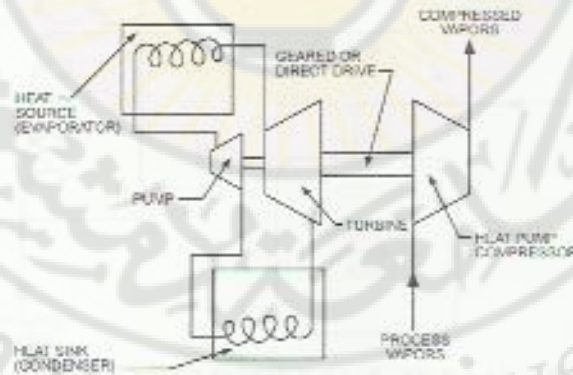
c- دورة إعادة انضغاط البخار المفتوحة (الشكل رقم 4-1)



الشكل (4-1) دورة إعادة انضغاط البخار المفتوحة

هناك تطبيق صناعي معروف في معمل مزود بسلسلة من مستويات ضغط البخار وهناك فائض من البخار بضغط أقل من المطلوب. حيث تنقل الحرارة إلى مستوى الضغط الأعلى عن طريق ضغط البخار ذي الضغط الأقل.

d- دائرة رانكين المقادة حرارياً (الشكل رقم 5-1).



الشكل (5-1) دائرة رانكين المقادة حرارياً

هذه الدارة مفيدة عندما يكون هناك كميات كبيرة من الحرارة الضائعة وكلف الطاقة مرتفعة.

إن قسم المضخة الحرارية من الدارة يمكن أن يكون مفتوحاً أو مغلقاً ولكن دائرة رانكين عادة ما تكون مغلقة.

4-1- منابع الطاقة للمضخة الحرارية:

إن اقتصادية بناء المضخة الحرارية وتشغيلها يتعلق بمنابع الطاقة الحرارية ودرجة حرارتها، يجب أن تتمتع هذه المنابع بالخواص التالية:

1- ينبغي أن تكون كمية الحرارة الضرورية واللازمة دوماً وفي كل وقت كافية لتزويد المضخة الحرارية.

2- يجب أن تكون درجة حرارة المنبع مرتفعة ما أمكن من أجل الحصول على فرق كبير لدرجات الحرارة بين المنبع والمستفيد وبالتالي التوصل لدرجات حرارة مرتفعة ($50-60^{\circ}\text{C}$).

3- تكاليف استثمار المنبع منخفضة.

4- يجب أن يكون استهلاك الطاقة لنقل الحرارة من خلال المضخات والمراوح منخفضاً.

منابع الطاقة المستخدمة في التطبيقات العملية وفقاً للمخطط التالي:



منابع ومصارف الحرارة وخصائصها:

الجدول رقم (1-1) يظهر الوسيط الأساسي المستعمل باعتباره مصدراً أو مصرفاً حرارياً، ويعرض عوامل متعددة يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار في كل وسط. إن اختيار مصدر ومصرف حراري لتطبيق ما يتأثر بشكل رئيس بالموقع الجغرافي والمناخ وكلفة التأسيس والتوافر وطبيعة التركيب.

الهواء:

الهواء الخارجي هو مصدر حراري ومصرف حراري عام يستعمل بشكل واسع في التطبيقات السكنية والتجارية البسيطة.

يتم نقل الحرارة بالحمل القسري بوساطة وشائع نقل حراري ذات سطح واسع بين الهواء ووسيط التبريد. بشكل عام فإن السطح الخارجي للوشية الخارجية هو أكبر من 50 إلى 100% من سطح الوشية الداخلية. وحجم الهواء الخارجي المعالج هو أكبر من حجم الهواء الداخلي المعالج بنفس النسبة. خلال التسخين فإن درجة حرارة وسيط التبريد المتبخر هي أقل بـ 6 إلى 11 درجة كلفن من درجة حرارة الهواء الخارجي.

إن أداء وشيعة التكثف والتبريد الهوائية مشروح بشكل أكثر تفصيلاً في الفصل الثالث.

عند اختيار مضخة حرارية ذات مصدر حراري هوائي أو تصميمها يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار عاملان بشكل خاص:

1- درجة حرارة الهواء الخارجي المحلية.

2- تشكل الجليد.

[illegible]

عندما تنخفض درجة الحرارة الخارجية تنخفض الاستطاعة الحرارية للمضخة الحرارية ذات المصدر الهوائي.

وهذا يجعل اختيار التجهيزات من أجل درجة حرارة خارجية تصميمية هو امر حرج من أجل مضخة حرارية ذات مصدر هوائي مقارنة بنظام حرق الوقود.

يجب أن تحسب التجهيزات من أجل نقطة توازن متدنية بشكل عملي من أجل التكلفة بدون أن يكون هناك استطاعة تبريدية زائدة غير ضرورية في الصيف.

هناك عملية اختيار من أجل إيجاد نقطة التوازن هذه والتي تعرف على أنها درجة الحرارة الخارجية التي تحقق فيه استطاعة المضخة الحرارية متطلبات التفتة.

عندما تكون درجة حرارة السطح الخارجي لوشية هوائية خارجية هي الصفر أو أقل مع درجة حرارة هواء خارجي جافة مرافقة من 2 إلى 5.5 كلفن أعلى منها يمكن أن يتشكل الجليد على سطح الوشية.

وإذا سمح لهذا الجليد أن يتجمع فإن التجمد يمنع الانتقال الحراري ولذلك فإن الوشية الخارجية يجب أن يزال عنها الجليد بين الفينة والأخرى ويتأثر عدد مرات اذابة التجميد بالمناخ وتصميم الوشية وعدد ساعات التشغيل.

تظهر الخبرة أنه عموماً هناك حاجة لازالة تجميد بسيطة عندما تكون الحرارة الخارجية تحت -10 درجة مئوية ورطوبة نسبية 60 %.

ويمكن أن يتأكد من هذا بتحليل سايكومتري باستخدام المبادئ الواردة في مخطط الهواء السايكومتري.

وعلى أية حال وتحت شروط رطوبة جداً عندما توجد قطرات صغيرة معلقة في الهواء فإن عدد مرات إزالة التجميد سوف تكون أعلى 3 مرات من تلك المدروسة أو متباً بها من المخطط السايكومتري وربما تحتاج المضخة الحرارية إلى إزالة تجميد بعد عشرين دقيقة من التشغيل.

إن ضياع الحرارة المتاحة الناتج عن تشكل الجليد يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار عند اختيار المضخة الحرارية. كانت التصميم الأولي للمضخات الحرارية ذات تباعد ريش للوشائع كبيرة نسبياً بحدود 5 أو 6 مم اعتماداً أن هذا سوف يخفف من مرات إزالة الجليد. على أية حال بينت الخبرة أن إزالة الجليد الفعالة بالغاز الساخن تسمح باستخدام أبعاد صفائح أقل، وتقلل من حجم النظام وقابلية انسدادها. في الوقت الحالي يستعمل تباعد ريش للوشائع بحدود 1.3 وحتى 2.5 مم. في الكثير من الأبنية التعليمية والتجارية يجب أن يطرد قسم من الهواء على مدار العام، ويمكن لهذا الهواء أن يستعمل على أنه مصدر حراري على الرغم من الحاجة إلى مصدر حراري مكمل.

تسبب الرطوبة العالية المتولدة من برك السباحة الداخلية تكاثفاً على السقف والجدران والفواصل والأرضيات وتسبب عدم ارتياح للمستخدمين.

يستخدم الهواء الخارجي ووشائع إزالة الرطوبة عادة مع وشائع إعادة تسخين من المرجل المستعمل لتسخين البركة. وهذا أمر مثالي بالنسبة لأنظمة المضخة الحرارية هواء - هواء وهواء - ماء لأنها تخفض استهلاك الطاقة. يجب أن تستعمل مواد مناسبة بحيث تمنع اهتراء مكونات أنظمة المضخة الحرارية بسبب الرطوبة العالية والكلور.

المياه:

يمكن للماء أن يكون مصدراً حرارياً مرضياً نظراً للاعتبارات المذكورة في الجدول رقم (1-1)، نادراً ما تستخدم مياه المدينة نظراً للتكلفة ولقوانين البلديات. بينما تكون المياه الجوفية - الأبار - خصوصاً أكثر إغراء نظراً لحرارتها شبه الثابتة والعالية نسبياً. تعتمد حرارة المياه على عمق مصدر المياه والجو الخارجي حيث يتراوح مدى الحرارة من 5 درجات مئوية إلى 20 درجة مئوية. غالباً ما تكون هناك كمية كافية من المياه في الأبار (يمكن للماء أن يعاد حقنه في الصخور المصمتة ليتر آخر). إن هذا

الاستخدام غير مسبب لاستهلاك المياه ويتصميم مناسب، فإن درجة حرارة الماء فقط هي التي تتغير. يجب أن تحلل نوعية المياه ويجب أن يؤخذ بعين الاعتبار إمكانية تشكل الرواسب والاهتراء. وفي بعض الحالات يمكن أن يكون من الضروري أن تفصل مياه البئر عن التجهيزات باستخدام مبادل حراري إضافي.

يجب أن تعطى اعتبارات خاصة أيضاً للفترة وبرك التبريد لبعض السوائل. وهناك أيضاً اعتبارات كلفة الحفر والأنابيب والمضخات والتخلص من المياه المستعملة.

هناك معلومات إضافية عن توفر مياه الآبار ودرجة حرارتها والتحليل الفيزيائي والكيميائي لها من مكاتب الإحصاءات في الكثير من المدن الرئيسية. يمكن أن تغمر المبادلات الحرارية في البرك المفتوحة والبحيرات أو الجداول. عندما تستخدم المياه السطحية أو مياه الجداول على أنها مصادر حرارية يجب أن يؤخذ الهبوط الحراري في المبخر في الشتاء بعين الاعتبار ويتم تحديده لمنع التجمد.

في التطبيقات الصناعية، يمكن للمياه العادمة المستعملة (المصايف، مياه الصرف للمعامل ومياه المكثف الدافئة) أن تستخدم على أنها مصدر حراري في تشغيل المضخة الحرارية. إن مياه المجاري تملك عادة درجة حرارة أعلى من المياه السطحية أو الجوفية يمكن أن تكون مصدراً حرارياً مقبولاً. تفضل عادة مياه المجاري المعالجة بشكل أولي ولكن يمكن أن تستعمل مياه المجاري غير المعالجة بشكل ناجح في مبادلات حرارية مصممة بشكل مناسب. إن استخدام المياه في التبريد يتبع الأصول المعتادة في المكثفات المائية. المبادلات الحرارية من نوع وسيط تبريد - ماء هي عادة ذات تمدد مباشر أو مبردات مغمورة وتكون عادة من نوع غلاف - وشيعة أو نوع غلاف - أنابيب Shell and Tube. ومن الممكن أن تستخدم أيضاً مبادلات حرارية صفائحية ملحومة. في تطبيقات المضخات الحرارية الضخمة يستعمل الماء عادة بدلاً من وسيط التبريد.

التربة:

تستخدم حرارة التربة (الأرض) بشكل واسع على أنها مصدر حراري ومصرف حرارة من خلال انتقال الحرارة عبر الوشائع المدفونة. إن تنوع تركيب التربة الذي يختلف بشكل واسع من الطين الرطب إلى التربة الرملية له تأثير كبير على الخواص الحرارية والأداء الكلي.

تعتمد عملية الانتقال الحراري عبر التربة على التدفق الحراري العابر. إن الانتشار الحراري هو عامل مسيطر ومن الصعب تحديده بدون معلومات عن التربة المحلية. الانتشار الحراري هو النسبة بين الناقلية الحرارية على ناتج ضرب الكثافة بالحرارة النوعية. يؤثر محتوى رطوبة التربة على ناقلية الحرارة.

توجد ثلاثة أنواع رئيسة من المضخات الحرارية الأرضية:

الأول المياه الجوفية الذي نوقش في الفقرة السابقة.

الثاني التمدد المباشر حيث يكون المبادل الحراري بين الأرض ووسيط التبريد مدفوناً تحت الأرض، الثالث المزدوجة الأرضية (تسمى أيضاً الدارة المغلقة للمصدر الأرضي) وفيها تصل دارة ثانوية من محلول ملحي بين مبادل حراري أرض - ماء ومبادل ماء - وسيط تبريد انظر الشكل (2-11).

يمكن أن توضع الدارات الأرضية إما أفقية أو شاقولية. يتألف النظام الأفقي من أنابيب مفردة أو متعددة متموجة وملتفة مدفونة بعيدة بمقدار 1 إلى 2 متر في مستوى أفقي على عمق 1 إلى 2 متر تحت سطح الأرض.

يمكن أن تدفن الأنابيب بشكل أعمق ولكن يجب أن تؤخذ كلفة الحفر ودرجة الحرارة بعين الاعتبار. يمكن أن تستخدم دارات وشيعة أيضاً في الدارات الأفقية وتسمى الوشائع الانسيابية. تستعمل الدارات الشاقولية مبادلات حرارية ذات أنابيب متمركزة بشكل دوائر أو بشكل حرف U. إن تصميم المبادلات الحرارية المستعملة في المزدوجة الأرضية موضح مرجع ASHRI 2007 تطبيقات التكييف.

الطاقة الشمسية:

يمكن أن تستعمل الطاقة الشمسية باعتبارها مصدراً حرارياً أساسياً أو مجتمعاً مع مصادر أخرى، إن الهواء والمياه السطحية والمياه الجوفية الضحلة وأنظمة المصدر الأرضي للضحلة (التربة) جميعها تستخدم الطاقة الشمسية بشكل غير مباشر.

إن الميزة الرئيسة من الاستعمال المباشر للطاقة الشمسية أنها في حال توفرها فإنها تعطي حرارة عند درجة حرارة أعلى من المصادر غير المباشرة. مما يزيد من معامل الأداء الحراري.

وبالمقارنة مع التسخين الشمسي بدون مضخة حرارية تزداد استطاعة المجمع الشمسي ومردوده نظراً للحاجة إلى درجة حرارة أقل.

ركزت الأبحاث والتطوير للمضخات الحرارية ذات المنشأ الشمسي على نوعين أساسيين من الأنظمة: المباشر وغير المباشر. في النظام المباشر توضع أنابيب مبخر وسيط التبريد داخل المستقبل الشمسي ويكون عادة من النوع ذي الصفيحة المستوية. أظهرت الأبحاث أن المستقبل غير المزود بصفائح زجاجية كغطاء يستطيع أيضاً استقطاب الحرارة من الجو الخارجي. يمكن لنفس السطح عندئذ أن يعمل مكتفياً يستخدم الهواء الخارجي على أنه مصدر حراري للتبريد.

يقوم النظام غير المباشر بتدوير الماء أو الهواء عبر المستقبل الشمسي. عندما نستعمل الهواء يتم التحكم بالمستقبل بحيث:

- يمكن أن يعمل المستقبل على أنه مصخن هواء أولي.
- يمكن أن تغلق دورة الهواء الخارجي بحيث يتم اكتساب كل الحرارة من الشمس.
- يمكن للمستقبل أن يفصل عن الجو الخارجي ليعمل مصدراً أو مصرفاً.

أمثلة عن استخدام منابع الطاقة الثانوية:

يمكن استخدام حرارة إسطبل الأبقار (في مزرعة كبيرة للأبقار) لتدفئة منزل حيث إن البقرة الواحدة تعطي كمية حرارة حوالي: 84000 kJ/day وبخار ماء: $(8-9) \text{ kg}$.

نحتاج لـ 30% من كمية الحرارة هذه للحفاظ على درجة حرارة في الإسطبل: 15°C ، بالتالي 70% الباقية تستخدم منبعاً حرارياً لتدفئة المنزل، وتعمل المضخة الحرارية بدرجة تغير تصل إلى: $9^\circ \text{C} +$ فتعطي معاملاً عالياً للتدفئة.

يتم الاستفادة من حرارة هذه المنابع بواسطة المبادلات الحرارية وفيما يلي نورد مقارنة ما بين المبادل الحراري الدوار والمبادل الحراري الإرجاعي، ونظام المضخة الحرارية ونظام التدوير (الأنبوب الحراري) الموضحة في الشكل (6-1). نلاحظ من الشكل بأن مردود المبادل الحراري الدوار تتراوح ما بين 70-80% أما المبادل الإرجاعي لا تتجاوز 30% والأنبوب الحراري حوالي 45% أما المضخة الحرارية فتتراوح ما بين 25-75%.

بالمقارنة نجد أن درجة انتقال الحرارة ϕ

$$\phi = \frac{t_{mi} - t_{Ah}}{t_{Ah} - t_{mi}}$$

t_{mi} : درجة حرارة هواء التدفئة.

t_{Ah} : درجة حرارة هواء المطرود.

t_{Au} : درجة حرارة الهواء الخارجي.

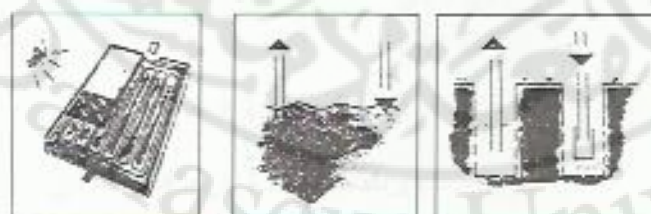
نلاحظ من خلال المقارنة بأن أفضل نظام هو نظام المضخة الحرارية ذات المنبع الحراري الهواء كما هو موضح بالشكل (6-1).



الشكل (6-1) أنظمة الاستفادة من الإرجاع الحراري للهواء المحيط

وفيما يلي نورد مستوى درجات الحرارة لمصادر الطاقة المستخدمة في تطبيقات المضخات الحرارية وفرق درجات الحرارة وكمية التدفق الحراري النوعي وفقاً لسطح التبادل الحراري أو حجم الماء المتدفق خلال واحدة الزمن.

الشكل (7-1) مصادر الطاقة الطبيعية ومستوى درجات الحرارة وفق درجات الحرارة وكمية التدفق الحراري النوعي.



الإشعاع الشمسي

مياه سطحية

مياه جوفية

20-80 °C

5-15 °C

8-12 °C

1. درجة الحرارة (°C)

4-5 K

4-5 K

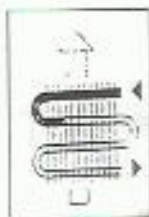
2. فرق درجات الحرارة ΔT

30-480 w/m²

4500-5900 w/m³h⁻¹

4500-5900 w/m³h⁻¹

3. تدفق كمية الحرارة q



الهواء

القبضة الأرضية

4-15 °C

8-12 °C

1. درجة الحرارة

4-6 K

2. فرق درجات الحرارة Δt

1.4-2.2 w/m²h⁻¹

6-30 w/m²

3. تدفق كمية الحرارة النوعي q

الشكل (7-1) منابع الطاقة الطبيعية ومستوى درجات الحرارة

وفرق درجات الحرارة وكمية التدفق الحراري النوعي

5-1- الطاقة المطلوبة للتدفئة وتأمين الماء الساخن الصحي:

إذا قارنا استهلاك الطاقة الكهربائية في المضخة الحرارية باستهلاك الطاقة الكهربائية للتدفئة المركزية أو التدفئة بشكل مباشر نلاحظ أن الوفرة الذي نحصل عليه عند استخدام المضخة الحرارية يتراوح (65-70)%.

من ناحية المقارنة الاقتصادية بين المضخة الحرارية وطرق التدفئة التقليدية (محطات تدفئة، حرق الوقود السائل...) ينبغي الأخذ بعين الاعتبار المردودات التالية:

- 1 - مردود محطة توليد الطاقة الكهربائية: % (30-40).
- 2 - المردود الوسطي لمراحل التدفئة المعروفة: % (70-75).
- 3 - الوفرة عند استخدام المضخة الحرارية يصل لحوالي: 65%.

نلاحظ مما سبق المصوغ الاقتصادي لاستخدام المضخة الحرارية لما تحققه من وفرة كبير على مستوى الاقتصاد الوطني. ويتضح هذا في الشكل (8-1).

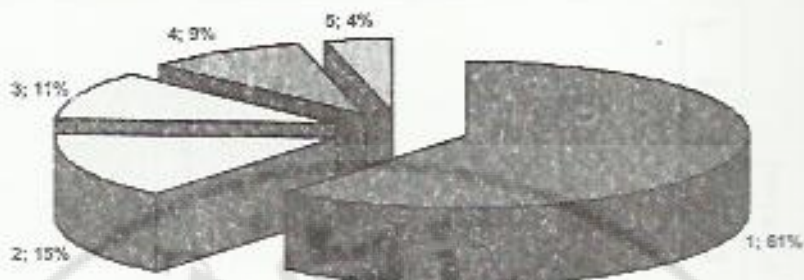


الشكل (8-1) مقارنة أنظمة التدفئة مع المضخة الحرارية

6-1- مسؤليات استخدام المضخة الحرارية:

1- عالمنا البيئي في خطر:

عبر ملايين السنين طرحت الغابات ونباتات كواكبنا الأكسجين هذا الأكسجين الذي نستنشق اليوم ساعد بدوره على إنتاج الفحم والبتروول والغاز الطبيعي. والآن نحرق هذه المواد القابلة للاحتراق (فحم - بتروول - غاز طبيعي) نجد نتيجة هذا الاحتراق ينتج عدة غازات منها: ثاني أكسيد الكربون - الميثان - هيدروكربونات تلوح في الوسط المحيط مما يؤدي إلى تلوث ورفع معامل ظاهرة الاحتباس الحراري للكرة الأرضية وبالتالي تخريب المناخ وتقلبه، الشكل (9-1) يبين نسب انبعاث الغازات.



1. ثاني أكسيد الكربون
2. ميثان
3. هيدروكربونات
4. بخار الماء، غاز الأوزون
5. أكسيد النيتروجين

الشكل (9-1) نسب انبعاث الغازات

وفقاً لأبحاث معهد الجيوفيزياء بجامعة فراتكفورت - ألمانيا

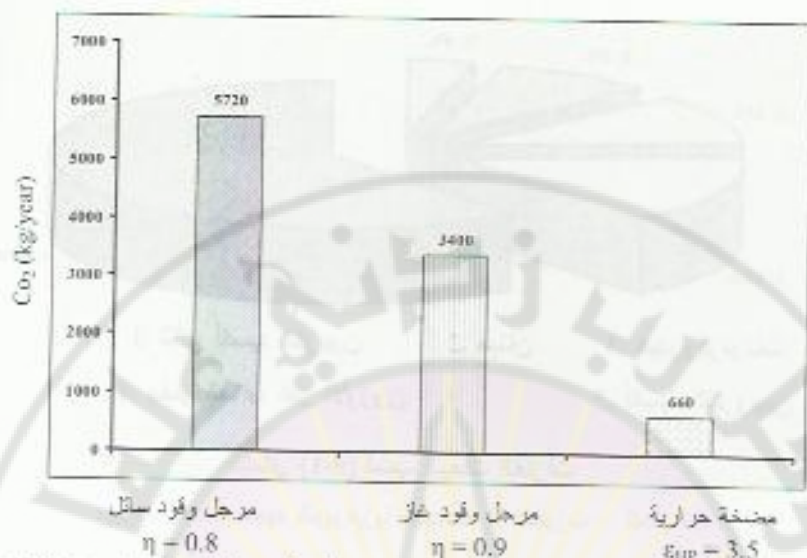
نتيجة الدراسات والأبحاث لحرق الوقود والغازات لأغراض التدفئة (تكلفة شفة سكنية) تبين أنه من جراء حرق البترول ينتج حوالي 6000 كغ من ثاني أكسيد الكربون شهوياً ومن حرق الغاز الطبيعي ينتج حوالي 400 كغ حيث إن استعمال الوقود للتدفئة يشكل حوالي 40% من طرح CO_2 وتأثيره على ظاهرة الاحتباس الحراري.

2- المضخة الحرارية تعمل بدون طرح غازات ملوثة أو بنسبة منخفضة نسبياً بالمقارنة مع حرق الوقود التقليدية والشكل (10-1) بين لنا نسب الانبعاث السنوية لغاز CO_2 .

كما أنه لإنتاج واحد كيلو واط ساعي يلزم 0.1 ليتر من الوقود السائل. أما استخدام المضخة الحرارية للتدفئة فقد يلزمنا طاقة أقل بالمقارنة مع الوقود السائل - والغاز والسبب في ذلك أن المضخة الحرارية تسحب 75% من الطاقة المطلوبة منها تقريباً من الوسط المحيط. والشكل (11-1) يوضح كمية الطاقة النهائية المطلوبة لتدفئة أنظمة مختلفة.

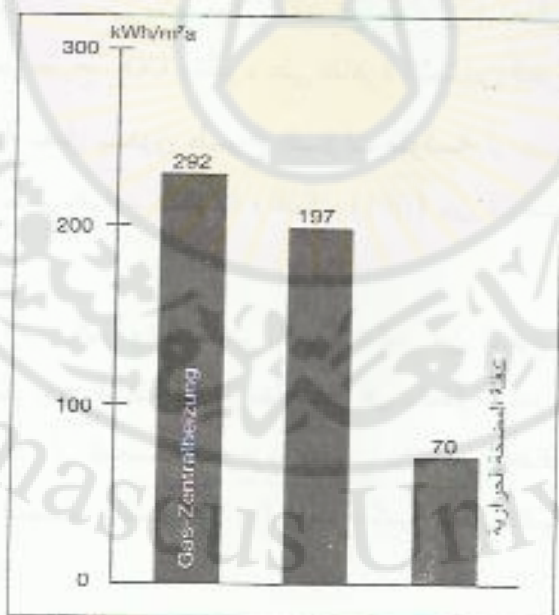
الشكل (12-1) يبين المقارنة ما بين استخدام المضخة الحرارية ونظام يستخدم

وقود غاز وسائل.

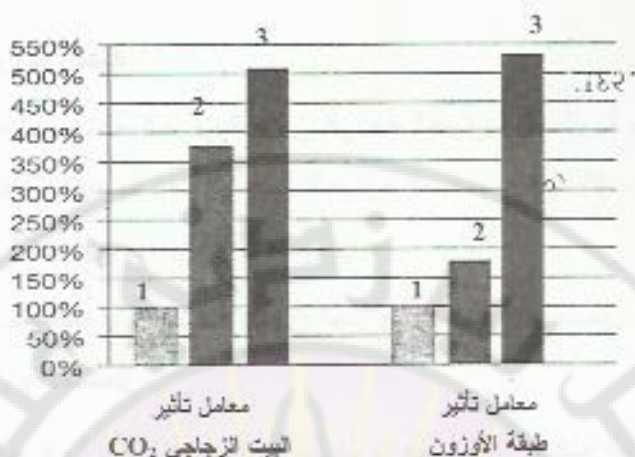


الشكل (10-1) تبعث غاز ثاني أكسيد الكربون من أنظمة التدفئة بوقود السائل (الغاز) ومقارنتها مع استخدام المضخة الحرارية

هذا الشكل نتائج أجريت على محطات في جامعة كراتس التقنية Graz عام 1990.

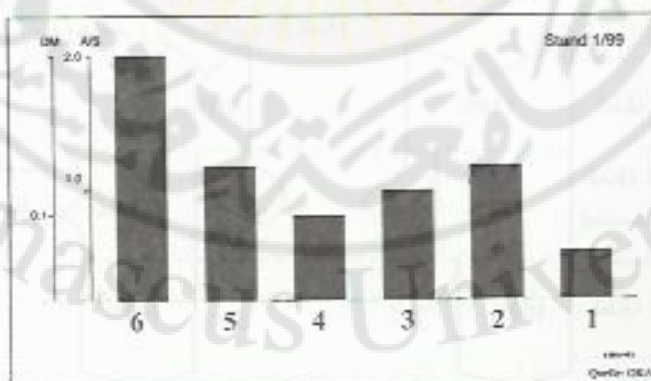


الشكل (11-1) كمية الطاقة المستهلكة في نظام المضخة الحرارية ومقارنتها مع نظام يستخدم الغاز وفقاً لنتائج جامعة ميونخ بألمانيا



1- مضخة حرارية 2- نظام تدفئة يحرق غازاً 3- نظام يحرق وقوداً سائلاً
الشكل (12-1) مقارنة ما بين نظام تدفئة يحرق وقوداً سائلاً - غازاً والمضخة الحرارية

3- تكاليف منخفضة لاستثمار المضخة الحرارية وتشغيلها، إن 75% من الطاقة اللازمة للتدفئة تقريباً تتولد من الوسط المحيط من خلال استخدام نظام التدفئة بالمضخة الحرارية، وطاقة الوسط المحيط كما أشرنا سابقاً هي (الشمس - الهواء - المحيط - الماء - طاقة باطن الأرض) حيث إن المضخة الحرارية تستخدم وسيط نقل حرارة مجانياً من الوسط المحيط من خلال مبادلات حرارية كما هو وارد فيما سبق والشكل 11-1 يعطي كلفة واحد كيلو واط ساعي وأنظمة تدفئة مختلفة.



1- مضخة حرارية $\eta=4$ ، 2- وقود سائل $\eta=0.9$ ، 3- وقود غاز $\eta=0.9$ ، 4- نظام وقود سائل $\eta=0.8$ ،

5- استرجار الطاقة ليلاً، 6- استرجار الطاقة نهاراً - DM ملرك ألمتي = 0.5 £

الشكل (13-1) تكاليف 1 كيلواط ساعي لأنظمة تدفئة مختلفة وفقاً للتأليج عام 1999

4- المضخة الحرارية رفاهية:

إن التدفئة بالمضخة الحرارية تؤمن الراحة الحرارية المطلوبة ورفاهية عالية من خلال التدفئة الأرضية ذات درجات الحرارة المنخفضة ($40 - 45^{\circ}\text{C}$) أو التدفئة الجدارية وبدون ضجيج وصيانة أقل ما يمكن.

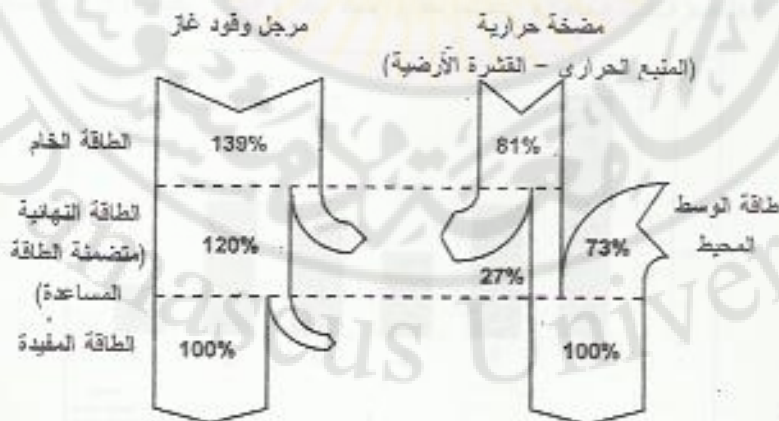
5- تقدم المضخة الحرارية للتدفئة (بدون احتراق وقود أو أي إشعال هذا يعني أماناً في التشغيل والاستثمار.

6- المضخة الحرارية نظام تدفئة مثالي بالمقارنة مع أنظمة التدفئة التقليدية.

7- المضخة الحرارية ذات استعمالات متعددة حيث يمكن أن نستخدمها في فصل الصيف للتبريد أيضاً (التكييف صيفاً).

7-1- اعتبار سيالة الطاقة:

من مناقشة استهلاك الوقود الأحفوري، وانبعاث الغازات الملوثة للبيئة نلاحظ أن المضخات الحرارية تحظى باهتمام واسع لتأمين الطاقة المطلوبة والشكل 12-1 يوضح هذه المقارنة.



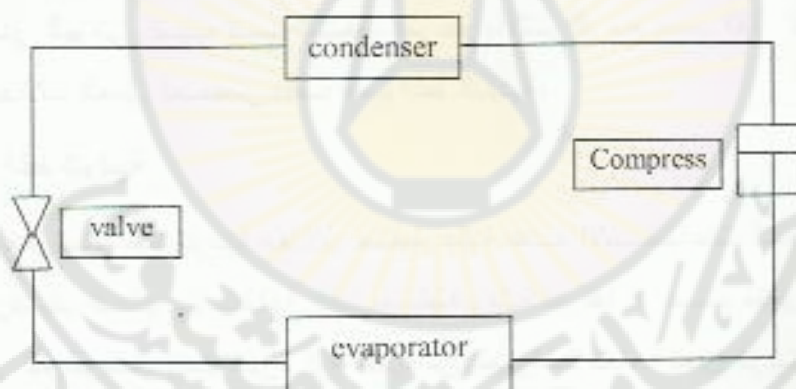
الشكل (14-1) مخطط سيالة الطاقة لنظام يستخدم

الوقود الأحفوري ونظام المضخة الحرارية

الفصل الثاني أنظمة المضخات الحرارية

1-2- دائرة المضخة الحرارية:

إن العناصر والإجراءات المرتبطة بالمضخات الحرارية تطورت من العمل بدارات التبريد ذات درجات الحرارة المنخفضة. هذا القسم يلخص العناصر الأساسية ويناقش الخصائص أو الاعتبارات الخاصة التي يمكن أن تطبق في المضخات الحرارية في تطبيقات التدفئة وتكييف الهواء المشتركة أو في المجالات الصناعية ذات درجات الحرارة الأعلى، كما هو موضح في الشكل (1-2).



الشكل (1-2) الأجزاء الرئيسية لدائرة التبريد الانضغاطية

1- الضواغط:

إن الأنواع الرئيسية للضواغط المستخدمة في أنظمة المضخة الحرارية موصوفة باختصار في هذا المقطع من أجل الحصول على تفاصيل أكثر عن هذه الضواغط وأنواعها يرجى الرجوع إلى الفصل الثالث.

الضواغط النابذية:

معظم التطبيقات النابذية في المضخات الحرارية حصرت في أنظمة المضخات الحرارية الضخمة ذات نظام ماء - ماء أو وسيط تيريد - ماء أنظمة نقل الحرارة وأنظمة التخزين وأنظمة التعاقب الهيدروليكية.

في هذه التطبيقات تسمح الضواغط النابذية باستخدام المضخة الحرارية في التطبيقات الصناعية الكبيرة وفي حالة الأبنية متعددة الطوابق. تحتوي معظم التركيبات مكثفات ضخمة مجمعة. تسمح دورات النقل بنسب ضغوط منخفضة والعديد من الوحدات الإقرانية أو ثنائية المراحل بعدة أنواع من وسائط التبريد قابلة للتشغيل بمعاملات أداء عالية.

إن مواصفات الضواغط النابذية لا تلبي عادة حاجات المضخات الحرارية ذات المصدر الهوائي. تسبب نسب الضغط المرتفع بالاشتراك مع حجم الغاز المنخفض عند حالات الحمل المنخفض بتلف الضواغط النابذية.

الضواغط اللولبية:

تقدم الضواغط اللولبية معدلات ضغط عالية عند الاستطاعات الصغيرة والكبيرة. يتم التحكم بالاستطاعة عادة بوساطة ريشة منزلقة أو صمام متغير، نحتاج بشكل عام لفواصل زيت كبيرة لأن الكثير من الضواغط بحاجة لحقن الزيت.

إن الضواغط اللولبية أقل عرضة للتلف بسبب رجوع السائل ولديها عدد أقل من الأجزاء المتحركة مقارنة بالضواغط النابذية وأيضاً فهي تبسط عملية التحكم بالاستطاعة.

الضواغط ذات الشفرة الدوارة:

يمكن لهذه الضواغط أن تستعمل في الأنظمة متعددة المراحل أو ذات المرحلة المنخفضة حيث تملك استطاعة عالية ولكنها عادة محدودة بنسب انضغاط منخفضة ولديها أيضاً طرق محدودة لتخفيض الاستطاعة.

الضواغط الترددية:

وهي الأكثر شيوعاً في الأنظمة من 1.8 إلى 350 كيلو وات

الضواغط الحلزونية:

وهي نوع من الضواغط ذات الإزاحة الموجبة والحركة الدورانية وقد شاع استخدامها في أنظمة المضخة الحرارية. يمكن أن نتحكم بالاستطاعة بتغيير سرعة الدوران أو إزاحة الضاغط وتملك ضجيج واهتزاز منخفض.

2- المبادلات الحرارية:

إن المبادلات الحرارية من نوع وسيط تبريد - هواء ونوع وسيط تبريد - ماء مشابهة للمبادلات الحرارية المستعملة في أنظمة التكييف والتبريد. راجع الفصل الثالث.

3- عناصر التبريد:

أتابيب وسيط التبريد:

خزان السائل وأجهزة التمدد، وملحقات دارة التبريد هي عادة الموجودة في الأنواع الأخرى نفسها من أنظمة التكييف والتبريد.

صمام عكس الدارة:

يقوم بتغيير النظام من التبريد إلى التدفئة، هذا التغيير يتطلب استخدام صمام أو أكثر في دارة التبريد، إلا إذا كان التغيير يحدث خارج دارة وسيط التبريد، تكون صمامات عكس الدارة من نوع مقاد بوساطة صمامات كهرومغناطيسية.

جهاز التمدد الذي يستعمل للتحكم يتدفق وسيط التبريد هو عادة صمام تمدد حراري والمشروح عنه في المفقرة 4 من إصدار 2006 من ASHRI.

إن بصلة صمام التمدد يجب أن يختار توضعها بحذر.

إذا رتبت الدارة بحيث يكون خط وسيط التبريد الذي وضعت عليه بصلة صمام التمدد يمكن أن يصبح خط الدفع عند عكس الدارة، فإن الضغط الناتج في عنصر الصمام يمكن أن يكون زائداً بحيث يتطلب ضبطاً خاصاً أو عنصراً لتحديد الضغط. عندما يوضع صمام تمدد حراري على وشيعة خارجية فإن شحنة معترضة خاصة لتخفيض التحميص عند درجات الحرارة المنخفضة مما يسمح باستخدام أفضل للوشيعة. وبوساطة عنصر حساس فإن صمام التمدد الحراري ذا الشحنة المعترضة يستخدم سائلاً أو خليطاً من السوائل المختلفة عن وسيط التبريد، يقوم صمام التمدد الإلكتروني بتحسين شروط التحكم بوسيط التبريد.

الأنبوب الشعري:

(المستعمل كجهاز تنظيم لمضخة حرارية تعمل ضمن مجال واسع من تغيرات درجة حرارة التبخر) يمكن أن يقوم بتمرير وسيط التبريد بكمية زائدة إلى مناطق ذات ضغوط أقل، مما يسبب فيضاً عكسياً نحو الضاغط. إن فاصل سائل خط السحب أو أجهزة التحكم بالشحنة يمكن أن تضاف للتخفيف من هذا الأثر.

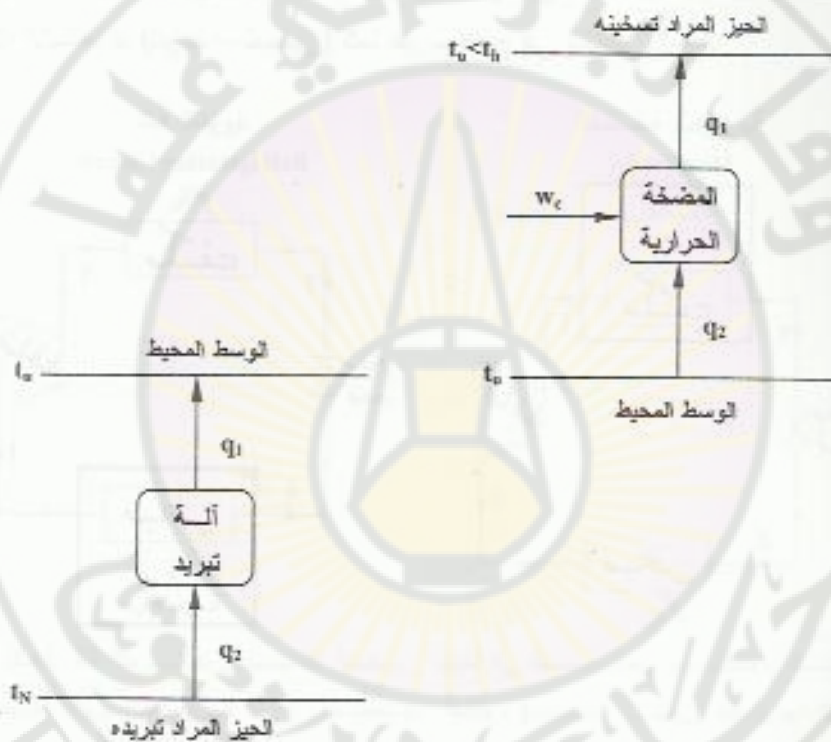
إن فواصل السائل على خط السحب يمكن أيضاً أن تمنع سائل وسيط التبريد الذي هاجر إلى المبخر من دخول الضاغط عند الإقلاع.

عندما يستعمل جهاز تنظيم تدفق مختلفان لمبادلين حراريين فإن وجود صمام عزم رجوع يسمح لوسيط التبريد لتجاوز جهاز تنظيم التدفق للمبادل الحراري المستعمل مكنفاً.

مستقبل وسيط التبريد ويستعمل عادة لتخزين وسيط التبريد السائل، وهو مفيد خصوصاً في المضخات الحرارية لعدم تساوي متطلبات وسيط التبريد من أجل التدفئة والتبريد. ويحذف عادة من المضخات الحرارية المستعملة للتدفئة فقط.

2-1-1- مبدأ عمل المضخة الحرارية:

تعمل آلة المضخة الحرارية بشكل عام في مستوى درجات حرارة أعلى مما عليه في آلة التبريد كما هو بالشكل (2-2) الذي يقارن مبدأ عمل آلة التبريد وعمل المضخة الحرارية ومستوى درجات الحرارة في كل منهما.



الشكل (2-2) مبدأ عمل آلة التبريد والمضخة الحرارية

حيث:

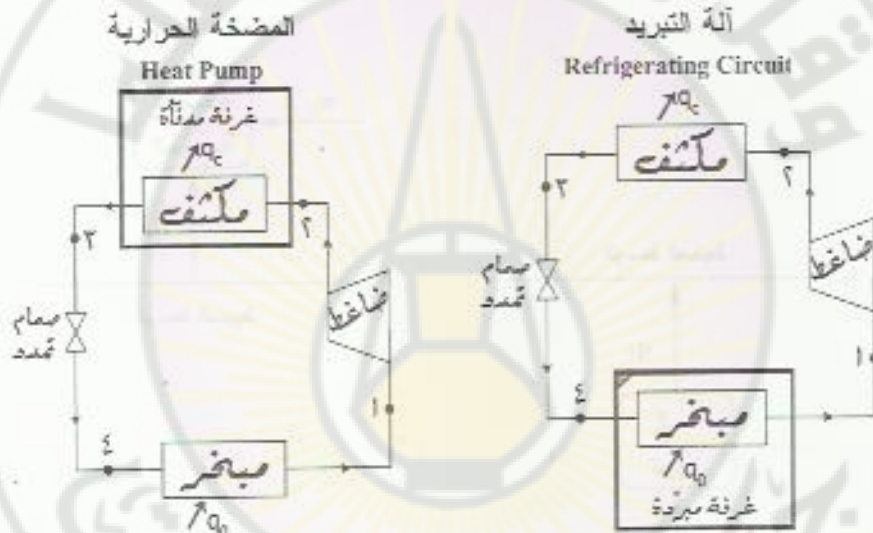
w_c : العمل المقدم للضاغط.

q_1 : كمية الحرارة المأخوذة (المحسوبة) من الوسط المبرد.

q_2 : كمية الحرارة المعطاة للوسط الساخن.

أي إن مبدأ العمل يعتمد على سحب الحرارة من الوسط المحيط وتقديمها إلى حيز يراد تسخينه أي من حيز ذي درجة حرارة منخفضة إلى حيز ذي درجة مرتفعة.

حيث يسري مفعول التطبيقات الترموديناميكية لدائرة كارنو العكسية المعروفة على مبدأ عمل آلة تبريد المضخة الحرارية التي هي دائرة تبريد تختلف فقط من حيث الاستخدام (تبريد / تسخين) كما هو موضح في الشكل (3-2).

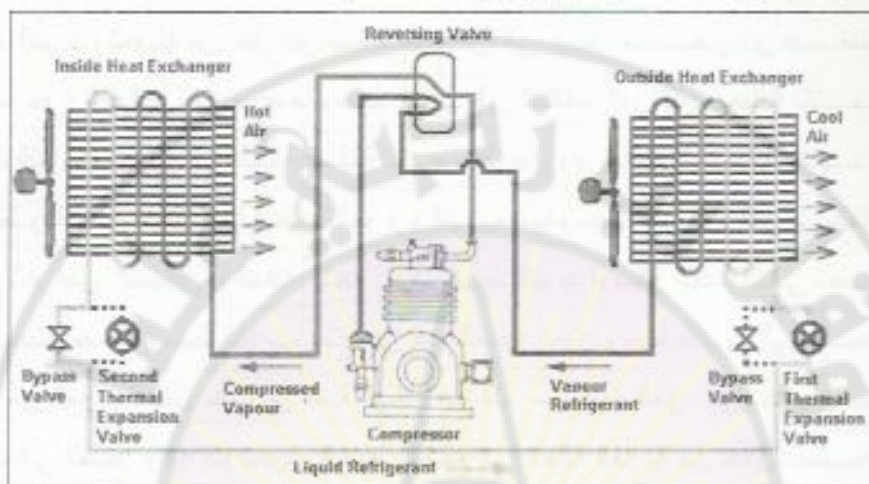


عند تشغيل آلة التبريد، تكون استطاعة المبخر (استطاعة التبريد) عند درجة الحرارة المنخفضة المحددة حسب الهدف من العملية، ودرجة حرارة التكاليف يتم اختيارها منخفضة قدر الإمكان. بينما في المضخة الحرارية، تكون استطاعة المكثف (استطاعة التسخين) عند درجة الحرارة العالية المحددة حسب الهدف من العملية، ودرجة الحرارة في المبخر يتم اختيارها وفقاً للمنبع الحراري المستخدم.

الشكل (3-2) مقارنة آلة تبريد والمضخة الحرارية

و الشكل (4-2) يوضح المضخة الحرارية التي تعمل باعتبارها جهاز تكييف هواء صيفاً وشتاءً، حيث يجهز بصمام عكس دائرة (Reversing Valve) يمكن وسيط التبريد من الجريان باتجاه معاكس (Backwards)، فتمتص الحرارة من الهواء

الخارجي وتدخله إلى أماكن الإقامة، أي أن الملف الداخلي (Indoor Coil) والذي يعمل مبخراً في فصل الصيف يكون هو المكثف في الشتاء.



الشكل (4-2) دورة مضخة حرارية (هواء - هواء) مزودة بصمام عكس دورة

2-1-2- الدارة الترموديناميكية للمضخة الحرارية:

معنى "حالة ترموديناميكية" لسادة ماء؛ أي فهم حالة المادة وبشكل مألوف مع الخواص التي تحدد الحالة:

- 1- درجة الحرارة.
- 2- الضغط.
- 3- الحجم النوعي.
- 4- الانتالبي.
- 5- الانتروبي.

دورة كارنو:

في عام 1824 استخدم كارنو الدورة الترموديناميكية العكسية ليصف العملية الترموديناميكية لألة التبريد (المضخة الحرارية). ولا تزال الدورة التي أسسها المقياس الأساسي والتي من خلالها يقاس مزدود المضخة الحرارية.

يبين الشكل (2-3) و (4-2) في الفقرة السابقة دورة المضخة الحرارية لغرض التدفئة والتي تتألف من أربعة أجزاء رئيسية هي:

- 1- الضاغط.
- 2- المكثف.
- 3- وسيلة التمدد.
- 4- المبخر.

كما يعطي الشكل (5-2) تمثيل دائرة المضخة الحرارية حرارياً على المخطط $(\log p - h)$ راجع الفقرة (3-4) من الفصل الرابع، حيث يقوم الضاغط بعملية ضغط وسيط التبريد وتحويله من غاز ذي ضغط منخفض إلى غاز محمص ذي ضغط ودرجة حرارة عاليين، يتجه بعدها وسيط التبريد إلى المكثف الذي يقوم بعملية تكثيف وسيط التبريد وتحويله إلى الحالة السائلة عند ضغط عال ودرجة حرارة مناظرة لهذا الضغط وذلك من خلال عملية طرد للحرارة التي يحملها وسيط التبريد، والتي يستفاد منها لأغراض التسخين والتكثف، يتجه بعدها وسيط التبريد لوسيلة التمدد التي تعمل على خفض ضغط وسيط التبريد، ينتج عن هذه العملية تحول وسيط التبريد إلى خليط مشبع من الغاز والسائل حيث إن كمية السائل فيه أكبر من كمية الغاز. ثم يتجه وسيط التبريد إلى المبخر وفيه يتم تحويل الخليط المشبع إلى الحالة الغازية من خلال عملية امتصاص للحرارة من وسط أسخن من وسيط التبريد (المنبع الحراري للمضخة الحرارية كما ورد في الفصل الأول)، ثم يعود وسيط التبريد إلى الضاغط ليقوم بدورة جديدة (انظر إلى شكل (3-2)) حيث مر معنا في الفصل الأول شرح مفصل.

مخطط الضغط والإنتالبي:

دورة انضغاط البخار البسيطة (Simple Vapor Compression Cycle (VCC):

دورة انضغاط البخار البسيطة الشكل (4-2) والشكل (5-2) تعرف بدورة كارنو العكسية الترموديناميكية أو الدورة النظرية للتبريد والعمليات الأساسية لدورة البخار الانضغاطية البسيطة يمكن تلخيصها في الآتي:

العملية 1→2 عملية ثبوت الإنتروبي (Isentropic Compression (s = c):

عند دخول وسيط التبريد إلى الضاغط يكون في حالة بخار (1 - x) وبعدها يتم ضغط وسيط التبريد في عملية أديباتية عكسية (ثبوت الإنتروبي) حيث يزداد الضغط من ضغط السحب عند النقطة (1) إلى ضغط الطرد (النقطة 2) وعليه يتم بذل عمل للضاغط وباستخدام القانون الأول لترموديناميك بين النقطتين (1) و (2) نجد أن:

$$W_C = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (1-2)$$

حيث:

$$\dot{m} = \frac{Ks}{S} \text{ كمية وسيط التبريد}$$

$$W_C = (Kw) \text{ عمل (شغل) الانضغاط}$$

$$h_1 = (KJ/Kg) \text{ الإنثالبي عند النقطة (1)}$$

$$h_2 = (KJ/Kg) \text{ الإنثالبي عند النقطة (2)}$$

وذلك بمرئض الآتي:

- التغير في طاقة الوضع والحركة صغير جداً ويمكن إهماله.

العملية 2→3 عملية فقدان الحرارة بالمكثف (مع ثبوت الضغط):

Process 2-3 Heat Rejection to hot region ($P_C = c$) والحرارة المطرودة

التي يستفاد منها في المضخة الحرارية عند جريان وسيط التبريد في المكثف من (2) إلى (3) يتم فقدان الحرارة إلى مستهلك الحرارة (جهاز التسخين أو التدفئة) أو الجو المحيط الذي في درجة حرارة أقل من درجة حرارة المكثف وسيط التبريد (آلة تبريد) يدخل المكثف في حالة تجميد حيث يبرد تبريداً محسوساً مع ثبوت الضغط إلى درجة التجميد. بعدها تكون عملية التبريد في المكثف تبريداً كامناً حتى يصل وسيط التبريد إلى النقطة (3) عندها يكون وسيط التبريد سائلاً مشبعاً.

تكون كمية الحرارة المفقودة من المكثف (Q_C) كمية الحرارة المستخدمة هي:

$$Q_C = m(h_2 - h_3) \quad (2-2)$$

الحرارة المفقودة خلال المكثف (Kw)

$$h_3 = (KJ/Kg) \text{ الإنثالبي عند النقطة (3)}$$

$$h_2 = (KJ/Kg) \text{ الإنثالبي عند النقطة (2)}$$

العملية 4→3 عملية الخنق خلال صمام التمدد (مع ثبوت الإنثالبي):

Process 3-4 Throttling Process at ($h = c$) عملية الخنق التي تتم خلال

صمام التمدد تؤدي إلى خفض ضغط المكثف إلى الضغط المنخفض للمبخر عند (4) في العملية 4→3 كلاً من درجة الحرارة والضغط يتم خفضهما. وباعتبار عملية الخنق هذه عملية أدياباتيكية وبدون بذل أي عمل، يمكن باستعمال القانون الأول للترموديناميك الحراري التوصل إلى التالي: $h_3 = h_4$

العملية 1→4 عملية اكتساب الحرارة بالمبخر (مع ثبوت الضغط):

Process 3-4 Heat addition at cold region ($P_c = c$) العملية الأخيرة 4→3

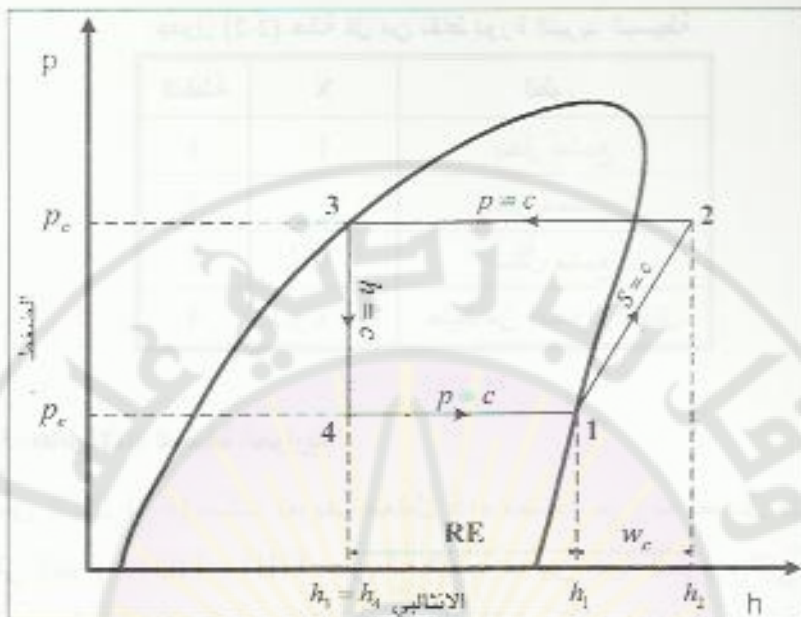
عملية اكتساب أو سحبها الحرارة تكون في المبخر، حيث تكون درجة حرارة الحيز المحيط أو المنبع الحراري المستخدم كي ينسئ انتقال الحرارة من الحيز المحيط إلى المبخر. ويدخل وسيط التبريد المبخر كوسيط تبريد مكون من بخار وسائل (نسبة كمية السائل غالباً ما تكون أكبر من البخار) وتكون عملية اكتساب الحرارة هذه عملية كامنة حتى يكون وسيط التبريد بخاراً مشبعاً (النقطة 1) كما في المكثف تكون هذه العملية عند ثبوت الضغط، تكون كمية الحرارة المكتسبة بالنسبة للمبخر (يمكن تعريفها لاحقاً بحمل المبخر) هي:

$$Q_e = m(h_1 - h_4) \quad (3-2)$$

الحرارة المفقودة خلال المكثف ($Q_c = Kw$)

الإنثالبي عند النقطة (1) $h_1 = (\text{KJ/Kg})$

الإنثالبي عند النقطة (4) $h_4 = (\text{KJ/Kg})$



شكل (5-2) مخطط الحالة (State Diagram) لدورة التبريد البسيطة

ملخص العمليات الترموديناميكية:

جدول (1-2) ملخص عمليات الترموديناميكية لدورة المضخة الحرارية البسيطة

العملية Process	المكون Component	العلاقة الأساسية key Relation	استنتاج القانون الأول 1st Law Analysis
1-2	المضاغط compressor	$S_2 = S_1$	$W_c = m(h_2 - h_1)$
2-3	المكثف Condenser	$P_3 = P_2$	$Q_c = m(h_2 - h_3)$
3-4	صمام التمدد expansion valve	$h_4 = h_3$	$h_4 = h_3$
4-1	المبخر evaporator	$P_4 = P_1$	$Q_e = m(h_1 - h_4)$

والجدول (2-2) الذي يلخص حالات النقاط الأربع في الدارة المثالية.

جدول (2-2) حالة كل من نقاط دورة التبريد البسيطة

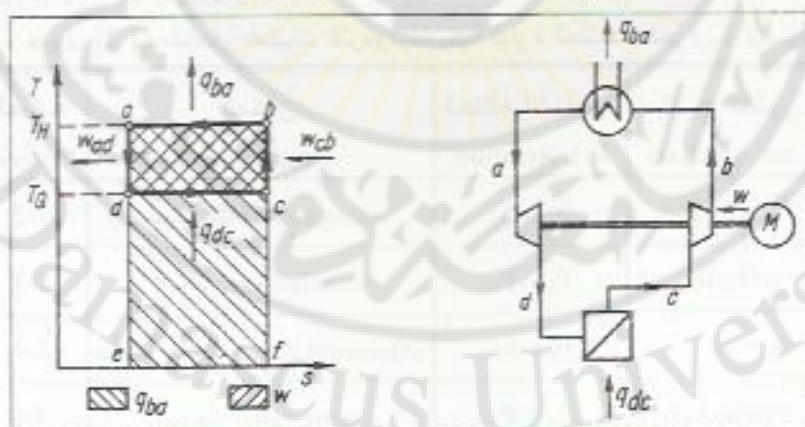
النقطة	X	الطور
1	1	بخار مشبع
2	-	بخار محمص
3	0	سائل مشبع
4	$0 \leq x \leq 1$	خليط من البخار والسائل

3-1-2- معامل الأداء للمضخة الحرارية:

من الشكل (2-6) يمكننا تعريف معامل أداء مضخة حرارية تعمل ما بين درجتى الحرارة $T(H)$ و $T(Q)$ على أنه النسبة ما بين كمية الحرارة التي يستفاد منها (نحصل عليها) ومقدار الطاقة المصروفة (المقدمة للضاغط):

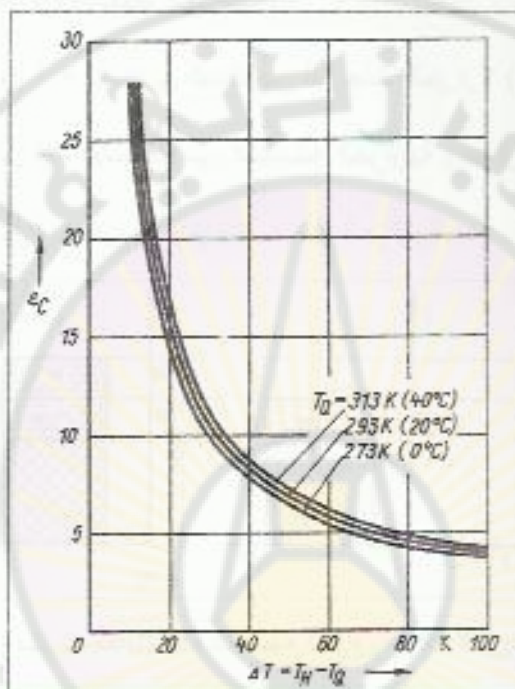
$$\varepsilon_{HP} = Q_H / P = Q_{bc} / W_{cb} \quad (4-2)$$

$$\varepsilon_{HP} = T_H / (T_H - T_Q) \quad (5-2)$$



الشكل (2-6) دورة كارنو العكسية المثالية لمضخة حرارية مخطط (T-s)

من العلاقة (5-2) نلاحظ أنه كلما ازداد الفرق $\Delta T = T_H - T_C$ ينخفض معامل الأداء للمضخة الحرارية وهذا موضح في الشكل (7-2):



الشكل (7-2) معامل أداء المضخة الحرارية وفقاً لفرق درجات الحرارة
 يمكننا مقارنة معامل أداء المضخة الحرارية مع معامل أداء آلة التبريد:
 حيث إن معامل أداء آلة التبريد:

$$\epsilon_c = T_N / (T_u - T_N) \quad (6-2)$$

الشكل (8-2): يوضح المقارنة بين المضخة الحرارية وآلة تبريد:

(a) مضخة حرارية.

(b) آلة تبريد.

(c) ربط التبريد - التسخين بأن واحد.

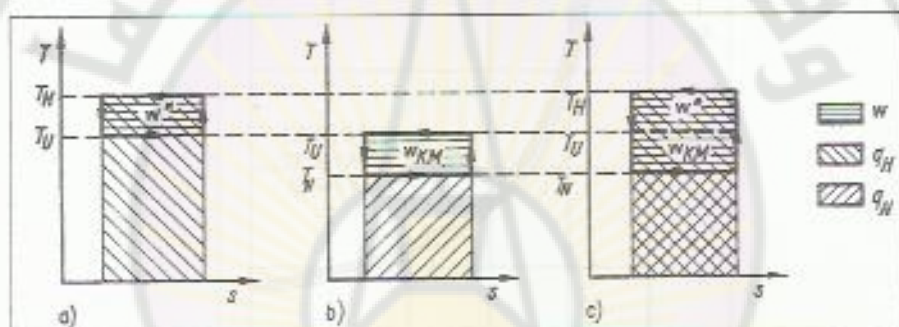
حيث:

T_u : درجة حرارة المحيط الخارجية.

T_N : درجة حرارة المستوى المنخفض لدرجات الحرارة (المبخر).

T_{H1} : درجة حرارة الاستفادة من المضخة الحرارية وحرارة التكلفة.

T_{H0} : درجة حرارة منبع الحرارة للمضخة الحرارية.



الشكل (8-2) مقارنة معامل أداء المضخة الحرارية وآلة التبريد والآلة المركبة

نلاحظ أن معامل أداء المضخة الحرارية أكبر من معامل أداء دورة التبريد

بـ واحد.

$$\epsilon_{HP} = \epsilon_R + 1 \quad (7-2)$$

يمكن استخدام التعاريف السابقة لمعامل الأداء مع ضرورة التمييز، ما دامت المضخة الحرارية غالباً ما تستعمل لغايتي التسخين والتبريد معاً.

1- آلة التبريد الاتضاغاطية المكبسية عند استخدامها مضخة حرارية:

معامل الأداء - كمية الحرارة التي يعطيها المكثف على مقدار الطاقة المصروفة في الضاغط

2- آلة التبريد الامتصاصية عند استخدامها مضخة حرارية:

معامل الأداء = كمية الحرارة المتبادلة في الماص والمكثف على كمية الحرارة المقدمة في المولد. أي:

$$\varepsilon_{Hp(ads)} = (Q_A + Q_c / Q_G) \quad (8-2)$$

Q_A : كمية الحرارة المسحوبة من الماص (وعاء الامتصاص).

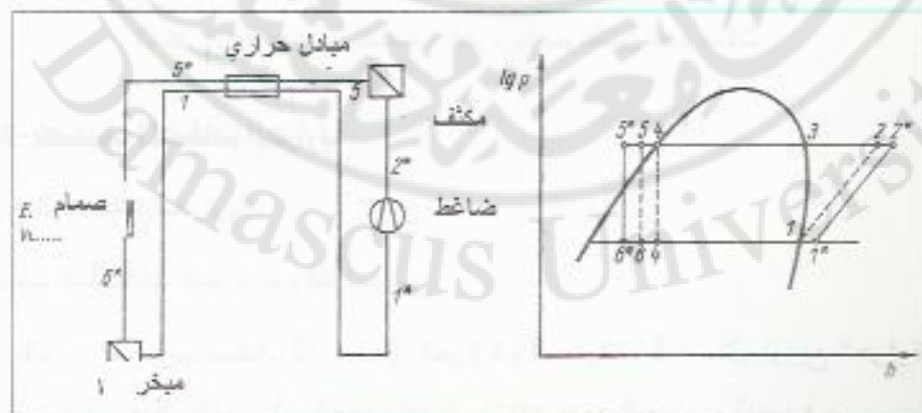
Q_c : كمية الحرارة المسحوبة من المكثف.

Q_G : كمية الحرارة المقدمة في المولد.

حتى يكون استخدام المضخة الحرارية المكسبية اقتصادياً وفعالاً يجب أن تكون قيمة معامل الأداء: $\varepsilon_{Hp} > 2$

حسب الاختبارات والدراسات معامل الأداء الفعلي ينخفض عن معامل الأداء النظري بـ: % (50-60) بسبب الاستطاعة المستهلكة في الأجزاء المساعدة المستعملة في المضخة الحرارية، مثل مضخة الماء - مروحة هواء...

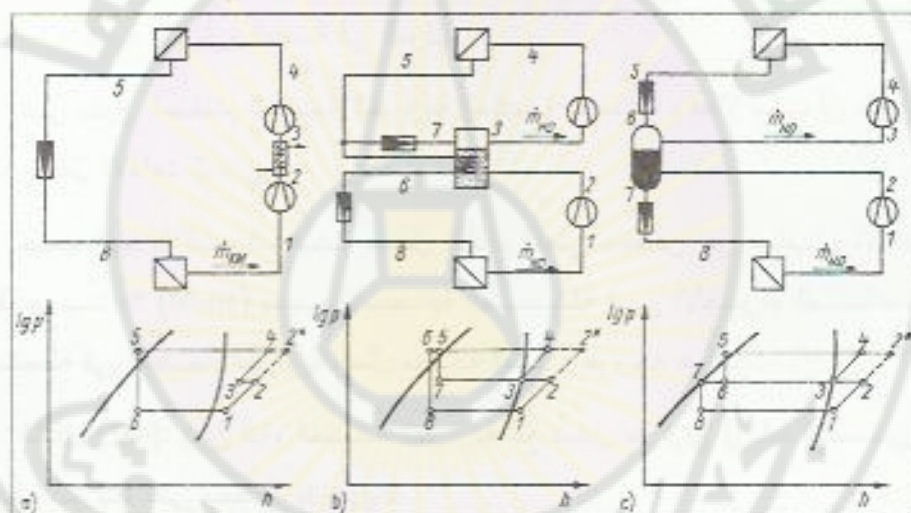
الشكل (9-2): يبين أداء المضخة الحرارية مع مبادل حراري (زيادة التسخين وزيادة التبريد) على مخطط $\log p - h$



الشكل (9-2) أداء المضخة الحرارية مع مبادل حراري على مخطط $\log p - h$

كما هو مألوف في دارات التبريد هناك دارات بمرحلة واحدة وبمرحلتين
انضغاط، كذلك في دارات المضخات الحرارية وهذا موضح في الشكل (10-2).
وهو عبارة عن مضخة حرارية ثنائية المرحلة بعدة حالات:

- (a) مضخة حرارية ثنائية المرحلة مع مبرد بيني بمرحلة تمديد واحدة.
(b) مضخة حرارية ثنائية المرحلة مع وعاء تبريد بيني بمرحلة تمديد واحدة.
(c) مضخة حرارية ثنائية المرحلة مع وعاء تبريد بيني بمرحلتين تمديد.



الشكل (10-2) دارات المضخة الحرارية بمرحلتين لعدة حالات

2-2- تصنيف المضخات الحرارية:

أنواع المضخات الحرارية:

تصنف المضخات الحرارية وفقاً لما يلي:

- 1- النورة التيرموديناميكية. 2- مصدر الحرارة والمصرف. 3- سائل توزيع الحرارة والبرودة. 4- هيكل البناء. 5- الحجم والتركيب. 6- حدود المصدر والمصرف.

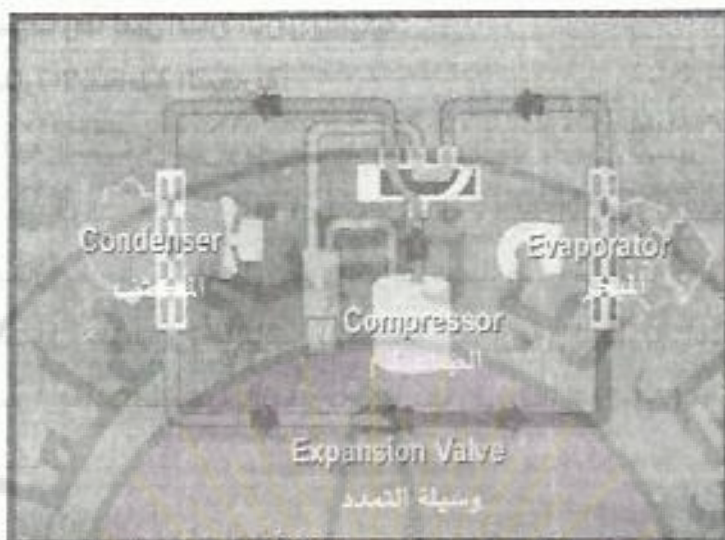
2-1-2-1- التصنيف وفقاً لعمل الدارة الترموديناميكية:

2-1-1-2- الدارة الانضغاطية التبخيرية:

تعتبر آلية المضخة الحرارية بضغط البخار وتبخيرية من أشهر الطرق المستخدمة في الوقت الحاضر يتم فيها تغير حالة وسيط التبريد المستخدم من سائل إلى بخار بغرض الحصول على التبريد المطلوب، ومن بخار إلى سائل بغرض الحصول على دارة التكاثف (المضخة الحرارية) المطلوبة. تتألف دارة المضخة الحرارية الانضغاطية التبخيرية كما سبق في الفقرة (2-1-2) من الأجزاء الرئيسية التالية:

1- الضاغط 2- المكثف 3- وسيلة التمدد 4- المبخر

حيث يقوم الضاغط بعملية ضغط وسيط التبريد وتحويله من غاز ذي ضغط منخفض إلى غاز محمص ذي ضغط ودرجة حرارة عاليين، يتجه بعدها وسيط التبريد إلى المكثف الذي يقوم بعملية تكثيف وسيط التبريد وتحويله إلى الحالة السائلة عند ضغط عال ودرجة حرارة مناظرة لهذا الضغط وذلك من خلال عملية طرد للحرارة التي يحملها وسيط التبريد. يتجه بعدها وسيط التبريد لوسيلة التمدد والتي تعمل على خفض ضاغط وسيط التبريد، ينتج عن هذه العملية تحويل وسيط التبريد إلى خليط مشبع من الغاز والسائل حيث إن كمية السائل فيه أكبر من كمية الغاز. ثم يتجه وسيط التبريد إلى المبخر وفيه يتم تحويل الخليط المشبع إلى الحالة الغازية من خلال عملية امتصاص للحرارة من وسط أسخن من وسيط التبريد، ثم يعود وسيط التبريد إلى الضاغط ليقوم بدورة جديدة أنظر شكل (2-11).



الشكل (11-2) الدارة البسيطة للمضخة الحرارية

2-1-2-2- الدورة الأساسية للمضخة الحرارية الامتصاصية:

يوضح شكل (12-2) رسماً تخطيطياً للدورة الأساسية للتبريد (المضخة الحرارية) بالامتصاص، وتستخدم الدورة مادتين قابلتين لتكوين محلول متجانس عند درجة حرارة معينة وقابلتين للفصل عند درجة حرارة أخرى، وإحدى المادتين تعمل على أنها وسيط تبريد والمادة الأخرى على أنها مادة ماصة، وفي هذه الدورة يتم استبدال الضاغط الميكانيكي لدورة التبريد بانضغاط البخار بثلاث وحدات هي المولد الحراري (Generator)، ووعاء المص (Absorber)، ومضخة ميكانيكية (pump)، ويضاف إلى هذه الوحدات الثلاث مبادل حراري لتحسين أداء الدورة، وتعمل دورة التبريد بالامتصاص عند ضغطين مختلفين. الضغط العالي هو ضغط المكثف الذي يتساوى مع ضغط المولد الحراري، أما الضغط المنخفض فهو ضغط المبخر الذي يتساوى مع ضغط وعاء المص، وتعمل المضخة على رفع ضغط المحلول من الضغط المنخفض إلى الضغط المرتفع، وبتسخين المحلول في المولد الحراري يبدأ

بخار مائع التبريد عن الانفصال من المحلول ويتكثف بخار مائع التبريد في المكثف ثم يخفض ضغط المائع بتمريره في صمام التمدد إلى المبخر، ويتم في وعاء المص امتصاص المحلول العائد من المولد الحراري بعد خفض الضغط خلال صمام التمدد لبخار مائع التبريد القادم من المبخر، وينتج عن عملية الامتصاص حرارة، وهذا يتطلب تبريداً لوعاء المص، إن تشغيل دورة التبريد بالامتصاص يحتاج إلى إضافة حرارة في المولد الحراري إلى عمل المضخة بدلاً من العمل الذي يحتاجه الضاغط في نظام التبريد الميكانيكي، ونظراً لأن عمل المضخة صغير بالنسبة لحرارة المولد لذا فإنه يهمل، وتصبح الطاقة المطلوبة للتشغيل هي طاقة حرارية ولذا يسمى التبريد بالامتصاص بالتبريد الحراري.

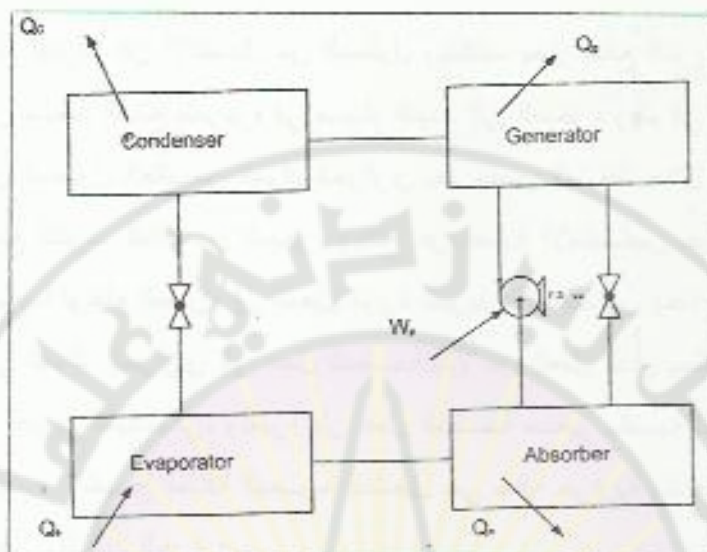
- التحليل الترموديناميكي لدورة التبريد بالامتصاص:

يعرف معامل الأداء لدورة التبريد بالامتصاص:

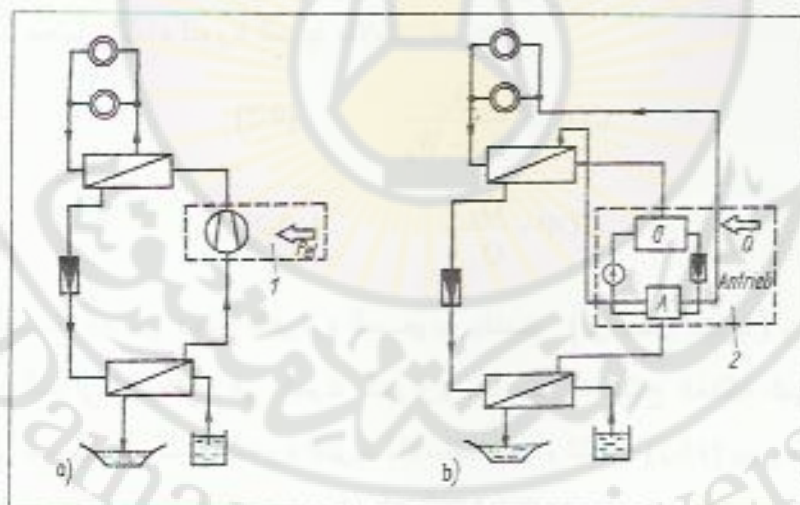
$$COP = \frac{Q_E}{Q_G + W_p} \quad (9-2)$$

$$COP = \frac{Q_E}{Q_G} \quad (10-2)$$

حيث Q_E هي معدل الحرارة المسحوبة بالمبخر (أي حمل التبريد) و Q_G هي معدل الحرارة المضافة في المولد الحراري. ويمكن استنتاج العلاقة التي تعطي أقصى معامل أداء ممكن لدورة التبريد بالامتصاص، والشكل (13-2) يبين مقارنة ما بين المضخة الحرارية الامتصاصية والانضغاطية البخارية.



الشكل (12-2) نظام التبريد بالامتصاص (المضخة الحرارية)



الشكل (13-2) مقارنة المضخة الحرارية الامتصاصية
والمضخة الحرارية الانضغاطية

2-2-2- تصنيف المضخات وفقاً لمصادر الطاقة:

الشكل (2-14) يظهر الأنواع الأكثر شيوعاً للمضخات الحرارية ذات دورة ضغط الغاز المغلقة المستعملة في التبريد والتدفئة.

1- المضخات الحرارية هواء - هواء:

هذا النوع هو الأكثر شيوعاً ومناسب خصوصاً للمضخات الحرارية المستقلة المنتجة معملياً. وتستعمل بشكل واسع في التطبيقات المنزلية والتجارية انظر الفصل السابع. المخطط الأول في الشكل (2-14) هو دورة تبريد نموذجية.

في أنظمة المضخة الحرارية نوع هواء - هواء يمكن أن تبدل معيرات هواء آلية أو يدوية دارات الهواء للحصول على الحرارة أو التبريد من المكان المكيف.

في هذا النظام تعمل إحدى الوشائع دوماً على أنها مبخرة بينما تعمل دوماً الثانية مكثفاً. يمر الهواء المكيف على المبخر خلال دورة التبريد والهواء الخارجي على المكثف. وضعية معير الهواء تسبب التغير من التبريد إلى التدفئة.

2- المضخات الحرارية نوع ماء - هواء:

تعتمد هذه المضخات الحرارية على الماء على أنه مصدر حراري ومصروف وتعمل على الهواء لنقل الحرارة من المكان المكيف وإليه (انظر المخطط الثاني في الشكل 2-11) وتشمل الأنواع التالية:

مصدر الحرارة ومصروف الحرارة	وسيط النقل	الدورة الحرارية
هواء	هواء	وسيط تبريد مع تغير طوري

مصدر الحرارة ومصرف الحرارة	وسيط التقل	الدورة الحرارية
ماء	هواء	وسيط تبريد مع تغير طور
ماء	ماء	ماء مع تغير طور
مزيجية أرضية أو دائرة مغلقة أرضية	هواء	وسيط تبريد مع تغير طور
مصدر أرضي تعدد مباشر	هواء	وسيط تبريد مع تغير طور

الشكل (2-14) أنواع المضخات الحرارية الأكثر شيوعاً

- المضخات الحرارية للمياه الجوفية:

تستعمل المياه الجوفية من الآبار على أنها مصدر حراري و/أو مصرف. بحيث يمكن أن نقوم بتدوير مياه المصدر مباشرة إلى المضخة الحرارية أو باستخدام سائل وسيط في دائرة مغلقة مشابه لحالة المضخات الحرارية بالمزدوجة الأرضية.

- المضخات الحرارية بالمياه السطحية:

تستخدم المياه السطحية من البحيرات أو البرك أو الأنهار على أنها مصدر حراري أو مصرف، وكما في حالة للنظام السابق والمزدوجة الأرضية هذه الانظمة يمكن ان تقوم بتوفير ماء المصدر مباشرة أو عبر سائل وسيط في دائرة مغلقة.

- المضخات الحرارية ذات المصدر الداخلي:

تستخدم الحمل التبريدي الداخلي المرتفع المتولد في الأبنية العصرية مباشرة أو عبر وسيط تخزين وهذا يتضمن المضخات الحرارية بدارات الماء.

- المضخات الحرارية المدعومة بالشمس:

التي تعتمد على الطاقة الشمسية ذات الحرارة المنخفضة باعتبارها مصدراً حرارياً ويمكن أن تشبه أنظمة ماء - هواء أو أنواعاً أخرى بالاعتماد على نوع المجمع الشمسي ونظام توزيع التبريد والتدفئة.

مضخات حرارية بمصدر مياه المجاري

تستعمل حرارة مياه المجاري أو الحرارة الضائعة للمصانع على أنها مصدر حراري. يمكن أن يدخل ماء المجاري مباشرة إلى مبخر المضخة الحرارية بعد تنقيته أو يمكن أن يؤخذ من خزان تجميع حسب نوع التطبيق. ويمكن أن تستعمل دائرة وسيطة لنقل الحرارة بين المبخر والمصدر الحراري.

3- المضخات الحرارية نوع ماء-ماء:

تستعمل هذه الأنظمة الماء على أنه مصدر حراري ومصرف للتبريد والتدفئة. إن التبدل بين التدفئة والتبريد في دوائر وسيط التبريد يمكن أن يحدث، ولكن غالباً من الأكثر ملاءمة أن نقوم بالتبديل في دارات الماء كما هو واضح في المخطط الثالث في الشكل 2-14 ويظهر المخطط أيضاً دخولاً مباشراً للماء من مصدر الماء إلى المبخر. في بعض الحالات ربما من الضروري انخال مصدر الماء بصورة

غير مباشرة عبر مبادل حراري أو مبخر ذي جدار مضاعف لتجنب إفساد نظام الماء البارد المغلق. الذي يكون معالجا عادة. هناك أيضاً طريق أخرى تستعمل نظام ماء مكثف بدارة مغلقة.

- المضخات الحرارية ذات المزدوجة الأرضية:

حيث تستخدم الأرض مصدراً ومصرفاً حراريّاً، ربما تحوي المضخة الحرارية على مبادل حراري وسيط تبريد - ماء أو ذي تمدد مباشر كلا النوعين موضحان في الشكل (2-14).

في حل الأنظمة ذات مبادلات حرارية وسيط تبريد - ماء يضخ الماء أو مادة غير قابلة للتجمد عبر أنابيب أفقية أو شاقولية أو وشائع مدفونة في الأرض. المضخات الحرارية ذات التمدد المباشر والمزدوجة الأرضية تستعمل وسيط التبريد في دارات مبخر ذات تمدد مباشر - مغمورة - أو بإعادة تدوير لوشائع الأنابيب الأرضية.

يؤثر نوع التربة ومحتوى الرطوبة والتركيب والكثافة والتجانس بالقرب من المناطق المحيطة على نجاح هذه الطريقة من التبادل الحراري.

تؤثر بعض مواد الأنابيب ومادة بناء الأنابيب وتعرية التربة المعالجة والمياه الجوفية على انتقال الحرارة ومدة الخدمة.

في أنواع هذه الدورة جزء من كمية الحرارة من المبخر أو جميعها إضافة لحرارة الانضغاط تنقل لمكثف مبرد بالماء. ثم تكون حرارة المكثف جاهزة للاستخدام لتسخين الهواء أو تسخين مياه الاستعمال. هناك أنواع أخرى للمضخات الحرارية تتضمن التالي:

- مضخات حرارية هواء - ماء بدون تبديل: وتسمى عادة مسخنات الماء بالدارة العكسية.

- المضخات الحرارية وسيط تبريد - ماء: وتقوم بتكثيف وسيط التبريد بمبدأ التعاقب، التعاقب يقوم بضخ الحرارة إلى درجة أعلى حيث تنبذ إلى ماء أو سائل آخر.

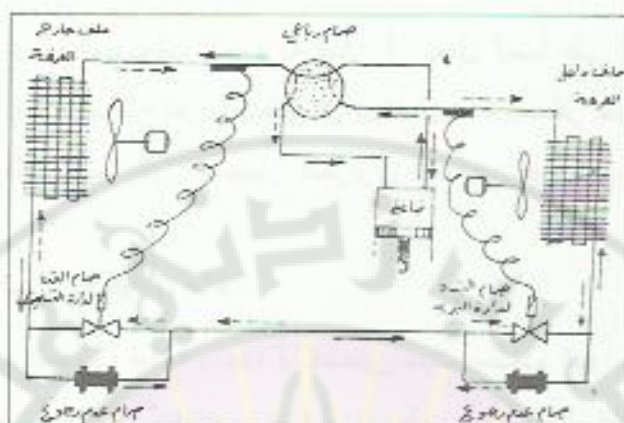
هذا النوع من المضخات الحرارية يمكن أن يعمل أيضاً على أنه تكثيف لتبريد أي سائل أو عملية انتاجية تقريباً. يمكن أن تستعمل عدة مصادر حرارية أخرى لتعويض الأوقات حينما يكون المصدر الحراري الأساسي غير كاف.

- أمثلة:

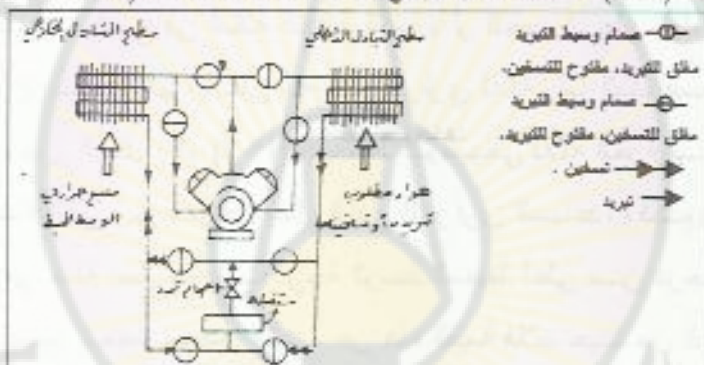
1- المضخة الحرارية هواء/ ماء:

توجد هذه المضخة قطعة واحدة أو قطعتين حيث يستخدم الهواء منبعاً حرارياً والماء وسيطاً لنقل للحرارة (ماء ساخن) أو وسيطاً مع مياه نظام التدفئة.

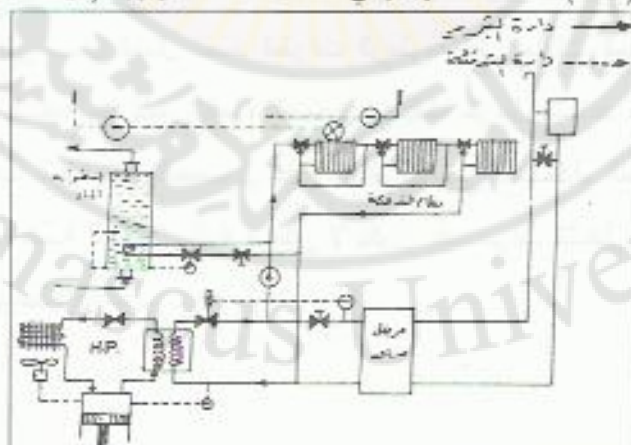
يستخدم هذا النوع في أمكنة التدفئة الكبيرة أو للحصول على مياه ساخنة في الصناعة، إذ يستخدم الهواء على أنه منبع حراري للآلة، أما الماء فيستخدم مصرفاً للحرارة، ويبين الشكل رقم (2-15) المخطط التوضيحي للآلة الحرارية (هواء - ماء) بالإضافة إلى وجود مرجل يمثل المنبع الحراري المساعد، وتكون المضخة الحرارية في حالة عمل ما دامت درجة الوسط المحيط أعلى من درجة حرارة الصفر، وعندما تنخفض بعض الشيء عن هذه القيمة فلا بد حينئذ من البدء بتشغيل المنبع الحراري المساعد نظراً للصعوبات التي تسبب توقف تشغيل نظام المضخة الحرارية وعلى سبيل المثال تجمد قطرات الرطوبة على ملفات المبخر، علماً أن خارج فصل التدفئة يتم تأمين الماء الصحي بوساطة مرجل مساعد كما في الشكل وعندما يرغب المستهلك بالحصول على الماء الصحي باستخدام المضخة الحرارية لابد من زيادة كمية الماء في الدارة حتى لا يكون عدد مرات تشغيل النظام وتوقفه كبيراً خلال واحدة الزمن.



الشكل (2-15): المخطط التوضيحي لآلة المضخة الحرارية (هواء - هواء)



الشكل (2-16): المخطط التوضيحي لآلة المضخة الحرارية (هواء - هواء)



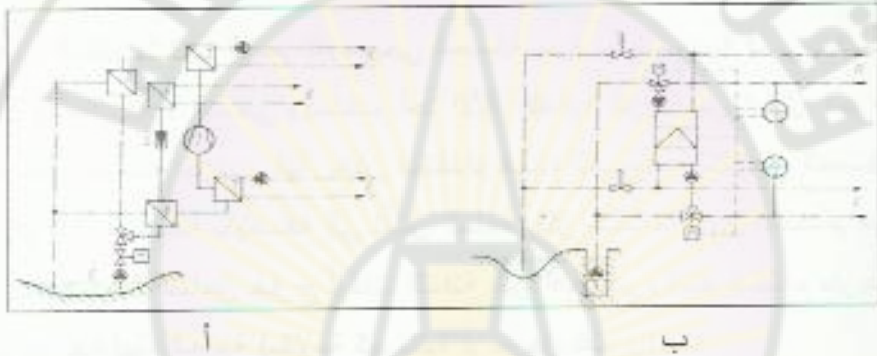
الشكل (2-17): دائرة مضخة حرارية (هواء - ماء)

مع مرجل مساعد للتدفئة وتأمين الماء الصحي

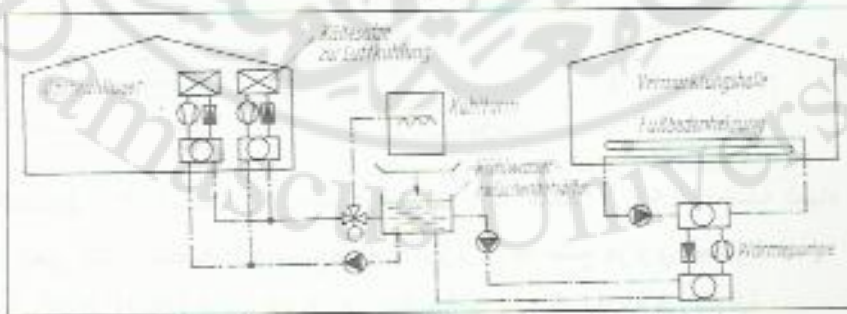
2- المضخة الحرارية ماء/ماء:

تؤخذ الحرارة من مياه بئر أو مياه سطحية أو مياه محطة تبريد، وعندها لا توجد مشاكل في التدفئة.

أو تؤخذ الحرارة من باطن الأرض وعندها يجب ربط ملف الأنابيب في باطن الأرض مع وسيط مناسب لنقل الحرارة كما هو موضح في الشكل (18-2) والشكل (19-2).



- 1- ضاغط 2- مكثف 3- مبادل حراري لزيادة التبريد
4- مبادل حراري 5- صمام تمدد 6- مبخر 7- مبادل حراري
أ- مضخة حرارية مياه سطحية/ ماء
ب- مضخة حرارية مياه جوفية/ ماء
الشكل (18-2)

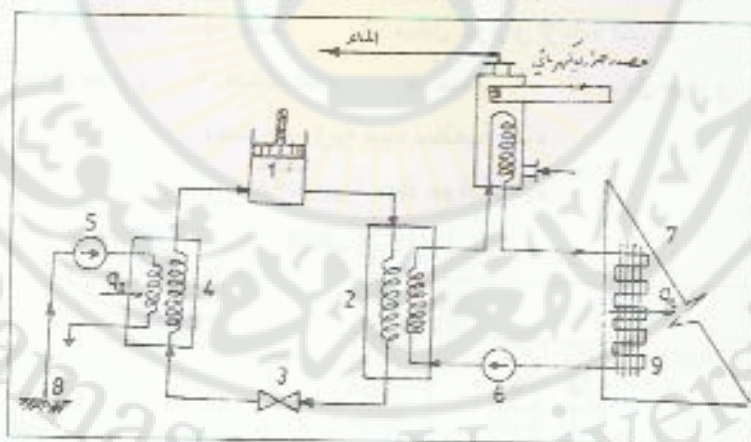


الشكل (19-2) مضخة حرارية مياه مكثف محطة تبريد/ ماء

3- المضخة الحرارية التي تستخدم مياهاً جوفية على أنها مصدر حراري:

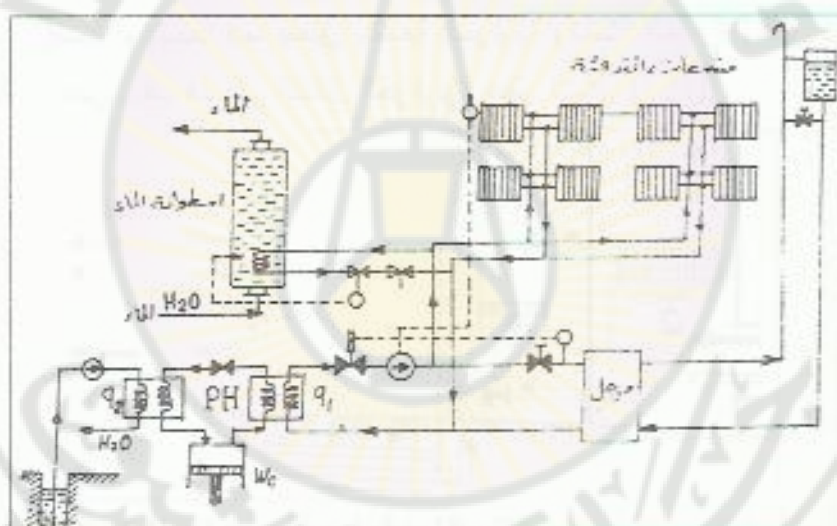
يعتبر الماء الوسط المثالي لأخذ الحرارة منه وخاصة مياه الآبار وذلك بسبب ثبات درجة حرارتها في الشتاء والصيف $(10-15)^{\circ}\text{C}$ ، كما يمكن استخدام المياه السطحية مثل الأنهار والبحيرات والبحار؛ وذلك إذا لم تكن بعيدة عن مكان الاستعمال، بالإضافة إلى ذلك يمكن استخدام المياه الصناعية ومياه الصرف الصحي لدرجة عالية من الأهمية والاقتصادية في معظم الدول الصناعية المتقدمة والباردة.

يبين الشكل (20-2) الرسم التوضيحي لمضخة حرارية مستخدمة في تدفئة المنازل وتأمين الماء الصحي ويستخدم أحد الآبار المائية القريبة من المكان المراد تدفئته على أنه منبع حراري لها. يمكن استخدام هذه المضخة لتأمين الحمل الحراري اللازم للتدفئة بالإضافة إلى تأمين الماء، ولكن غالباً ما يكون استخدام هذا المبدأ لتأمين الماء الساخن خارج أوقات التدفئة غير اقتصادي، لذلك تستخدم طريقة أخرى مساعدة لهذه الحاجة (مقاومة كهربائية أو مرجل تقليدي).



- 1- الضاغط 2- المكثف 3- صمام التمدد 4- المبخر 5- مضخة المياه
6- مضخة المياه 7- الحيز المراد تدفئته 8- منبع حراري (بئر) 9- مشع حراري (جهاز تدفئة)
الشكل (20-2) الرسم التوضيحي لمضخة حرارية مستخدمة في التدفئة

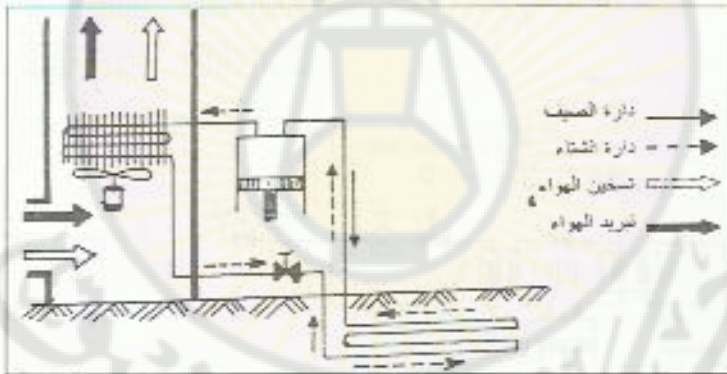
ويوضح الشكل (21-2) المخطط التوضيحي لمضخة حرارية تستخدم للتدفئة وتأمين الماء، ومزودة بمنبع حراري تقليدي (مرجل). في هذه الحالة يمكن تخفيض كلفة التأسيس لهذه المضخة الحرارية وكذلك استهلاك الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيلها، مع العلم أن نظام هذه المجموعة عالي الموثوقية. حيث أن المضخة الحرارية ستقوم بتغطية الحمل الحراري تأمين الماء لأغلب أيام التدفئة، ويتم تشغيل المبرج فقط عندما تكون درجة حرارة الوسط الخارجي أقل من حد معين علماً أن نقطة البدء بتشغيل المبرج يمكن تحديدها لكل نظام حسب الحاجة وذلك باستخدام أجهزة التحكم المناسبة.



الشكل (21-2) المخطط التوضيحي لدارة مضخة حرارية (ماء - ماء) مع استخدام منبع حراري تقليدي

4- المضخات الحرارية (جوف الأرض/ماء):

إن باطن الأرض هو مصدر كبير للطاقة، ويمكننا الحصول على الحرارة منه بتركيب الأنابيب داخلها وتمرير الماء فيها أو وسيط التبريد في حال التمدد المباشر، ونظراً إلى أن تغير درجة الحرارة في باطن الأرض هو أقل من تغيره على سطحها، فإن عامل أداء المضخة الحرارية هو في هذه الحالة أفضل منه في حالة استعمال الهواء إلا أنه أقل من عامل الأداء في حال استعمال مياه الأبار أو كلفة الإنشاء هي عادة مرتفعة، وتصادفنا صعوبات فنية تتعلق بصنع مبادلات حرارية تظمر داخل التربة، مقاومة للتآكل، بالإضافة إلى أن معلومات كثيرة في هذا المجال مازالت ناقصة، ولاسيما فيما يتعلق بالسعة الحرارية وانتقال الحرارة وتأثير درجة رطوبة الأرض وتغيرها على التبادل الحراري. انظر الشكل (22-2).



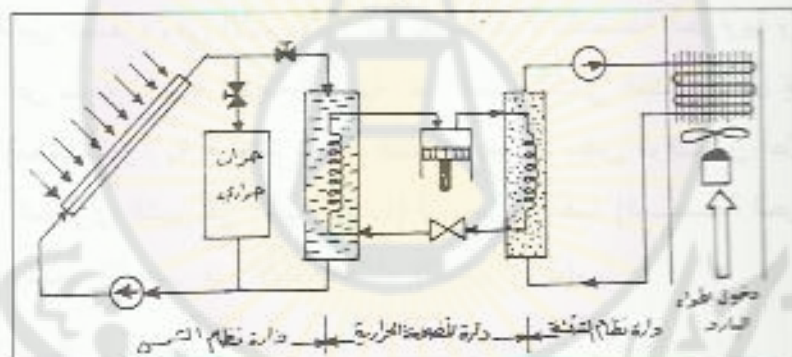
الشكل (22-2) دائرة مضخة حرارية تستخدم أنابيب التربة مصدراً حرارياً

5- المضخات الحرارية التي تستخدم الطاقة الشمسية كمصدر حراري لها:

يمكن الاستفادة من الطاقة الشمسية بشكل رئيسي عن طريق النقاطها بوساطة لواقط شمسية مسطحة أو أنبوبية، وبذلك يمكن رفع درجة حرارة المبخر إلى درجة أعلى مما لو استخدمنا الهواء والماء أو باطن الأرض مصدراً للحرارة، وهذا بدوره يؤدي إلى رفع أداء المضخة الحرارية، ونظراً لطبيعة الطاقة الشمسية المتقطعة فإنه ينبغي تخزين الحرارة بحيث نستعمل الخزانات الحرارية على أنها مصدر للطاقة في

المضخة التي تعمل بطاقة الانضغاط أو استعمال المضخة الحرارية التي تعمل بدارة الامتصاص، إلا أنه نظراً إلى أن عامل أداء دارة الامتصاص يتحسن مع رفع درجة الحرارة في المولد فإن استعمال اللواقط المركزة التي تسمح بالحصول على درجات حرارة عالية هو أفضل عند استعمال دارة الامتصاص.

يبين الشكل (23-2) مبدأ عمل نظام المضخة الحرارية الشمسية، بحيث يتم استخدام المضخة الحرارية والتخزين الحراري من مصدر شمسي للكثفة وتسخين الماء. عندما يستعمل اللاقط الشمسي المسطح بشكل مباشر على أنه مبخر للمضخة الحرارية، في هذه الحالة يجب تمرير وسيط التبريد خلال أنابيب اللاقط، لذلك تجرى تعديلات على اللاقط الشمسي لتحقيق ذلك.



الشكل (23-2) المخطط التوضيحي لمبدأ عمل نظام المضخة الحرارية الشمسية

لما بالنسبة لاستعمال آلة التبريد لغاية التكييف صيفاً فإنه يجب نزع الصفيحة الزخاجية التي تشكل الجزء الأمامي للاقط الشمسي ليسمح ذلك بنبذ الحرارة المطلوب التخلص منها وهكذا يكون لدينا في اللاقط الشمسي مكثف يطلق الحرارة إلى الجو المحيط عند تشغيل آلة التبريد للتكييف الصيفي، وهذا التصميمي المستمد في الولايات المتحدة منذ عام 1955م وتمت تجربته، والمحذور الرئيسي في هذه الطريقة هو أن تجمدات وسيط التبريد بين المضخة الحرارية وبين اللاقط الشمسي ستكون طويلة.

2-2-3- التصفيف وفقاً لأنظمة التدفئة:

2-2-3-1- نظام التدفئة أحادي التكافؤ:

يقوم هذا النظام بتغطية الحمل الحراري اللازم للتدفئة بالمضخة الحرارية فقط كما هو مبين في الشكل (2-24 a + b) حيث النظام b يستخدم خزائناً حرارياً يقوم بتخزين الحرارة في حالات اللاحمل.

2-2-3-2- نظام التدفئة ثنائي التكافؤ والمركب:

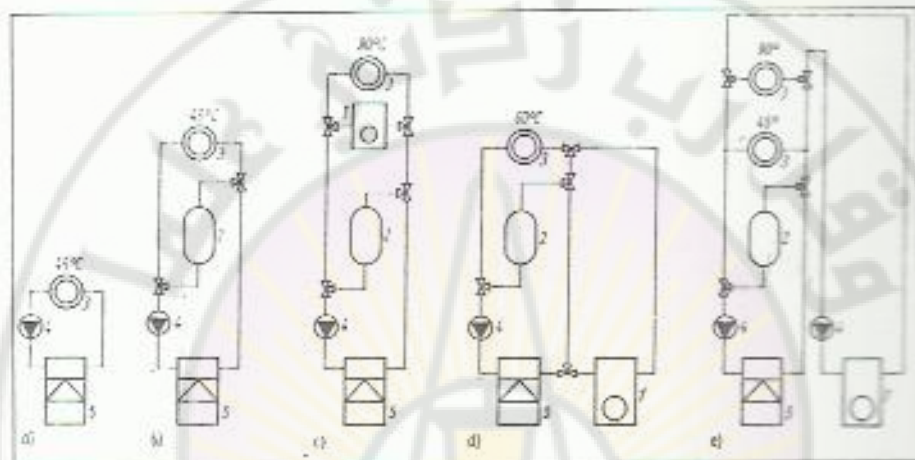
من غير الاقتصادي التدفئة بالمضخات الحرارية وتغطية الحمل الحراري اللازم في الأيام الباردة جداً بسبب ارتفاع تكاليف التشغيل والاستثمار، لذلك تستخدم المضخات الحرارية لتغطية الحمل الحراري في الأيام ذات درجة الحرارة الخارجية القريبة من الصفر، وفي الأيام الأبرد يتم تغطية جزء بالمضخة الحرارية والجزء الآخر عن طريق أنظمة التدفئة التقليدية. هذا النظام الثنائي المكافئ يعمل إما بشكل مواز (مضخة حرارية + نظام التدفئة التقليدي يعملان بنفس الوقت من أجل تغطية الحمل الحراري الكبير في الأيام الباردة) أو يعمل أحدهما (المضخة الحرارية) لتغطية الحمل الأساسي في الأيام المعتدلة (الشكل 2-24 c + d).

مثال: (الشكل 2-24 c)

يكون النظام المكافئ الثنائي مجهزاً بمضخة حرارية بضغوط مع محرك كهربائي للتشغيل مرتبط بمرجل تسخين تقليدي يعمل على الديزل أو الغاز.

تعمل المضخة الحرارية حتى درجة حرارة خارجية $5^{\circ}\text{C} +$ ، يعمل النظام بشكل كامل عند درجات حرارة تحت الصفر. الفاحية الاقتصادية لاستثمار النظام عند درجة حرارة $2^{\circ}\text{C} +$ (عمل المضخة) حيث ينتج لدينا عند هذه الحالة معامل تدفئة: $\epsilon = 3.5$ ويتم تغطية الحمل على مدار العام (67%) بواسطة المضخة الحرارية والباقي بالنظام التقليدي، هذا النظام يبين مقدار التوفير في الطاقة.

إذا استخدم نظام التدفئة (ربط عدة أجهزة تدفئة مع بعضها مثل: مرجل تقليدي + مضخة حرارية + مجمعات شمسية + خزان حراري) من أجل تغطية الحمل الحراري المطلوب.



1- مرجل 2- خزان حراري 3- مستهلك حراري 4- مضخة مياه 5- مضخة حرارية

a- مضخة حرارية (HP) أحادي التكافؤ.

b- مضخة حرارية (HP) أحادي التكافؤ مع خزان حراري.

c- مضخة حرارية (HP) ثنائي التكافؤ.

d- مضخة حرارية (HP) ثنائي التكافؤ بالموازاة مع مرجل.

e- مضخة حرارية (HP) ثنائي التكافؤ مزدوجة.

الشكل (24-2) الأنظمة الأساسية للتدفئة المضخة الحرارية



الفصل الثالث

عناصر تجهيزات المضخة الحرارية

1-3- المبادلات الحرارية:

تعتمد عمليات التدفئة والتبريد والتكييف على عمليات انتقال الحرارة ويتم فيها اكتساب كمية الحرارة أو فقدانها من وسيط إلى آخر، وهذا ما يسمى بالتبادل الحراري ولا بد من توافر حيز ووسط مناسب تنتقل عبره الحرارة من وسيط لآخر ويطلق عليه المبادل الحراري (وأحياناً يدعى سطح التبادل الحراري) من أبرز أشكال انتقال الحرارة في المبادلات الحرارية وانتقالها بالتوصيل والحمل.

الخصائص والمواصفات الفنية للمبادل الحراري:

تختلف الخصائص والمواصفات حسب التصميم والشكل والتطبيقات.

أ- مجال الاستخدام:

المجالات الحرارية المستخدمة في التكييف والتبريد والتدفئة (المضخة الحرارية) تسمى المبخرات والمكثفات. أو مشعات حرارية (التبادل الحراري ما بين وسيط التبريد ووسيط التسخين (ماء - هواء).

ب- نوعية معدن المبادل الحراري - نحاس - حديد.

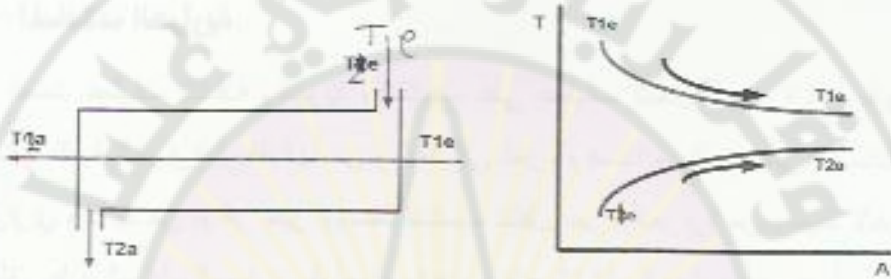
ج- معامل التوصيل الحراري للمعدن.

د- معامل الانتقال الحراري الكلي (كلا الوسيطين - ووسيط التبريد ووسيط التسخين).

1-1-3- أنواع المبادلات الحرارية:

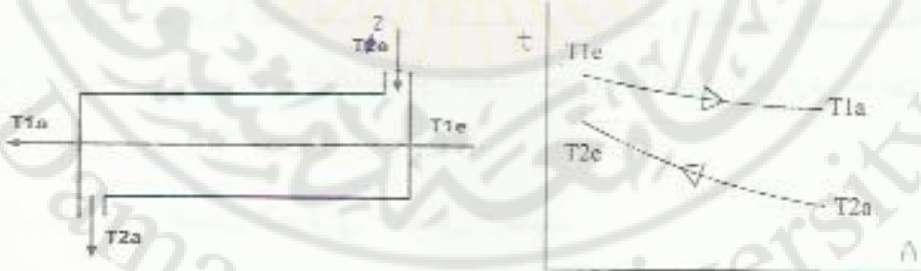
تُصنف المبادلات الحرارية وفقاً لجرّان وسيط التبريد - ووسيط التسخين.

أ- مبادل حراري وجرّان متوازي كلا الوسيطين سيتدفقان باتجاه واحد كما هو مبين في الشكل (1-3):



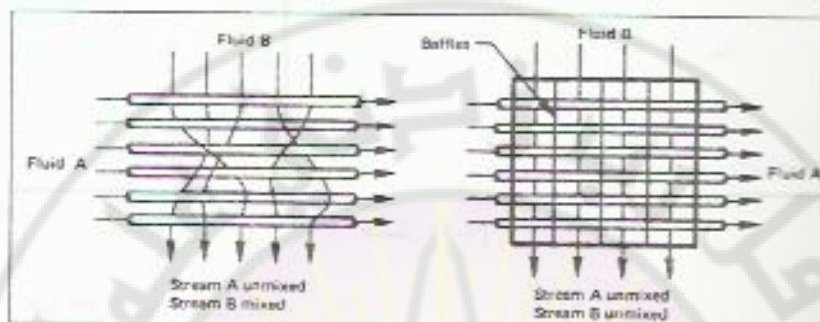
الشكل (1-3) مبادل حراري ذو جرّان متوازي

ب- مبادل حراري ذو جرّان متعاكس حيث يتدفق وسيط التبريد باتجاه يعاكس حيز الوسيط التسخين (ماء - هواء) كما هو مبين في الشكل (2-3).



الشكل (2-3) مبادل حراري ذو جرّان متعاكس

ج - مبادل حراري ذو جريان متصالب حيث وسيط التبريد بشكل متصالب مع سفق وسيط التسخين (ماء - هواء) كما هو مبين في الشكل (3-3).



الشكل (3-3) مبادل حراري ذو جريان متصالب

3-1-2- حساب فرق درجات الحرارة اللوغاريتمية الوسطية للمبادل الحراري:

ت حسب وفقاً للعلاقة التالية:

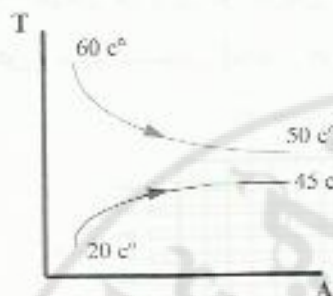
$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{\sigma} - \Delta T_{\delta}}{\ln \frac{\Delta T_{\sigma}}{\Delta T_{\delta}}} \quad (1-3)$$

حيث:

ΔT_{σ} : فرق درجات الحرارة الأكبر ما بين الوسطين.

ΔT_{δ} : فرق درجات الحرارة الأصغر ما بين الوسطين.

مثال:



الشكل (4-3)

أ- جريان متوازي:

$$\Delta T_1 = 60 - 20 = 40^\circ \text{C}$$

$$\Delta T_2 = 50 - 45 = 5^\circ \text{C}$$

$$\Delta T_m = \frac{40 - 5}{\ln \frac{40}{5}} = 16.8$$

ب- جريان متعاكس:

$$\Delta T_1 = 50 - 20 = 30$$

$$\Delta T_2 = 60 - 45 = 15$$

$$\Delta T_m = \frac{30 - 15}{\ln \frac{30}{15}} = 21.6$$

3-1-3- حساب مساحة سطح التبادل الحراري للمبادل الحراري وفقاً للاستطاعة:

حساب استطاعة المبادل الحراري:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_m = \dot{m}_h \cdot c_{ph} \cdot \Delta T_h = \dot{m}_c \cdot c_{pc} \cdot \Delta T_c \quad (2-3)$$

حيث:

$\dot{Q}$: الحمل الحراري للمبادل الحراري W .

k : معامل انتقال الحرارة الكلي $W/(m^2 \cdot K)$.

A : مساحة سطح المبادل الحراري m^2 .

$\dot{m}_h$: كمية وسيط التسخين (ماء - هواء) Kg/s .

$\dot{m}_c$: كمية وسيط التبريد Kg/s .

c_{ph} : السعة الحرارية لوسيط التسخين (ماء - هواء) $J/(Kg.K)$.

c_{pc} : السعة الحرارية لوسيط التبريد $J/(Kg.K)$.

ΔT_h : فرق درجات حرارة وسيط التسخين K .

ΔT_c : فرق درجات حرارة وسيط التبريد K .

4-1-3- المبخرات:

استطاعة المبخر Evaporator Capacity:

المبخرات هي عبارة عن مبادلات حرارية، ونميزها باستطاعتها التبريدية والتي تعبر عن معدل انتقال الحرارة من الوسيط المراد تبريده إلى مائع للتبريد. وتقدر استطاعة التبريد بالكيلووات أو طن التبريد وتحسب الاستطاعة التبريدية بالمعادلة الآتية:

$$Q_u = k * A_o * \Delta T_m$$

حيث:

A_o : مساحة السطح الخارجي للمبخر.

ΔT_m : فرق درجات الحرارة اللوغاريتمي بين مائع التبريد والوسط المراد تبريده (المنبع الحراري في المضخة الحرارية) ويعطى بالمعادلة السابقة (1-3).

حيث:

k : معامل انتقال الحرارة الإجمالي منسوباً للسطح الخارجي للمبخر ويحدد من

المعادلة التالية:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_o} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{A_o}{A_i} + \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{h_r} \quad (3-3)$$

حيث:

δ : سمك الأنبوب للمبخر.

A_i : مساحة السطح الداخلي للمبخر.

α_o : معامل انتقال الحرارة خارج الأنابيب يتوقف على قطر الأنابيب وعددها وعدد الصفوف وشكل الزعانف ويمكن تعيينه في حالة الهواء من المعادلة الآتية:

$$\alpha_o = 38.0 v^{0.5} \quad (4-3)$$

حيث:

v : هي سرعة الهواء.

α_i : معامل انتقال الحرارة داخل الأنابيب يمكن تعيينه من المعادلة الآتية:

$$\alpha_i = c * m^{0.6} \frac{W}{m^2 . c} \quad (5-3)$$

حيث:

m : معدل تدفق المائع kg/s.

c : عبارة عن ثابت يتوقف قيمته على نوع المائع.

w : معامل الاتساع داخل الأنابيب.

يعطى جدول (1-3) الخواص الحرارية لأنواع المبخرات المستخدمة:

الجدول (1-3) قيم تصميمية حرارية لأنواع المبخرات

ملاحظات	معامل الانتقال الحراري الكلي $k(w/m^2C^{\circ})$	درجة حرارة التبخير $t_o(C^{\circ})$	فرق درجات الحرارة التبخيرية $\Delta t_o(K)$	سرعة التوسط المبرد $v = m/s$	الوسط المبرد المتبع الحراري	وسيط التبريد	
							1- مبخرات جافة
	4.5 - 12	-10	8 - 20	جريان طبيعي	هواء	فريون	1- لفة أنابيب
	12 - 18	-10	5 - 14	0.5 - 4	هواء	فريون	2- أنشواح ضئيلة منها الأنابيب
	12 - 20 20 - 45	-10 -10	8 - 20 5 - 14	جريان حر 0.5 - 4	هواء	فريون	
	75 - 95 150 - 190	± 0 ± 0	7 - 10 5 - 8	ماء زائد - ساكن 0.3 - 0.5	ماء	فريون	3- أنابيب مريشة ذات زعانف
	60 - 70 115 - 140	-20 -20	7 - 10 5 - 8	ساكن 0.3 - 0.5	محلول	فريون	
نظام الأنابيب متسعة وعاء	9 - 14 4.5 - 9	-10 -20	8 - 20	جريان حر	هواء	فريون	II- مبخرات صفائحية
	18 - 40	-10	8 - 15	2 - 5	هواء	أمونيا	III- مبخرات عائمة
	14 - 35	-10	8 - 15	2 - 5	هواء	فريون	1- لفة أنابيب
							2- أنابيب مريشة

ملاحظات	معامل الانتقال الحراري الكلي $k(w, m^2 \cdot ^\circ C^{-1})$	درجة حرارة التبخير $t_g(^{\circ}C)$	فرق درجات الحرارة $\Delta t_g (K)$	سرعة الوسط المبرد $v = m/s$	الوسط المبرد المنبع الحراري	وسط التبريد
	230 - 300	-10	4 - 7	ساكن	محلول	أمونيا
	460 - 750	-10	4 - 7	0.3 - 0.5	محلول	أمونيا
	18 - 60	-10	8 - 15	2 - 10	هواء	أمونيا
	14 - 45	-10	8 - 15	2 - 10	هواء	فريون
وسيط التبريد حول الأنابيب	350 - 700	±0	4 - 7	1 - 2.5	ماء	لمونيا
	300 - 600	-10	4 - 7	1 - 2.5	محلول	
	300 - 600	±0	4 - 7	1 - 2.5	ماء	فريون
	200 - 450	-10	4 - 7	1 - 2.5	محلول	
وسيط التبريد حول الأنابيب	1000 - 1400	±0	4 - 7	1 - 2.5	ماء	أمونيا
	800 - 1100	±0	4 - 7	1 - 2.5	ماء	فريون
وسيط التبريد بالأنابيب	600 - 1100	±0	4 - 7	1 - 2.5	ماء	لمونيا
	450 - 875	±0	4 - 7	1 - 2.5	ماء	فريون

كما يمكن حساب المبخرات وفقاً للطريقة الحسابية التالية:

(1) المبخرات ذات الأنابيب (بشكل المرجل) وسيط التبريد داخل الأنابيب:

1- تحديد عدد نوسيلت:

$$N_n = \frac{\alpha_i d_i}{\lambda_s} \quad (6-3)$$

$$= 0.012 (R_c^{0.87} - 280) P_i^{0.4}$$

يؤخذ بعين الاعتبار معامل الانساخ:

$$R_i = 1.7 \times 10^{-4} \frac{m^2 K}{W}$$

أنابيب فولاذية

ماء

$$R_{icu} = \frac{1.7}{2} 10^{-4} \frac{m^2 K}{W}$$

أنابيب نحاسية

$$R_i = 1.7 \times 2$$

محلول ملحي

في حال تشكل الفقاعات (بداية التبخر) $\alpha_a = B_2 q_a^{2/3}$

لا يؤخذ معامل الانساخ.

B: ثابت تابع لوسيط التبريد:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha_a}}$$

λ : طبقة الانساخ.

$$\lambda = 0.116 \frac{W}{mK} \quad \text{طبقة الزيت}$$

$$\lambda = 0.8 - 2.3 \frac{W}{mK} \quad \text{ماء}$$

وبالتالي حساب K من أجل طول أنبوب واحد متر (الأنبوب عدة طبقات):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_1}{d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_o d_o}} \quad (7-3)$$

حساب سطح التبادل الحراري:

$$\Lambda = \frac{Q}{K * \Delta T_m}$$

حساب ΔT_m :

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_G - \Delta T_s}{\ln \frac{\Delta T_G}{\Delta T_s}}$$

ولحساب عدد نوسيلت للماء:

جريان مضطرب

$$Nu = 0.032 Re^{0.8} * Pr^n (d/L)^{0.054} \quad (8-3)$$

زيادة تسخين - تسخين $n = 0.37$

تبريد $n = 0.3$

يمرر مفعول هذه العلاقة من أجل:

$$Pr = 0.7 - 3.70$$

$$Re = 4500 - 90000 \text{ زيت}$$

$$Re = 50000 \text{ حتى للماء}$$

وحساب علاقة تقريبية من أجل أقطار أنابيب:

$$d = 10 - 100 \text{ mm}$$

وجريان مضطرب (جريان ماء).

$$\alpha \approx 3363 W^{0.85} (1 + 0.014 t) \frac{W}{m^2 K} \quad (9-3)$$

حيث:

W: سرعة الجريان m/s

t: درجة حرارة الماء °C

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu}$$

d: القطر الهيدروليكي m

ν : اللزوجة الكيميائية $\frac{m^2}{s}$

a: معامل درجة الحرارة

$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

$$\alpha = c q^n \quad (10-3)$$

c: ثابت من جدول (2-3) للأنايب الأفقية.

جدول (2-3) قيم C و m

	C	m
NI ₃	2.59	0.12
R11	1.2	0.17
R12	1.37	0.19
R22	1.65	0.16
R114	1.12	0.22

$$n = 0.5 - 0.8$$

ومن أجل درجات حرارة منخفضة (-40 - 80 °C)

$$\alpha = c \dot{q}^n P^m$$

$$\alpha = c \dot{q}^n P^m \cdot R \quad (11-3)$$

m ثابت من جدول (2-3).

R: خشونة $R \approx 0.1 - 10 \mu m$

$$\dot{q} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$\alpha \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

(2) حزمة الأنابيب (مبخرات - ستل):

أ - حالة الحمل الحر - تبخر ووسيط التبريد داخل الأنابيب:

$$\alpha_i = \frac{K \cdot \dot{m}_0^{1.4}}{d_i^{0.5}} \quad (12-3)$$

ب - حالة تشكل الفقاعات:

$$\alpha_i = \frac{B \cdot \dot{m}^{0.1} \cdot q^{0.7}}{a^{0.7} \cdot d_i^{0.5}} \quad (13-3)$$

K, B: معاملات تؤخذ قيمتهما من المخطط (5-3).

$$\dot{m}_0 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$$

$$d \text{ (m)}$$

$$a = \frac{A_2}{A_1}$$

$$\frac{A_2}{A_1} = 2.5 - 4$$

$$N_u = \frac{\alpha_2 d_2}{\lambda_{\text{ك}}} = 0.25 R_p^{0.6} \cdot P_r^{0.35} \left(\frac{\eta_d}{\eta_w} \right)^{0.14} \quad (14-3)$$

الأنابيب المبردة داخلياً:

$$\alpha_i = B \cdot \frac{\dot{m} K^{0.1} q^{0.7} \cdot F_R C_x}{d_{\text{ع}}^{0.3}} \quad (15-3)$$

$$d_{\text{ع}} = \frac{4 S_R}{U_R} \quad \text{القطر المكافئ}$$

S_R : مقطع التدفق للأنبوب المبرّد داخلياً.

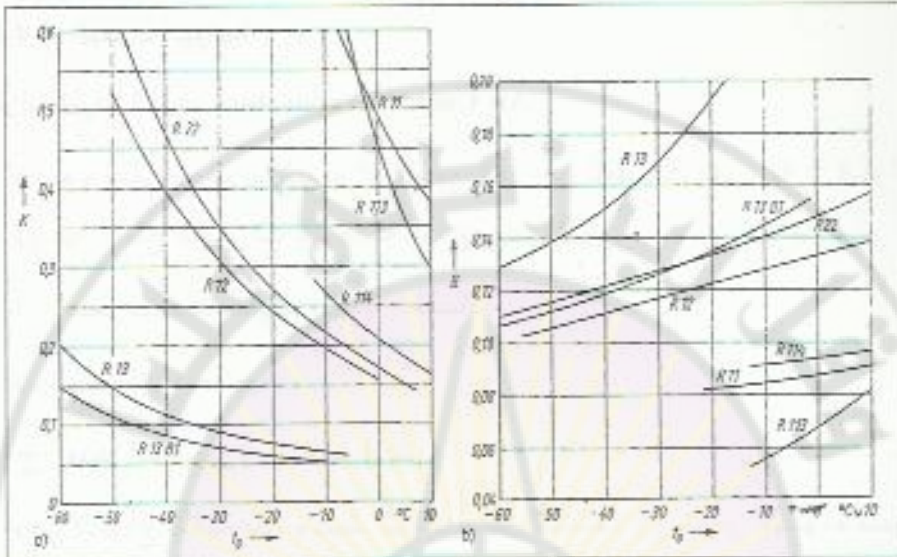
U_R : محيط بروفييل الريش.

F_R : معامل تصحيح للتريش.

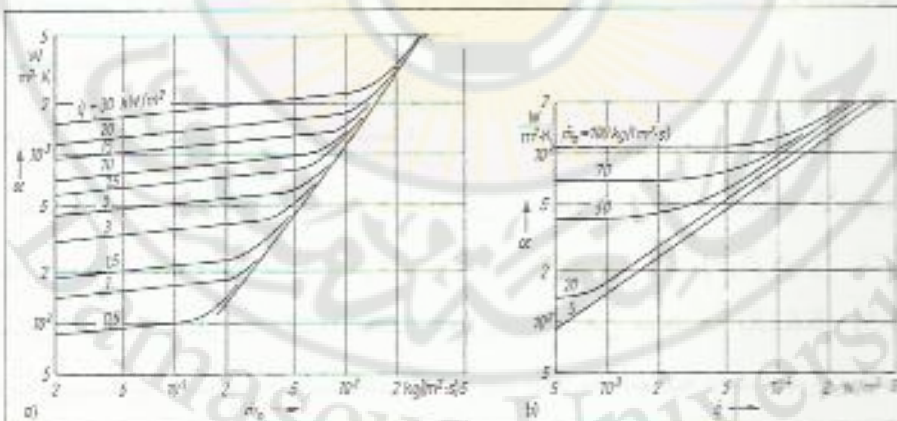
C_x : معامل يأخذ بعين الاعتبار تراكمات التبخر:

$$C_x = 0.909 (1 - x)^{0.1} \quad (16-3)$$

والمخطط في الشكل (a-5-3) يعطي قيم α كتابع لـ $\dot{q}$ و m لوسيط التبريد R12.

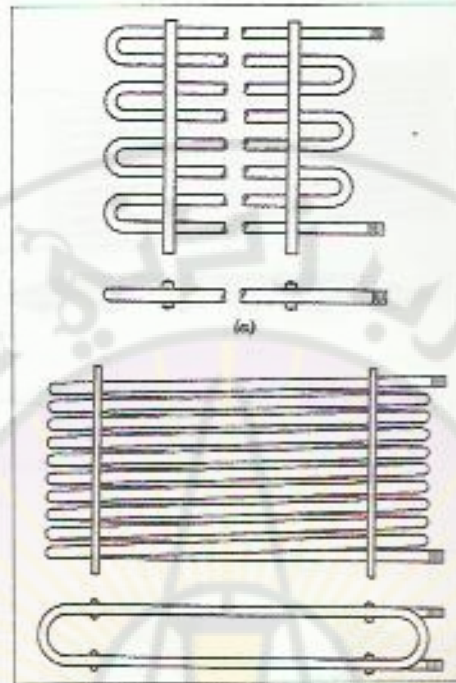


الشكل (5-3) قيم K و B لحساب α والتبخير داخل الأنابيب
a- حالة الحمل الحر - تبخر b- حالة تشكل الفقاعات



الشكل (a-5-3) قيم α لحالة التبخر داخل الأنابيب

لـ R12 عند $t_0 = -20^\circ\text{C}$, $d_i = 13.5\text{mm}$ وفقاً لـ Chawla



شكل (6-3) مبخرات ذات أنابيب عارية - ملساء

ب- مبخرات أسطح لوحية:

هناك أنواع متعددة لمبخرات الأسطح اللوحية، كما هو موضح في الأشكال من (7-3) إلى (10-3)، والمبخر السطحي يصنع من لوحين معدنيين لتوفير مسار لمائع التبريد بين اللوحين. يستخدم هذا النوع من المبخرات في الأشكال (8-3) إلى (10-3) مع ثلاجات المنزلية لسهولة تشكيله وتنظيفه، وهناك نوع آخر عبارة عن أنبوبة ملتوية بين لوحين من المعدن وملحومة لتوفير تلامس جيد بين الأنبوبة واللوحين. يستخدم هذا النوع (ب) مع ثلاجات الشاحنات ومع غرف حفظ المجمدات. وتستخدم المبخرات ذات الأسطح اللوحية رفوفاً في غرف التجمد، دوليب عرض المجمدات وفواصل لوحدات الديب فريزر. هذه المبخرات نادرة ما تستخدم في المضخات الحرارية.



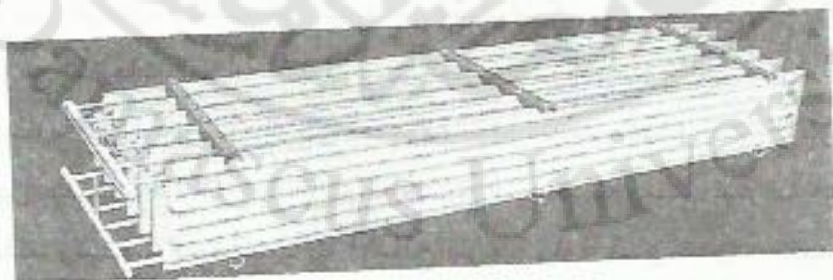
شكل (7-3) مبخر صفائحي على شكل لوح

الشركة المصنعة: Tranter Manufacturing Inc



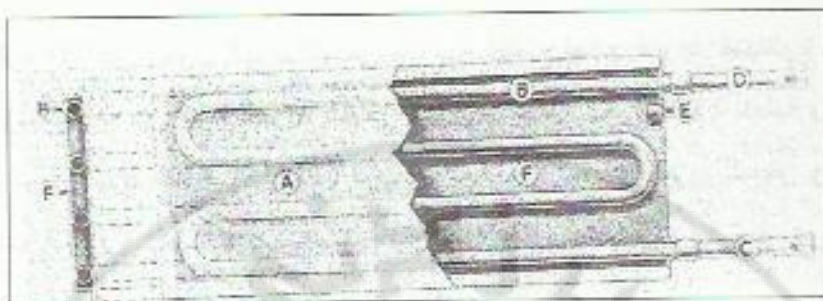
شكل (8-3) أنواع مختلفة من المبخرات الصفائحية ذات أسطح لوحية

الشركة المصنعة: Tranter Manufacturing Inc



شكل (9-3) حزمة من الملفات الصفائحية التي يمكن توصيلها على التوالي أو التوازي

الشركة المصنعة: Tranter Manufacturing Inc



شكل (10-3) مبخر ذو سطح لوحي

الشركة المصنعة: Dole Refrigeration Inc

ج- المبخرات ذات الزعانف الريش:

المبخرات ذات الزعانف عبارة عن أنابيب، تشكل الأسطح الأساسية لانتقال الحرارة، مجهزة بزعانف تعرف بالأسطح الثانوية لانتقال الحرارة وتعمل على زيادة مساحة السطح الخارجي المعرض للهواء وبالتالي خفض مقاومته الحرارية. والتلامس الجيد بين الأنابيب والزعانف مطلوب لضمان حسن أداء المبخرات. تتراوح المسافة بين الزعانف 2 و 25 مم، أي حوالي زعنفة واحدة أو أربع عشرة زعنفة لكل بوصة طويلة.

والمبخرات التي تعمل عند درجات حرارة سالبة يتكون على أسطحها صقيع، يعمل على خفض المساحة الحرة وزيادة القدرة اللازمة للضاغط، لذا في حالة تكون الصقيع على زعانف المبخر يجب استخدام أقل عدد من الزعانف حوالي زعنفتين أو ثلاثة لكل بوصة طويلة، والمبخرات ذات الزعانف شائعة الاستخدام لأنها تشغل حيزاً صغيراً بالمقارنة بالأنواع الأخرى.

اختيار مبخرات تبريد الهواء:

العوامل المؤثرة على اختيار المبخرات هي: الحيز المتاح، التكلفة الابتدائية (ثمن الجهاز)، كفاءة النظام، اقتصاديات التشغيل (تكلفة التشغيل)، فرق درجات

الحرارة TD بين دخول الهواء للمبخر ودرجة التبريد المناظرة لضغط المبخر. العلاقة بين سعة التبريد للمبخر وفرق درجات الحرارة TD خطية وبالتالي لنفس سعة التبريد المناظرة لضغط المبخر. العلاقة بين سعة التبريد للمبخر وفرق درجات الحرارة TD خطية وبالتالي لنفس سعة التبريد عند زيادة فرق درجات الحرارة TD يلزم خفض مساحة سطح المبخر.

يتأثر حفظ المواد الغذائية بدرجة الحرارة والرطوبة النسبية للهواء. عند خفض الرطوبة النسبية يزداد جفاف المواد الغذائية (الخضراوات والفواكه) وعند زيادة الرطوبة النسبية يزداد نمو البكتريا والفطريات على المواد الغذائية. يلاحظ أن أهم عامل مؤثر على الرطوبة النسبية هو فرق درجات الحرارة TD ونوعية المبخر. ويعطي جدول (3-3) العلاقة بين فرق درجات الحرارة TD والرطوبة النسبية. وسريان الهواء داخل الغرف مهم جداً يعمل على نقل الحرارة من المواد الغذائية إلى المبخر. الجريان البطيء لا يوفر التبريد اللازم للمواد الغذائية، بينما الجريان السريع يسبب جفاف المواد الغذائية. يلاحظ أن تأثير جريان الهواء مماثل لتأثير الرطوبة النسبية.

جدول (3-3) فرق درجات الحرارة للمبخرات

الرطوبة النسبية %	Δt فرق درجات الحرارة	
	جريان جيري	جريان حر
95-91	8-7	5-4
90-86	9-8	7-5
86-81	10-9	8-7
80-76	11-10	9-8
75-70	12-11	10-9

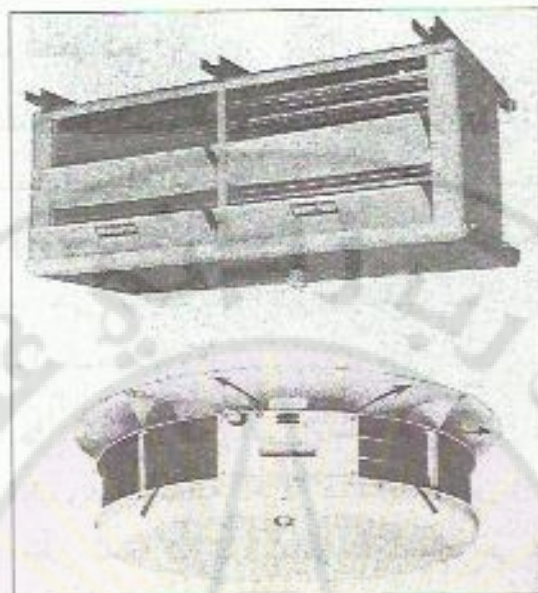
3-1-4-1-1- مبخرات الحمل الحر:

تستخدم مبخرات الحمل الحر، الموضحة بالأشكال من (3-7) إلى (3-10) في الاستخدامات التي تتطلب سرعة هواء بسيطة ومعدل تجفيف صغير للمواد الغذائية مثل الثلجات المنزلية، خزن العرض وغرف حفظ المجمدات. يعتمد جريان الهواء لمبخرات الحمل الحر على اختلاف كثافة الهواء الناشئ عن اختلاف درجات الحرارة للمبخر والهواء المحيط به.

يمكن تركيب مبخرات الحمل الحر على الأسقف أو الجدران لو كان ارتفاع الغرفة لا يسمح بتركيب وحدات سقفية. لغرفة عرضها أقل من 2.5 متر عادة يركب مبخرين أو أكثر. وتعطى السعة التبريدية لمبخرات الحمل الحر عادة لوحدة الطول للأنايبب العارية أو ذات الزعانف ولوحدة المساحة لمبخرات الأسطح.

3-1-4-1-2- مبخرات الحمل القسري:

مبخر الحمل القسري، المبين بالشكل (3-11)، يوحد التبريد أو ملف تبريد-مروحة. ومبخر الحمل القسري عبارة عن ملف من أنابيب عارية أو ذات زعانف متواجد داخل حيز معدني مجهز بمروحة أو أكثر لجريان الهواء. تركيب وحدة التبريد عند السقف أو الحائط. يحدد سعة المبخر القسري معدل سريان الهواء، معامل الحرارة المحسوسة وفرق درجات الحرارة خلال المبخر. وسرعة الهواء أقل من 1.5 m/s لمنع تجفيف المواد الغذائية ولخفض مستوى الصوت. في حالتها محطات التبريد، في حال إهمال تجفيف المواد الغذائية تتراوح سرعة الهواء بين 1.5 m/s إلى 3.5 m/s . في أنفاق التجميد يتم دفع الهواء خلال المواد الغذائية بسرعة تصل إلى 10 m/s .



شكل (11-3) مبخرات الحمل القسري (وحدات ملف - مروحة)

الشركة المصنعة: Dunham-Bush Inc.

3-1-4-2- مبخرات تبريد السائل Chillers:

تستخدم مبخرات تبريد السوائل لتبريد المياه، المحاليل الملحية، الألبان، وغيرها. هناك العديد من مبخرات السوائل أهمها:

3-1-4-2-1- مبرد ذو أنبوبين:

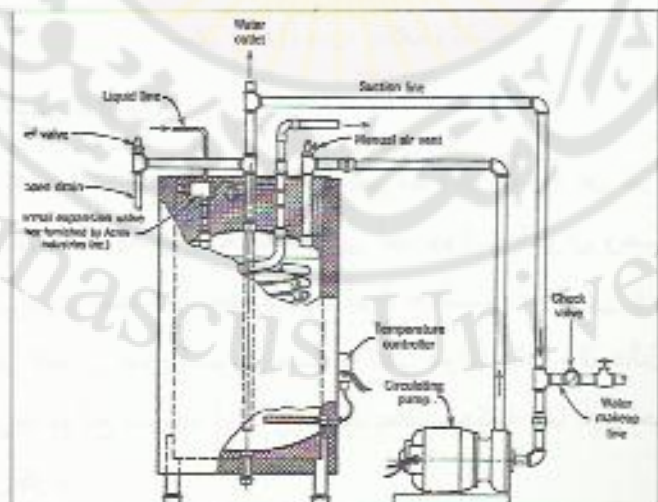
يوضح شكل (12-3) المبرد ذو الأنبوبتين، يتكون المبرد من أنابيب مستقيمة يربطها مجمعات، يمكن أن يكون المبرد من النوع الجاف أو النوع المغمور. يحتاج المبرد ذو الأنبوبتين إلى حيز كبير ونظراً لتكلفته العالية يستخدم هذا المبرد في مجالات خاصة مثل تبريد الزيوت. وفي هذا المبرد يسري السائل داخل الأنبوبة الداخلية، بينما يسري مائع التبريد خلال الحيز بين الأنبوبتين وفي عكس الاتجاه. كما يستخدم في المضخات الحرارية (المنبع الحراري) ماء حيث يتبخر ماء المنبع (بحيرة) أو يمرر الماء عبر أنابيب.



شكل (12-3) مبرد ذو أنبوبتين

3-2-4-1-3- مبخّر غلاف وملف:

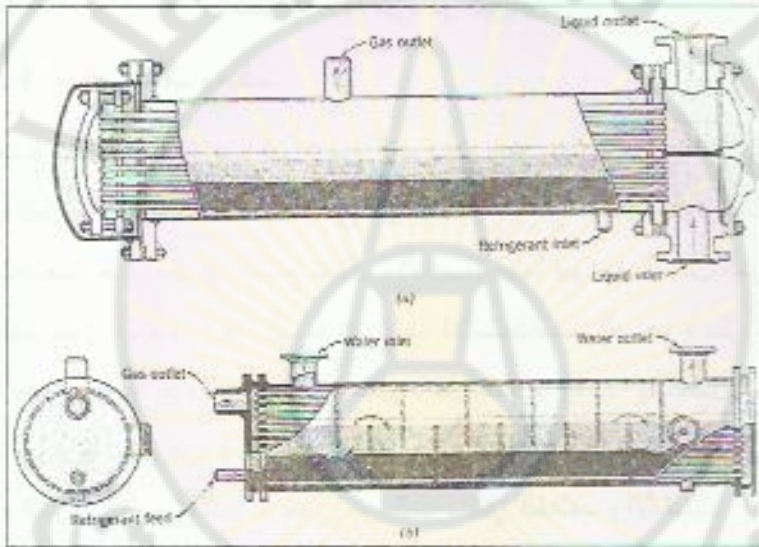
يوضح شكل (13-3) هذا النوع من المبرّدات وهو عبارة عن ملف حلزوني من الأنابيب العارية داخل غلاف اسطواني من الصلب. و... يعمل مبرد غلاف وملف مع وسيلة تمدد حر. يجري المائع خلال الأنابيب، بينما يتواجد السائل المراد تبريده في الغلاف حول الملف. وهذا المبخّر مناسب للاستخدامات الصغيرة مثل تبريد مياه الشرب. ومن عيوبه تلفه عند تجمّد السائل داخل المبرد ولذا يفضل استخدامه لدرجات حرارة أعلى من 4 م°. وفي المضخّات الحرارية - المنع الحراري مياه المبخّر والمبرد غلاف وملف أرخص من المبرد ذي الغلاف والأنابيب.



الشكل (13-3) مبرد غلاف وملف

3-1-4-2-4- مبخّر غلاف وأنابيب:

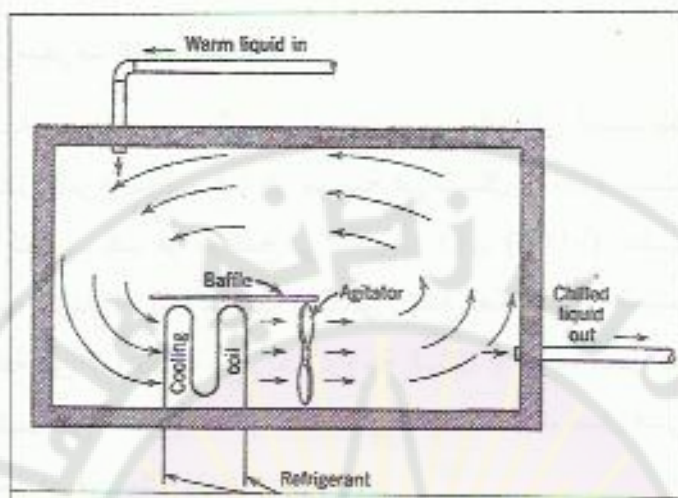
يتكون مبخّر غلاف وأنابيب، كما هو موضح في شكل (3-14)، من مجموعة من الأنابيب المستقيمة داخل إطار اسطواني من الصلب. يوجد لوحان عند نهايتي الإطار وحواجز داخل الغلاف تعمل على حمل الأنابيب وحفظ المسافات بينها. هذا النوع يستخدم في المضخات الحرارية.



شكل (3-14) مبرد غلاف وأنابيب

3-1-4-2-5- مبخّر الخزان:

يوضح شكل (3-15) هذا النوع من المبخّرات وهو عبارة عن خزان داخلة ملف مغمر ذو أنابيب عارية. يوضح الملف بين أحد جوانب الخزان وحاجز لتوجيه حركة السائل حول الملف بواسطة قلاب. تتراوح السرعة بين $0.5 - 0.7 \text{ m/s}$. يستخدم مبخّر الخزان لتبريد سوائل محتوية على مواد عالقة والمحاليل الملحية التي تعمل باعتبارها موائع ثانوية، أو التي تحيط بعلب محكمة كما هو الحال في صناعة التلج والأيس كريم.



شكل (3-15) مبرد الخزّان

للغلاف مجمعان أحدهما ثابت والآخر متحرك (أ) أو ثابت (ب) ليأخذ في الاعتبار تمدد الأنابيب. في مبرّدات التمدد الجافة يجري مائع التبريد خلال الأنابيب والسائل المراد تبريده خلال الغلاف (ب). في المبرّدات المغمورة يسري السائل داخل الأنابيب، بينما يتواجد مائع التبريد في الغلاف (أ). يحافظ على مستوى سائل التبريد صمام عوامة.

يصنع الغلاف من الصلب، تصنع أنابيب المياه والفريون من النحاس، أنابيب الأمونيا من الصلب وأنابيب المحاليل الملحية من سبيكة من النحاس والنيكل. مبرّدات غلاف وأنابيب كفاءتها عالية، تحتاج إلى حيز بسيط ومناسبة لكل الاستخدامات لذا فهي واسعة الانتشار لتبريد السوائل وفي المضخات الحرارية المنبع الحراري سائل.

تستخدم مبرّدات التمدد الحر لاستطاعات 7-90 Kw تبريد صغيرة ومتوسطة تتراوح من 2 و 25 طن تبريد كقاعدة عامة، بينما تستخدم المبرّدات المغمورة لاستطاعات 35-10000 Kw متوسطة وكبيرة تتراوح بين 10 وآلاف الأطنان من التبريد.

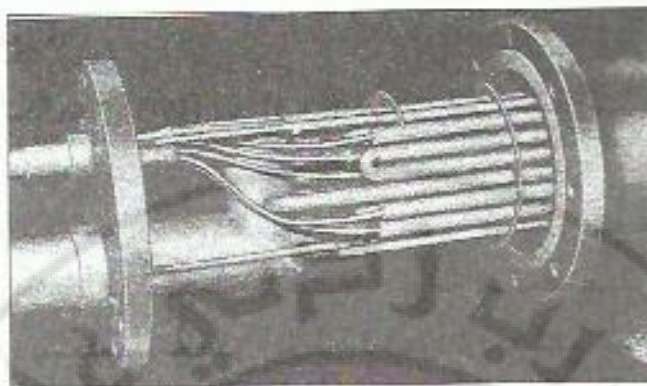
جميع هذه المبرّدات تستخدم في المضخات الحرارية ماء - ماء.

3-1-4-2-6- مبخرات التمدد الجافة:

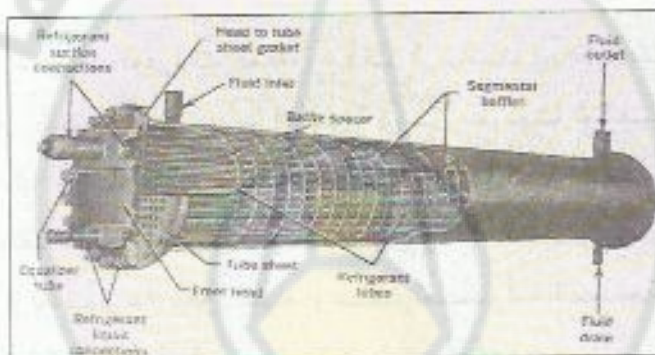
يتم تغذية مائع التبريد خلال صمام تمدد ثرموستاتي إلى أنابيب يحيطها من الخارج السائل المراد تبريده كما هو موضح في شكل (3-16)، يشتمل الإطار الأسطواني للمبرد، كما هو موضح في شكل (3-17)، (3-18-أ)، على موجّهات تسمح بتوجيه جريان، زيادة سرعته وبالتالي زيادة معامل انتقال الحرارة. يجب زيادة المسافة بين الموجّهات مع زيادة لزوجة السائل أو زيادة معدل سريانه. ويتم ترتيب الأنابيب في مسار واحد أو عدة مسارات باستخدام فواصل في المجمعين الجانبيين كما هو في شكل (3-18-ب).

تعمل زيادة عدد المسارات على زيادة كل من معامل انتقال الحرارة وانخفاض الضغط خلال الأنابيب، يتوقف عدد المسارات على استطاعة المبخر والعلاقة بين معدل التدفق وفرق درجات الحرارة. وقد يستخدم مبخر التمدد الجاف أنابيب على شكل حرف U مثبتة في جانب واحد وذلك للسماح بتمدّد الجاف أنابيب على تغيير درجة حرارة السائل. يمتاز مبخر مياه التمدد الحر عن المبخر المغمور بصغر شحنة مائع التبريد اللازمة وضمان رجوع الزيت إلى الضاغط وقلة احتمال تلف المبرد نتيجة تجمد السائل المبرد. ويستخدم مبخر التمدد الجاف لتبريد المحلول الملحي لدرجات حرارة منخفضة، لتبريد مياه التكيف مع الضواغط الترددية أو الحلزونية.

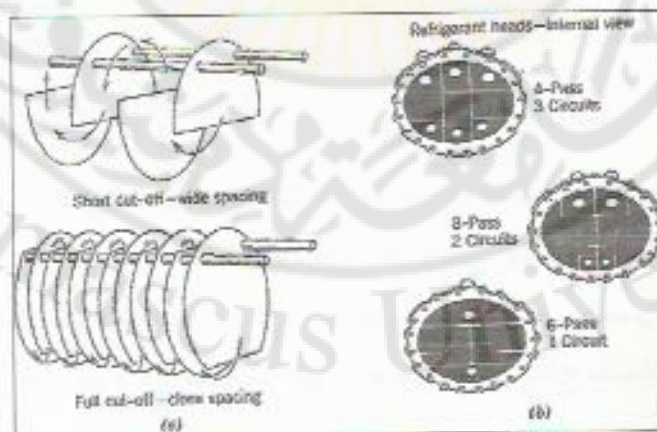
تستخدم معظم منتجات المياه مبخرات التمدد الجاف لأنها الأرخص ولا تسبب مشاكل لعودة الزيت إلى الضاغط. وتعرف وحدة الضاغط ومبرد السائل بمبرد السائل القائم بذاته وهي عادة مركبة على قاعدة معدنية.



شكل (16-3) مبخر متعدد جاف



شكل (17-3) مبخر متعدد جاف



شكل (18-3) مجمعات المبخر

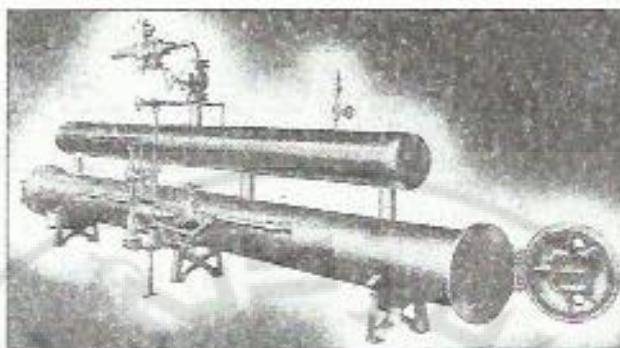
المبخرات المغمورة:

توضح الأشكال من (3-19) إلى (3-21) هذا النوع من المبخرات حيث يجري السائل المراد تبريده داخل الأنابيب بينما يتواجد سائل مائع التبريد خارج الأنابيب. يتواجد فوق الأنابيب حيز يسمح بتجميع البخار ومجهز بفواصل تمنع تسرب السائل مع البخار. يتم التحكم في مائع التبريد بواسطة عوامة ضغط عالي أو ضغط منخفض. وعادة يستخدم مجمع بطول الإطار لضمان توزيع مائع التبريد على كل الأنابيب. ويلزم استخدام خزان مع المبخر المغمور وذلك لفصل البخار عن السائل. وتجهز بعض المبخرات المغمورة بمضخة ونظام رش يسمح ببث كل أسطح الأنابيب، ومن مميزات المبردات المغمورة ذات الرشاشات زيادة معامل انتقال الحرارة وصغر شحنة وسيط التبريد المطلوبة ومن عيوبها التكلفة الإنتاجية (الابتدائية) العالية والحاجة إلى مضخة للسريان. وأحياناً تجهز أنابيب المبخرات المغمورة بزعانف داخلية وخارجية. وتصنع المبردات المغمورة الأفقية من عدة مسارات لزيادة سرعة تدفق المياه. وعدد المسارات الشائعة الاستخدام هي 2، 4، 6. كما تستخدم هذه المبخرات بشكل شائع أيضاً في المضخات الحرارية (ماء - ماء) (هواء - ماء).

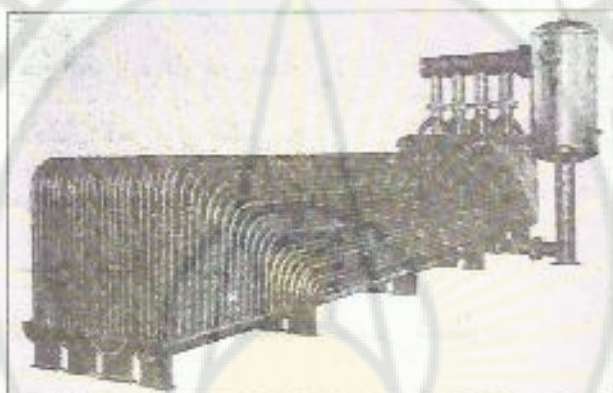
موانع التبريد الثانوية:

المحاليل مانعة للتجمد:

تعرف المواد التي تعمل على خفض درجة حرارة التجمد للمياه بالمواد المانعة للتجمد. من أشهر هذه المواد الأثيلين جليكول، البروبيلين جليكول والجليسرين. ومن أهم مميزات هذه المواد مقاومة الصدأ وعدم التبخر عند درجات الحرارة العادية ولذلك تستخدم هذه المواد في مجالات التبريد خاصة أماكن إنتاج منتجات الألبان.



شكل (3-19) مبخر مغمور



شكل (3-20) مبخر مغمور



شكل (3-21) مبخر مغمور

اختيار مبررات السوائل:

يتم اختيار مبررات تبريد السوائل تبعاً للطريقة التي يحددها المنتج. عادة يعطي المنتجون المعدلات لمبررات سوائل قائمة بذاتها Self-Contained مشتملة على الضاغط، المبرد والمكثف، يفضل عادة استخدام الوحدات القائمة بذاتها لخصها وسهولة تجميعها. ويتم الاختيار وفقاً للخطوات التالية:

1- تحديد درجات حرارة دخول وخروج كل من وسيط التبريد والسائل المبرد (المقبع الحراري).

2- تحديد فرق درجة الحرارة اللوغاريتمية ΔT_m .

3- تحديد معامل الانتقال الحراري الكلي K .

يتم حسابه وفقاً للمراجع أو من الجدول (1-3).

4- تحديد حساب سطح التبادل الحراري A للمبخر.

5- الرجوع إلى كاتالوجات الشركات الصانعة للمبخر المطلوب.

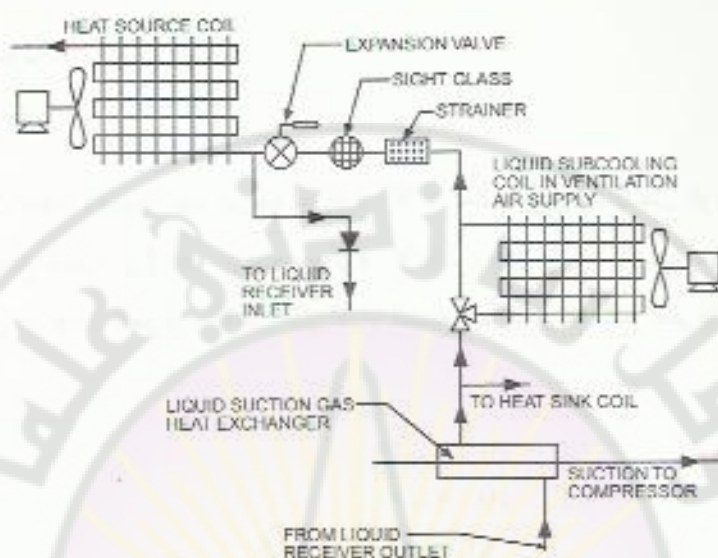
3-1-4-2-7 إزالة الجليد عن المشاع ذات المصدر الهوائي:

يتجمع الجليد بشكل كثيف نوعاً ما على مشاع الوحدات الخارجية ذات المصدر الهوائي عندما تكون درجة حرارة الهواء الخارجي أقل من 5 درجات مئوية تقريباً وتنخفض إلى حد ما مع انخفاض درجة الحرارة الخارجية ومحتوى الرطوبة.

معظم الأنظمة يتم إزالة الجليد فيها بواسطة عكس الدارة.

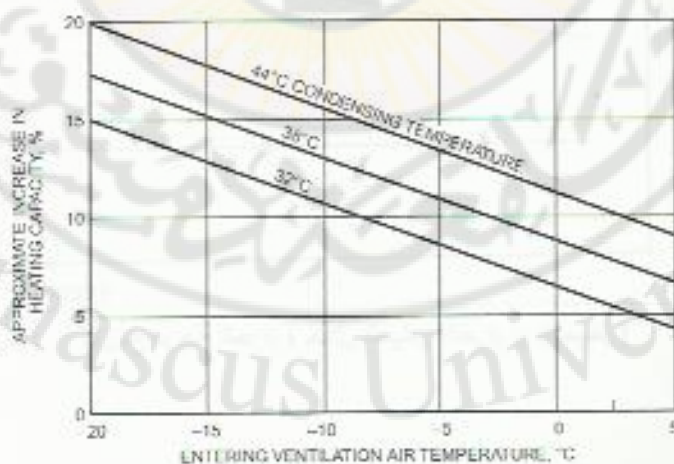
وهناك طريقة أخرى لإزالة الجليد وهي بخ ماء ساخن على الوحدة الخارجية. يمكن للماء أن يسخن بواسطة وسيط التبريد أو مصادر أخرى.

ومشاع زيادة التبريد: يمكن أن تضاف وشيعة زيادة التبريد للمضخة الحرارية (الشكل 3-22) لتسخين هواء التهوية تسخيناً أولياً خلال التدفئة وبفس الوقت لتخفيض درجة حرارة وسيط التبريد السائل.



الشكل (22-3) وسائل زيادة التبريد

بالاعتماد على معدل دورة وسيط التبريد وكمية حرارة هواء التهوية ودرجته يمكن أن تزداد الاستطاعة التبريدية حتى حدود 15 إلى 20 بالمائة كما هو موضح إليه في الشكل (23-3).



Typical Increase in Heating Capacity Resulting from Using Liquid Subcooling Coil

الشكل (23-3)

أمثلة محلولة:

مثال 1-3:

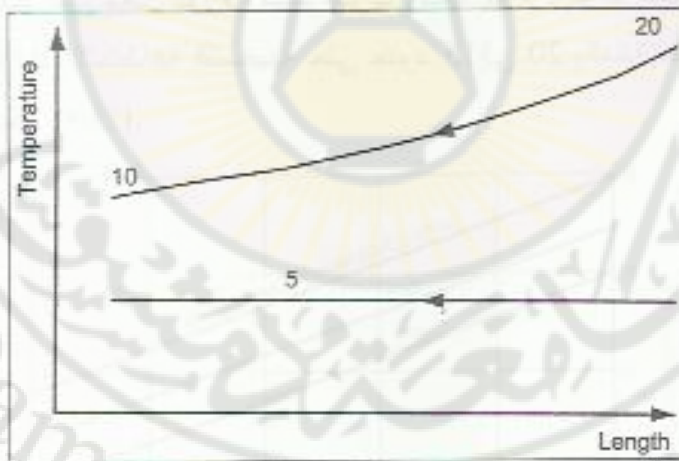
يعمل ملف مغمور عند درجة حرارة 5°C لمائع التبريد. يدخل الوسيط المبخر (مياه المنبع الحراري) عند درجة حرارة 20°C ويخرج عند درجة حرارة 10°C . عين فرق درجات الحرارة الفعال بين مياه المنبع الحراري ومائع التبريد.

الحل:

$$\Delta T_1 = 20 - 5 = 15$$

$$\Delta T_2 = 10 - 5 = 5$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{15 - 5}{\ln \frac{15}{5}} = 9.10$$



توزيع درجة الحرارة خلال المبادل الحراري (المبخر)

مثال 2-3:

ملف تبريد مياه درجة حرارة دخول المياه 4°C ودرجة حرارة خروج المياه 10°C يستخدم لتبريد هواء من درجة حرارة 34°C إلى درجة حرارة 15°C عين فرق درجات الحرارة اللوغاريتمي بين المائع المبرد ومائع التبريد لترتيب الجريان المتعاكس و المتوازي.

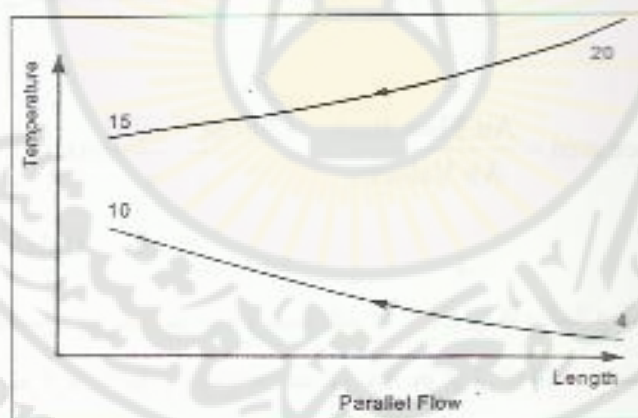
الحل:

أ- الجريان المتوازي:

$$\Delta T_1 = 34 - 4 = 28$$

$$\Delta T_2 = 15 - 10 = 5$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{28 - 5}{\ln \frac{28}{5}} = 13.35$$

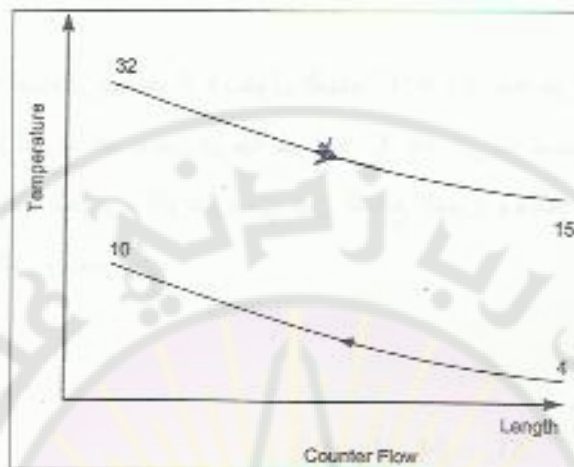


ب- الجريان المتعاكس:

$$\Delta T_1 = 32 - 10 = 22$$

$$\Delta T_2 = 15 - 4 = 11$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{22 - 11}{\ln \frac{22}{11}} = 15.87$$



مثال 3-3:

عين مساحة وجه الملف المطلوبة للحفاظ على سرعة وجهه 2 m/s . إذا كان معدل الجريان للهواء خلال الملف $1200 \text{ m}^3/\text{s}$.

الحل:

$$\text{Face area} = \frac{\text{Air Flow Rate}}{\text{Air Velocity}} = \frac{1200 \text{ m}^3/\text{s}}{2 \text{ m/s}} = 600 \text{ m}^2$$

تمارين غير محلولة:

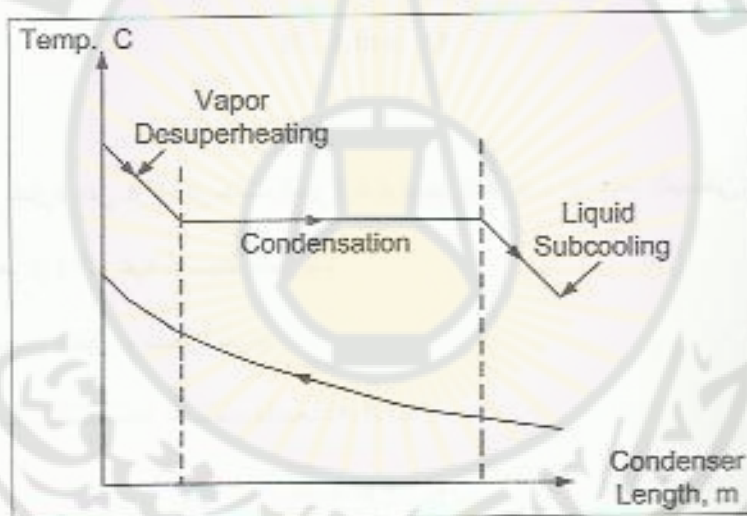
1-3: ملف مغمور بدرجة حرارة وسيط التبريد 6°C يدخل المائع المراد تبريده عند درجة حرارة 32°C ويخرج عند درجة حرارة 24°C . احسب فرق درجات الحرارة الفعال MFTD بين وسيط التبريد والمائع المراد تبريده.

2-3: ماء بارد يدخل ملف تبريد عن درجة 6°C ويخرج عند درجة حرارة 11°C . احسب فرق درجات الحرارة اللوغاريتمي ΔT_m بين وسيط التبريد والمائع المراد تبريده، درجة حرارة التكاثف 60°C .

3-1-5- المكثفات:

أداء المكثفات:

يتم طرد الحرارة من وحدات التبريد وتكييف الهواء في مكثفاتهما. والمكثف هو مبادل حراري فيه تنتقل الحرارة من وسيط التبريد الأعلى في درجة حرارته إلى المائع المحيط بوحدة التبريد والمتوفر بكثرة كالهواء أو الماء. في المضخات الحرارية المكثف هو عنصر جهاز التدفئة والتسخين للحيز المراد تسخينه. ويتم خلال المكثف إزالة التجميد للبخار وتكثيفه ثم التبريد الدوني (زيادة التبريد) للسائل قبل إعادة استخدامه ويوضح ذلك في الشكل (3-24).



شكل (3-24) أداء المكثفات

ويمكن تصنيف المكثفات تبعاً لوسيط التكثيف إلى أنواع ثلاثة:

- 1- المكثفات المبردة بالهواء.
- 2- المكثفات المبردة بالماء.
- 3- المكثفات المبردة بالهواء والماء (بالتبخير).

وفي النوع الأخير يتم تبريد المكثف بواسطة الماء المتبخر في جريان من الهواء، وهذه المكثفات لا تستخدم أبداً في المضخات الحرارية ويستخدم مع المكثفات المبردة بالماء أبراج التبريد.

استطاعة المكثف Condenser Capacity:

هي الحرارة المطرودة من خلال سطح المكثف وتعطى استطاعة المكثف بالمعادلة الأساسية الآتية:

وهي الاستطاعة التي توصف بها المضخة الحرارية.

$$Q_c = \dot{m} \cdot C \cdot \Delta t$$

حيث:

Δt : عبارة عن فرق درجات الحرارة لوسيط التبريد والوسيط المسخن.

c : الحرارة النوعية لوسيط التبريد.

m : معدل تدفق لوسيط التبريد.

ويمكن حساب استطاعة المكثف بالمعادلة الآتية:

$$Q_c = k A_i \Delta t$$

حيث:

A_i : مساحة السطح الداخلي للمكثف.

k : معامل انتقال الحرارة الإجمالي للمكثف منسوباً للسطح الداخلي ويحدد من

المعادلة التالية:

$$\frac{1}{k A_i} = \frac{1}{\alpha_o} + \frac{\delta}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_i}$$

حيث:

δ : سمك الأنبوب للمكثف.

α_0 : معامل انتقال الحرارة على السطح الخارجي للأنابيب.

α_i : معامل انتقال الحرارة على السطح الداخلي للأنابيب.

λ : معامل التوصيل الحراري لمادة الأنبوب.

منسوب للسطح الداخلي:

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_i}{2\lambda_1} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_i}{2\lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_i} + \frac{1}{\alpha_o}$$

منسوب للسطح الخارجي:

$$\frac{1}{K_o} = \frac{d_o}{\alpha_o} + \frac{d_o}{2\lambda_1} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_o} + \frac{1}{\alpha_i}$$

منسوب للسطح الخارجي للريش:

$$\frac{1}{K} = \frac{A}{\alpha_i A_i} + \frac{A}{2\pi \ell \lambda} \ln \frac{d_o}{A_i} + \frac{1}{\alpha}$$

ΔT_m : فرق درجات الحرارة اللوغاريتمي بين مائع التبريد ووسط التكثيف (وسيط التسخين).

ونظراً لأن وسيط التبريد يمر بثلاث مراحل وهي إزالة التجميد والتكثيف وزيادة التبريد، ونظراً لأن معظم الحرارة المطرودة تكون في مرحلة التكثيف فمن الأرجح استخدام درجة حرارة التكثيف لحساب فرق درجات الحرارة اللوغاريتمي.

$$\Delta T_m = \frac{(t_c - t_i) - (t_c - t_o)}{\ln \frac{(t_c - t_i)}{(t_c - t_o)}}$$

حيث:

t_c : درجة حرارة تكثيف بخار مائع التبريد.

t_i : درجة حرارة دخول وسيط التسخين (ماء).

t_o : درجة حرارة خروج وسيط التسخين.

تدفق درجة حرارة وسيط التكثيف وارتفاعها:

من معادلة استطاعة المكثف السابقة يمكن كتابة معادلتى كمية وسيط التبريد وكذلك ارتفاع درجة حرارة وسيط التبريد على النحو التالى:

$$m = \frac{Q_c}{c \Delta T}$$

$$\Delta T = \frac{Q_c}{m \cdot c}$$

كما سبق فإن وسيط التبريد للمكثف (أي الوسيط الناقل للحرارة المستفاد منها) إما أن يكون هواء أو ماء وبالتعويض الحرارة النوعية c لكل من الهواء والماء والموضحة بالجدول التالى:

وسيط التبريد	الوحدات البريطانية Btu/lb °F	الوحدات الدولية KJ/kg°c
الهواء	0.24	1.005
الماء	1.0	4.2

وإذا عوضنا عن الحرارة النوعية بالوحدات البريطانية على سبيل المثال تصبح كمية الماء و الارتفاع فى درجة حرارته كالتالى:

$$m = \frac{Q_c}{\Delta T}$$

$$\Delta T = \frac{Q_c}{m}$$

تصبح كمية الهواء و الارتفاع في درجة حرارته كالتالي:

$$m = \frac{Q_c}{0.24 \cdot \Delta T}$$

$$\Delta T = \frac{Q_c}{0.24 \cdot m}$$

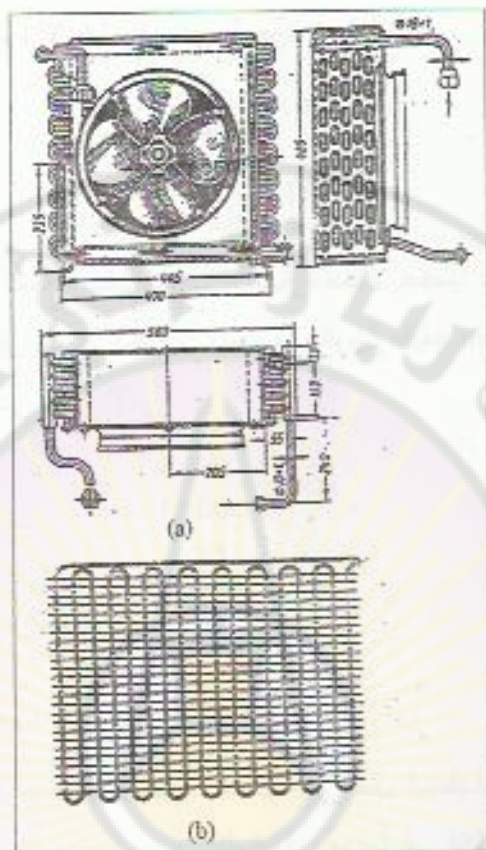
وأحياناً يعبر عن كمية وسيط التبريد باعتباره معدلاً حجمياً بدلاً من معدل سريان الكتلة ويعبر عن معدل الجريان للماء بالجالون/ دقيقة gpm وللhواء بالقدم المكعب/ دقيقة cfm على شكل الآتي:

$$gpm = \frac{Q_c}{500 \Delta T}$$

$$cfm = \frac{Q_c}{1.08 \Delta T}$$

3-1-5-1- المكثفات المبردة بالهواء:

يمر الهواء الجوي أو الهواء المراد تسخينه في حال استخدام المضخة الحرارية في هذه المكثفات على السطح الخارجي للمكثفات مؤدياً إلى تكثيف مائع التبريد داخلها. وقد تنشأ حركة الهواء جبرياً شكل (3-25-أ) نتيجة استخدام مروحة وفي هذه الحالة تنتقل الحرارة بالحمل القسري أو تتم حركة الهواء بسبب اختلاف الكثافة للهواء نتيجة اختلاف درجة الحرارة وفي هذه الحالة تنتقل الحرارة (بالحمل الحر)، كما هو موضح في شكل (3-25-ب) تستخدم مكثفات جريان الهواء الحر مع وحدات التبريد الصغيرة مثل الثلاجات المنزلية وهي عادة من النوع السطحي أو من الأنابيب المركب عليها زعانف وتركب في وضع رأسي خلف الثلاجة وفي مكان يسمح بحركة الهواء رأسياً خلال الأسطح الخارجية للمكثف. ويمكن تصنيف مكثفات الهواء ذات السريان القسري إلى نوعين:



(أ) حمل جبري (ب) حمل حر
شكل (3-25) مكثفات مبردة بالهواء

أ- مكثفات مبردة بالهواء مركبة على قاعدة:

يوضح المكثف مع مروحته والضابط على قاعدة معدنية وتسمى المجموعة "بوحدات التكثيف" كما هو موضح بالشكل (3-26) والضابط قد يكون من النوع المفتوح أو المغلق. في حالة الضابط المغلق يلزم تواجد موتور منخفض السرعة لإدارة مروحة المكثف.

يحتاج المكثف الهوائي حوالي 500 lit/s/ton ref تبريد. لذا يفضل استخدام مراوح ذات ريش عريضة وتدار بمحرك من خلال سير للمكثفات المركبة على قاعدة. ويكون أداء المراوح جيداً مع انخفاض صغير للضغط الإستاتيكي. أما مراوح المكثفات المركبة على بعد بواسطة محركات خاصة، فيمكن تركيب المكثفات الهوائية على بعد عند منسوب عالي للحصول على أداء جيد. نظراً لنظافة الهواء في الأماكن المرتفعة. وعلى ذلك فإن المكثفات المركبة على قاعدة أرضية تحتاج زعانفها إلى تنظيف دائم من الأتربة.

والمكثفات الهوائية متوفرة بتصميمات مختلفة ذات أحجام مختلفة ولمسعات التبريد من 1 طن تبريد وحتى 200 طن تبريد. والمكثفات الهوائية واسعة الانتشار لأن أدائها بسيط، سعرها رخيص، لا تحتاج إلى مياه تبريد ولا يصيبها الصدأ. ومن عيوب المكثفات الهوائية الحاجة إلى طاقة كبيرة لأن درجة التبريد عالية عند مقارنتها بالمكثفات المائية وكذلك حجمها الكبير نسبياً.

أهم العوامل المؤثرة على أداء المكثفات الهوائية هو سرعة الهواء خلالها وهي تتراوح بين 2.5-5m/s للحصول على أحسن أداء مع أقل انخفاض للضغط.

تعتمد سرعة الهواء في المكثف على مساحة الوجه الذي يمر من خلاله (مقطع المكثف) وكذلك على كمية الهواء ويعطى بالمعادلة الآتية:

$$A_r = \frac{m}{v} \text{ أي } \text{Air velocity (fpm)} = \frac{\text{Air quantity (cfm)}}{\text{Face area (ft}^2\text{)}}$$

m: تدفق الهواء بـ m^3/s .

v: سرعة الهواء m/s .

A_r : مساحة مقطع جريان الهواء للمكثف.

اختيار المكثفات الهوائية:

تنتج الشركات مكثفات هوائية ومعها المراوح الخاصة بها. وتقدر استطاعة المكثفات بالكيلووات وتتوقف سعتها أساساً على فرق درجات الحرارة (Temperature Difference DT) بين درجة تكثيف مائع التبريد ودرجة الحرارة الجافة للهواء لحظة دخوله في المكثف. عند اختيار المكثف الهوائي نعين فرق درجات الحرارة الحقيقي TD ثم نحدد التصحيح Correcting Factor C.F من جدول التصحيح واختيار المكثف تبعاً لاستطاعة المكثف الحسابية التي تعطى بالمعادلة:

$$\text{الاستطاعة الحسابية} - \text{استطاعة المكثف} \times \text{معامل التصحيح}$$

والتي هي استطاعة التسخين أو التدفئة المرادة للحيز المدفأ في المضخة الحرارية.



وحدة تكثيف مبردة بالهواء كبيرة الحجم

الشركة المصنعة: Kramer Trenton



مكثف مركب على بعد مجهزة بموجهات ربح

الشركة المصنعة: Kramer Trenton



مكثف مبرد بالهواء مركب على الحائط

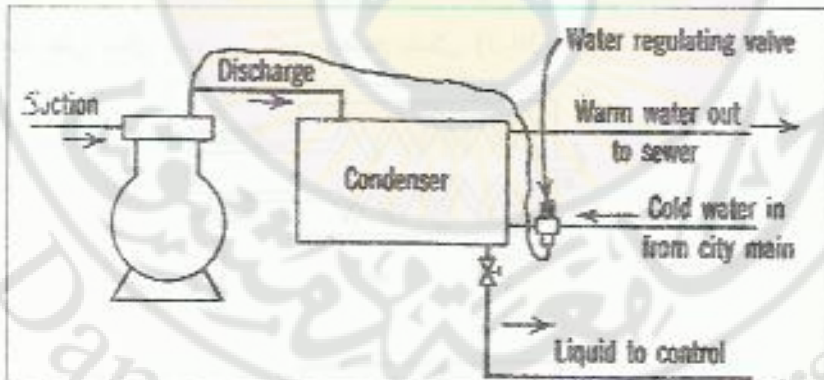
الشركة المصنعة: Kramer Trenton

3-1-5-2- المكثفات المبردة بالمياه (المائية):

تستخدم المكثفات المائية مع ضواغط تتراوح قدرتها من 1 كيلو وات وأكثر. في حالة توفر المياه النظيفة والرخيصة وإمكانية التخلص من المياه الساخنة أو تبريدها لإعادة استخدامها.

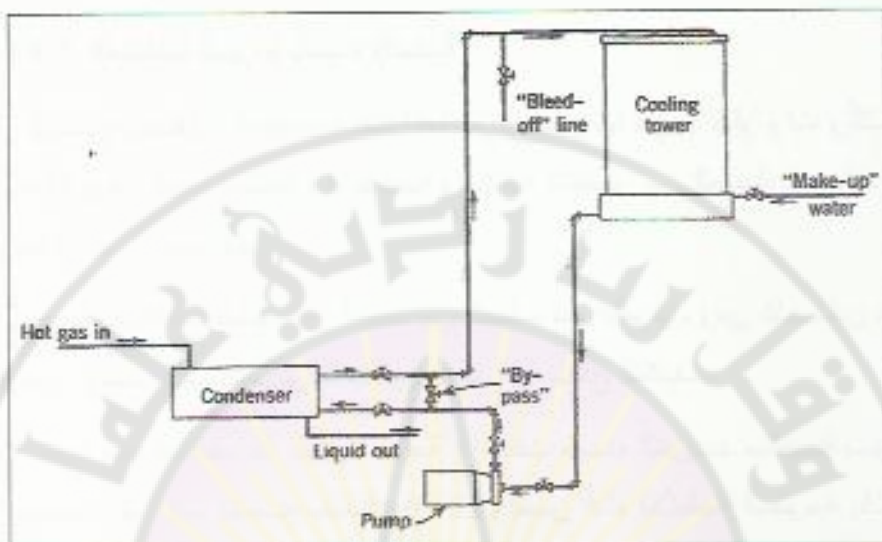
تصنع المكثفات المائية من أنابيب من الصلب مع الأمونيا، ومن النحاس مع الفريون. ويفضل استخدام الزعانف لزيادة مساحة سطح التكثيف.

دورة مياه التكثيف قد تكون مفتوحة إذا كانت مياه التبريد متاحة بوفرة ورخيصة الثمن كما موضح بالشكل (28-3) وأحسن أداء للأنظمة المفتوحة يكون لمعدل سريان $0.1 \text{ lit/s/ton ref}$ تبريد تستخدم للمضخات الحرارية (ماء- ماء) التي تستخدم مياه بئر حيث يتم تصريف المياه المستخدمة إلى فتحة بئر آخر. أو التي تستخدم مياه نهر.



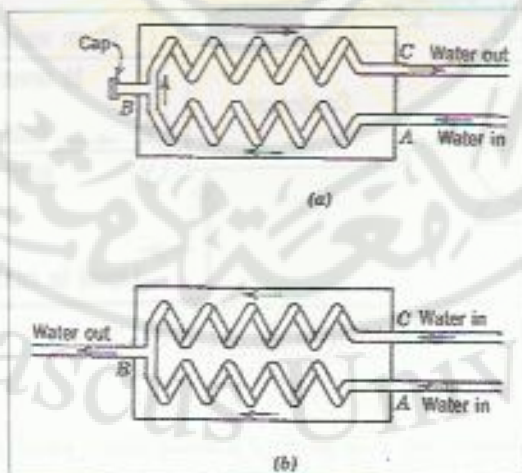
شكل (28-3) دورة التكثيف المفتوحة

أما مع النظام المغلق عادة يستخدم برج تبريد لإعادة استخدام مياه التبريد كما هو موضح بشكل (29-3). وأحسن أداء للأنظمة المغلقة يكون لمعدل تدفق $0.2 \text{ lit/s/ton ref}$.



شكل (3-29) دورة التكثيف المغلقة

يتوقف تصميم المكثفات المبردة بالماء على سرعة جريان المياه، انخفاض ضغطها داخل الأنابيب وكذلك على عدد المسارات للأنابيب. ويتوقف الانخفاض في الضغط على شكل الجريان كما موضح بشكل (3-30).



شكل (3-30) أ- دورة مياه على التوالي

ب- دورة مياه على التوازي

يستخدم النظام المغلق في المضخات الحرارية حيث يستبدل برج التبريد بمستهلك الحرارة أي وشائع تسخين المياه أو وشائع التدفئة المركبة في الحيز المدفأ.

3-5-1-3- معامل الاتساخ:

عند تصميم أو اختيار المكثفات المائية يجب أن يؤخذ في الاعتبار معامل الاتساخ للأنابيب من جهة المياه، لأنه بمرور الوقت تترسب على جدران الأنابيب بعض الأملاح المذابة في الماء سلفاً، وهذه المواد تمثل مقاومة حرارية لعملية انتقال الحرارة، وبالتالي فإن معدل انتقال الحرارة ينخفض ويزداد ضغط التكثيف. ويتوقف معامل الاتساخ على معدل تدفق الماء، نوع معدن الأنابيب، الصيانة الدورية للأنابيب. ويكون معامل الاتساخ لمياه المدن ومياه أبراج التبريد حوالي

$$R_s = 0.001 \frac{m^2 \cdot c}{w}$$

حيث يدخل معامل الاتساخ عند حساب معامل الانتقال الحراري الكلي للمكثف:

$$R = \frac{1}{K}$$

حيث K معامل الانتقال الحراري الكلي للمكثف:

$$R = R_i + R_\lambda + R_o + R_s$$

$R_i = \frac{1}{\alpha_i}$ المقاومة الحرارية للمائع داخل الأنبوب.

R_λ المقاومة الحرارية لمعدن الأنبوب.

R_o المقاومة الحرارية للمائع خارج الأنبوب.

R_s : معامل الاتساخ.

3-1-5-4- أنواع المكثفات المائية:

يمكن تصنيف المكثفات المبردة بالماء إلى الأنواع الآتية:

أ- مكثف أنبوب داخل أنبوب.

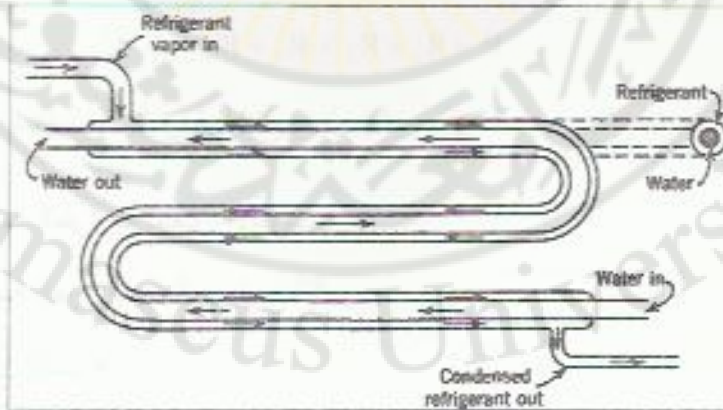
ب- مكثف غلاف وملف.

ج- مكثف غلاف وأنابيب.

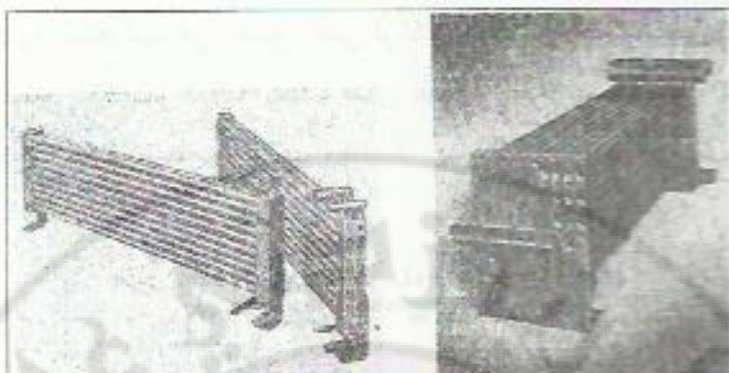
وفي جميع الأنواع السابقة، يجري الماء داخل الأنابيب بينما يتكثف وسيط التبريد على السطح الخارجي للأنابيب.

أ- مكثف أنبوب داخل أنبوب:

يوضح الشكل (3-31)، مكثف أنبوية داخل أنبوب وتكون الأنابيبتان متحدتي المحور ولذلك فإنه أحياناً يسمى المكثف المحوري. ويجري ماء التبريد في الأنبوبة الداخلية بينما يجري وسيط التبريد المراد تكثيفه في الحيز بين الأنبوبتين وفي الاتجاه المعاكس. وهناك عدة تصميمات أخرى لهذا النوع من المكثفات موضحة بالاشكال (3-32). وتحتاج مكثفات أنبوية إلى خزان لتجميع سائل التبريد المتكثف.

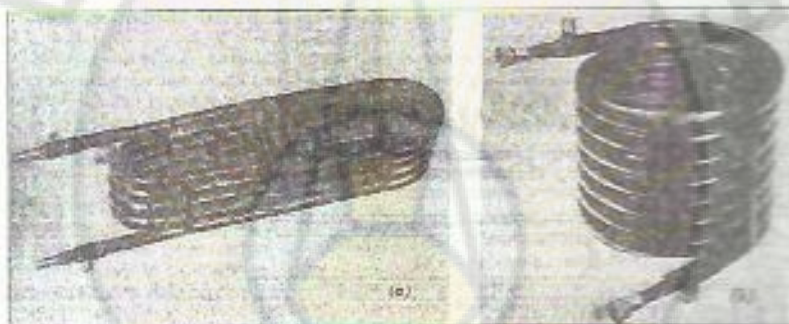


شكل (3-31) مكثف أنبوب داخل أنبوب



شكل (32-3) مكثفات مزدوجة الأنابيب

الشركة المصنعة: Halstead and Mitchell



شكل (32-3) مكثفات مزدوجة الأنابيب

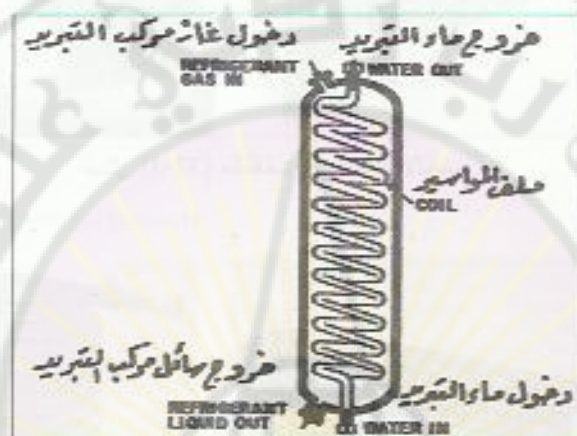
الشركة المصنعة: Edwards Engineering

ب- مكثف غلاف وملف:

يوضح الشكل (33-3) مكثفاً مبرداً بالماء يتكون من ملف حلزوني داخل غلاف من الصلب.

تجري المياه داخل الملف، بينما يكون وسيط التبريد خارج الملف. يدخل بخار وسيط التبريد من أعلى الغلاف، ويتكثف ويتجمع السائل في قاع الغلاف الذي يعمل خزاناً لسائل التبريد. تستخدم مكثفات غلاف وملف مع وحدات التبريد والمضخات الحرارية الصغيرة ذات استطاعة تبريد تصل إلى 10 طن تبريد. ومميزات مكثفات غلاف وملف هي صغر الحجم، إمكانية استخدامها على أنها مكثف وخزان في نفس

الوقت وإمكانية استخدامها في وضع رأسي لو كان المكان المخصص للمكثف محدوداً. وتصمم المكثفات المائية بحيث يمكن تصفية المياه عند توقف الوحدة. ويصعب تنظيف مكثفات ملف وغلاف ميكانيكا ويتم التنظيف بإمرار سائل كيميائي خلال ملفات المياه.



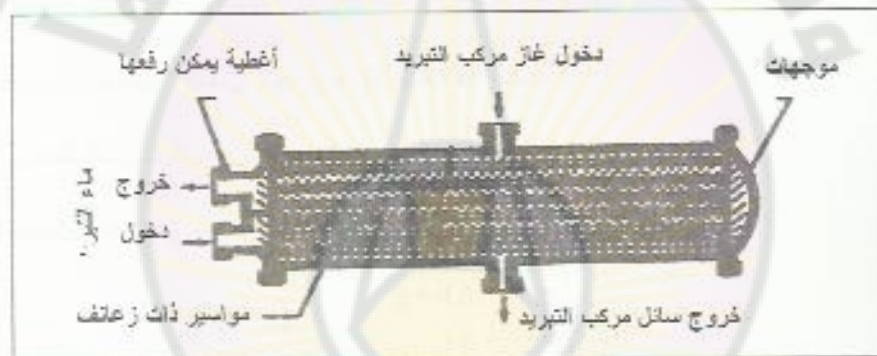
شكل (3-3) مكثف ملف وغلاف

جـ- مكثف غلاف وأنابيب:

المكثف المبرد بالماء من النوع غلاف وأنابيب وهو عبارة عن أنابيب مستقيمة عارية أو ذات زعانف داخل أسطوانة من الصلب. يسري الماء داخل الأنابيب ويدخل بخار وسيط التبريد من أعلى الغلاف بينما يخرج سائل وسيط التبريد من أسفل الغلاف. ويوضح شكل (3-3) مكثف غلاف وأنابيب ذات زعانف.

تستخدم المكثفات الأفقية قرصين من الصلب لتثبيت نهايتي الأنابيب وللمحافظة على المسافات بين الأنابيب. ويوجد على جانبي الغلاف مجمعان مجهزان بقواطع داخلية لتوفير عدد معين من المسارات للمياه.

ويمكن تنظيف المكثفات ذات الغلاف والأنابيب ميكانيكياً وبحرص شديد لعدم تجريح الأنابيب وإضعافها. وتتوفر المكثفات ذات الغلاف والأنابيب في سعة تتراوح من 2 طن تبريد إلى آلاف الأطنان من التبريد. يمكن استخدام قاع الغلاف الأسطواني كخزان لسائل التبريد وبالتالي لا داعي لاستخدام خزان منفصل. ويتراوح عدد المسارات بين 2-20 مسار وزيادة عدد المسارات مفضلة لأنها تعمل على زيادة سرعة المياه، زيادة معدل انتقال الحرارة الكلي، ولكنها تؤدي إلى زيادة القدرة اللازمة لتدفق المياه خلال أنابيب المكثف.



الشكل (34-3) مكثفات غلاف وأنابيب

3-1-5-9- تنقيس المكثف:

في المكثفات المبردة بالماء، خاصة ذات الغلاف والأنابيب، يتسرب الهواء إلى وحدة التبريد عند إيقاف الضاغط، أو إذا كان المبخر يعمل عند أقل من الضغط الجوي مثل مبخرات فريون 11.

وتصنف الغازات غير المرغوب فيها إلى نوعين:

- غازات غير قابلة للتكاثف مثل الأكسجين والنيتروجين وهي تتجمع في أعلى المكثف، بسبب ارتفاع ضغط التكثيف وتعمل على خفض معامل انتقال الحرارة الكلي.

- غازات غير قابلة للتكاثف مثل بخار الماء وتعمل على إصابة مكونات المكثف بالصدأ.

وعليه يجب توفر وسيلة تنفيس (purging) تسمح بسحب الغازات من أعلى المكثف، واستعاضة بخار التبريد المصاحب للغازات غير المرغوب فيها قبل طردها للهواء الخارجي.

10-5-1-3- طريقة حساب وتصميم المكثفات:

1- أنابيب ملساء:

يتم حساب معامل انتقال الحرارة α بالعلاقة التالية:

- وسيط التبريد أقل من 5m/s

- جريان صفائحي.

$$\alpha = K \sqrt{\frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot \Delta h \cdot g}{\mu \cdot l \cdot \Delta t_k}} \quad (17-3)$$

a) أنابيب شاقولية:

K: ثابت 1.15 - 0.543 . K

l: طول الأنبوب m.

λ : معامل التوصيل لمعدن الأنبوب.

Δt_k : فرق درجات الحرارة للطبقة الحدية للسائل المتكاثف.

Δh : فرق الانتالبي النوعي ما بين بخار وسيط التبريد عند دخول المكثف والمتكاثف.

ρ : كثافة وسيط التبريد.

η : لزوجة وسيط التبريد الديناميكية $\frac{Ns}{m^2}$

g : تسارع الجاذبية الأرضية $\frac{m^2}{s}$

(b) أنابيب أفقية:

$$K = 0.725$$

إذا كان $Re > 350$ طبقة حدية جريان مضطرب

حيث Re عدد رينولدز يحسب بالطريقة التالية:

$$Re = \frac{\dot{m}_K}{\eta} = 0.003 \sqrt{\frac{\lambda^2 * \rho^2 * g * \Delta t * K^2 * \ell^3}{\eta^5 * \Delta h^3}} \quad (18-3)$$

باستخدام الطريقة الحدية ذات الجريان المضطرب ترتفع قيمة معامل الانتقال الحراري الكلي. لذلك يتم حساب α في حالة الجريان المضطرب:

$$\alpha = 0.003 \sqrt{\frac{\lambda^3 * \rho^2 * g * \Delta t_K * \ell}{\eta^5 * \Delta h}} \quad (19-3)$$

- كفاف أنابيب مريضة - ملساء:

$$\alpha = \alpha_0 \left[1.10 \left(\frac{d_0}{H} \right)^{0.25} \frac{A_r}{A} + \frac{A_0}{A} \right] \frac{W}{m^2 K} \quad (20-3)$$

H : ارتفاع الزرشة ويحسب كما يلي:

$$H = \frac{\pi (d_K^2 - d_0^2)}{4 d_K} \quad (21-3)$$

α : معامل الانتقال الحراري داخل الأنبوب تحسب وفقاً للعلاقة (17-3).

d_K : القطر الخارجي لأنابيب الحثوة m .

D_R : القطر الخارجي للريشة m .

A_r : سطح الريش لكل 1 متر من طول الأنبوب $\frac{m^2}{m}$.

A : السطح الكلي لكل 1 متر من طول الأنبوب $\frac{m^2}{m}$.

3-1-5-11- اختيار مكثفات المائية:

تُعطي مواصفات مكثفات التبريد المائي في أدلة التسويق (الكتالوجات) بدلالة درجة حرارة تكثيف مائع التبريد وفرق درجات حرارة مياه التبريد ومعامل الاتساخ. ويجب اختيار المكثفات بحيث تكون سرعة الماء خلال الأنابيب أقل من 2.5 m/s .

عند اختيار المكثفات يجب تحديد كل من:

استطاعة التبريد، درجة حرارة التكثف، درجة حرارة دخول مياه التسخين ومعامل الاتساخ وخروجها. وتُعطي بعض الكتالوجات اختيار المكثف بدلالة استطاعة الضاغط.

والجدول (3-4) يعطي الخواص الحرارية لأنواع المكثفات الشائعة الاستخدام:

Damascus University

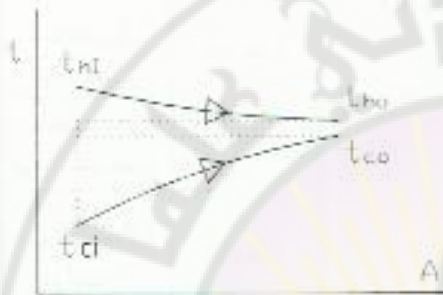
الجدول (4-3) الخواص الحرارية لأنواع المكثفات

نوع المكثف	معامل الانتقال الحراري الكلي K (W/m ² .K)	فرق درجات الحرارة اللوغاريتمي Δt _m (K)	الاستطاعة الحرارية للمكثف Q' = 10000 KJ/h
1- مكثف مائي أنبوب مغسور	230-290	4-8	1- سرعة الماء 0.3-2 m/s
2- مكثف مائي أنبوب داخل أنبوب	700-930		2- تسخين الماء من Δt _w = 8-15 K تدفق الماء 155-300 ℓ/h
3- مكثف غلاف ولانبيب	525-875	4-6	3- تسخين الماء من Δt _w = 4-8 K تدفق الماء 300-600 ℓ/h تدفق التعويض 6-25 ℓ/h
4- مكثف شاقولي شكل برج	700-1750		4- تسخين الماء Δt _w = 2-3 K تدفق المياه 800-1200 ℓ/h تدفق مياه التعويض 15-50 ℓ/h كمية المياه في كل أنبوب 600-1800 ℓ/h
5- مكثف أنابيب ترزيز تيار مواز	290-580	4-6	تسخين الماء 4-6 K تدفق المياه 300-400 ℓ/h تدفق مياه التعويض 50-100 ℓ/h كمية الترزيز لكل متر حول الأنابيب
6- نظام مقاطع	525-1160		قطر الأنبوب الخارجي
			كمية الترزيز
			700-1100 ℓ/h 32 mm
7- مكثف هوائي أنابيب متساة	55-70	8-12	900-1400 ℓ/h 38 mm
			1800-2500 ℓ/h 57 mm
8- هوائي أنابيب مريشة	20-35		تسخين الهواء 2-10 K كمية الهواء 750-3750 m ³ /h سرعة الهواء 1-4 m/s درجة حرارة التناكف أعلى من درجة حرارة الهواء بـ 12-20 K

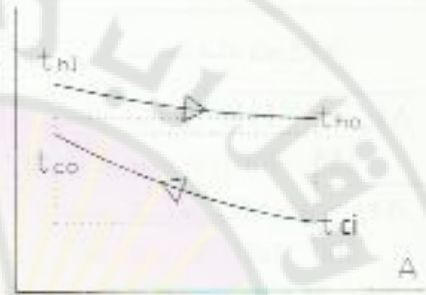
أمثلة محلولة عن المبادلات الحرارية:

ملخص لأهم العلاقات المستخدمة في مسائل المبادلات الحرارية

1- حساب U أو K معامل الانتقال الحراري الكلي يتعلق بـ λ و α .



2- جريان متوازي



1- جريان متعاكس

أ- تحديد الاستطاعة أو التدفق الحراري Q :

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta t_m = \dot{m}_h \cdot C_{ph} \cdot \Delta t_h = \dot{m}_c \cdot C_{pc} \cdot \Delta t_c$$

حيث:

الرمز h للوسيط الساخن والرمز c للوسيط البارد.

K : معامل الانتقال الحراري الكلي $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

A : مساحة سطح التبادل الحراري (مكثف أو مبخر) m^2 .

$\dot{m}$: التدفق الكتلي للوسيط (البارد أو الساخن) kg/s .

C_p : السعة الحرارية للوسيط (البارد أو الساخن) $J/kg \cdot K$.

Q : التدفق الحراري أو استطاعة المبادل w .

ب- تحديد m بـ kg/s :

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{MAX} - \Delta t_{MIN}}{\ln \frac{\Delta t_{MAX}}{\Delta t_{MIN}}}$$

ج- تحديد مساحة سطح التبادل الحراري اللازمة:

$$A = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_m}$$

د- تحديد K:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_o} + R_u + \frac{d_o \ln \frac{d_o}{d_i}}{2\lambda_w} + \frac{d_o}{d_i} \left[\frac{1}{\alpha_i} + R_i \right]$$

تأثير انساخ المبادل الحراري:

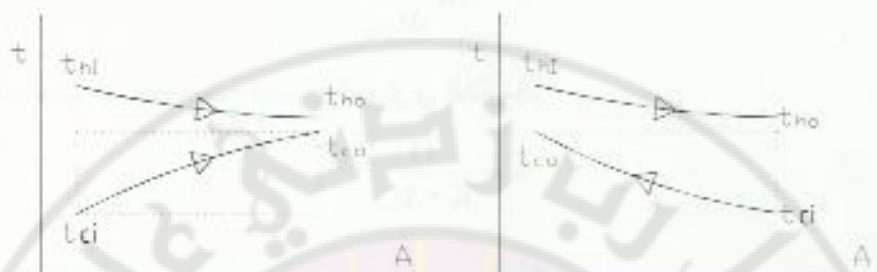
قد تتشكل طبقة من الزيت على جدران الأنابيب أو صفائح المبادل الحراري. يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عند حساب K ولتكن δ_s سماكة طبقة الزيت المتسبب على الجدران ولتكن $\lambda_s \approx 0.116 \frac{W}{mk}$ ومن طرف الماء $\lambda = 0.8 - 2.3 \frac{W}{mk}$.

مثال (1):

مبادل حراري يدخل الوسيط الساخن بدرجة حرارة $t_{hi} = 60^\circ C$ ويخرج بدرجة حرارة $t_{ho} = 50^\circ C$. ويدخل الوسيط البارد بدرجة حرارة $t_{ci} = 20^\circ C$ ويخرج بدرجة حرارة $t_{co} = 45^\circ C$. حدد ما يلي:

- 1- Δt_m في كلا حالتي الجريان متوازي أو متعاكس.
- 2- مساحة سطح التبادل الحراري إذا علمت بأن $k = 900 W/m^2 K$ و $Q = 20 KW$.
- 3- مثل درجات الحرارة كن تابع لـ A.

الحل:



2- جريان متوازي

1- جريان متعاكس

1- حساب Δt_m :

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{MAX} - \Delta t_{MIN}}{\ln \frac{\Delta t_{MAX}}{\Delta t_{MIN}}}$$

للجريان المتوازي:

$$\Delta t_{MAX} = 60 - 20 = 40^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{MIN} = 50 - 45 = 5^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{40 - 5}{\ln \frac{40}{5}} = 16.83^\circ\text{C}$$

للجريان المتعاكس:

$$\Delta t_{MAX} = 50 - 20 = 30^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{MIN} = 60 - 45 = 15^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{30 - 15}{\ln \frac{30}{15}} = 21.4^\circ\text{C}$$

2- حساب A:

للجريان المتعاكس:

$$A = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_m} = \frac{20[\text{KW}] \cdot 1000}{900[\text{W/m}^2\text{k}] \cdot 21.4[^\circ\text{C}]} = 1.027[\text{m}^2]$$

للجريان المتوازي:

$$A = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_m} = \frac{20[\text{KW}] \cdot 1000}{900[\text{W/m}^2\text{k}] \cdot 16.83[^\circ\text{C}]} = 1.32[\text{m}^2]$$

بمقارنة الجريان المتوازي مع الجريان المتعاكس نلاحظ توفير ما يقارب الـ 25% من مساحة سطح للتبادل في حال الجريان المتعاكس.

مثال (2):

مبادل حراري ذو جريان متعاكس الوسيط البارد عبارة عن ماء يدخل بدرجة حرارة $t_{c1} = 20^\circ\text{C}$ ويخرج بدرجة حرارة $t_{c2} = 30^\circ\text{C}$ ويتدفق $\dot{m}_c = 1.2 \text{ Kg/s}$ والوسيط الساخن ماء يدخل بتدفق $\dot{m}_h = 2 \text{ Kg/s}$ ودرجة حرارة $t_{h1} = 160^\circ\text{C}$ و $C_p = 4.18 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C}$ ويخرج بدرجة حرارة t_{h2} يطلب ما يلي:

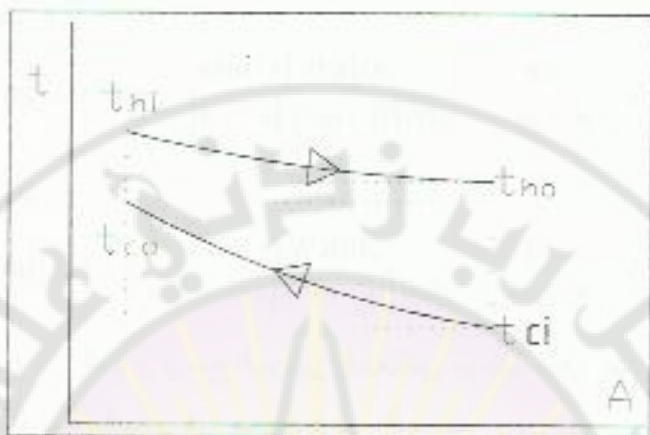
1- من درجات الحرارة بمخطط t-A.

2- حدد Q.

3- درجة حرارة خروج الماء الساخن.

4- حدد A إذا علمت أن $K = 640 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$.

الحل:



ولحساب Q :

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta t_m = m_h \cdot C_{ph} \cdot \Delta t_h = m_c \cdot C_{pc} \cdot \Delta t_c$$

$$Q = m_c \cdot C_{pc} \cdot \Delta t_c = 1.2 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right] \cdot 4.18 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right] \cdot (80 - 20) [^\circ\text{C}]$$

$$Q = 301 \text{ KW}$$

ولحساب t_{ho} :

$$Q = m_h \cdot C_{ph} \cdot \Delta t_h$$

$$301 = 2 \cdot 4.31 (160 - t_{ho})$$

$$t_{ho} = 120^\circ\text{C}$$

ولحساب A :

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta t_m$$

$$\Delta t_{\text{MIN}} = 160 - 80 = 80^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{MAX} = 125 - 20 = 105^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{105 - 80}{\ln \frac{105}{80}} = 91.934^{\circ}\text{C}$$

$$A = \frac{301 \cdot 1000}{640 \cdot 91.93} = 5.1 \text{ m}^2$$

مثال (3):

لدينا منخر هوائي معامل الانتقال الحراري الداخلي (لوسيط التبريد) $\alpha_i = 2000 [\text{W/m}^2\text{k}]$ وسماكة الجدار $\delta = 2 \text{ mm}$ ومعامل التوصيل الحراري للمعدن الجدار $\lambda = 45 [\text{W/mk}]$ ومعامل الانتقال الحراري للهواء $\alpha_o = 45 [\text{W/m}^2\text{k}]$ احسب معامل الانتقال الحراري الكلي:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_o} = \frac{1}{2000} + \frac{0.002}{45} + \frac{1}{40}$$

$$\Rightarrow K = 39.1 [\text{W/m}^2\text{k}]$$

وتقارن المقومات الحرارية:

$$R_i = 0.0005 [\text{m}^2\text{k/W}] \text{ وتساوي إلى } 1.93\% \text{ من المقاومة الكلية } R$$

$$R_o = 0.025 [\text{m}^2\text{k/W}] \text{ وتساوي إلى } 96.53\% \text{ من المقاومة الكلية } R$$

$$R_m = \frac{\delta}{\lambda} = 0.0004 [\text{m}^2\text{k/W}] \text{ وتساوي إلى } 1.54\% \text{ من المقاومة الكلية } R$$

وهذا يعني أنه يجب تكبير سطح التبادل الحراري من طرف الهواء في مثل هذه المنحرات. وفي التطبيق العملي لتصنيع المبادلات تزود الأنابيب بريش من طرف الهواء.

مثال (4):

مبادل حراري ذو حزمة أنابيب بجريان متعاكس. يتم تسخين ماء $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ وسيط التسخين ماء ودرجة حرارة دخوله $t_{m1} = 90^\circ\text{C}$ وفرق درجات الحرارة الأصغري للوسيطين الساخن والبارد $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ والتصميم الهندسي للمبادل ذي طول حزمة الأنابيب $l = 4\text{ m}$ وبمعلومية أن تنفق الماء الساخن $\dot{V}_h = 0.002\text{ m}^3/\text{s}$ ونسبة تنفق السعة الحرارية للوسيطين الساخن والبارد $\frac{\dot{m}_h C_{ph}}{\dot{m}_c C_{pc}} = 2$ والقطر الداخلي لأنبوب المبادل $d_i = 0.01\text{ m}$ ومعامل الانتقال الحراري الكلي منسوباً لسطح الأنبوب الداخلي $K = 270 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ أحسب ما يلي:

- 1- درجة حرارة خروج الوسيط الساخن.
- 2- التدفق الكلي للماء الساخن.
- 3- Δt_m ومثل على مخطط A-I.
- 4- عدد الأنابيب الداخلية اللازمة للمبادل الحراري.

الحل:

1-

$$Q = \dot{m}_h C_{ph} \Delta t_h = \dot{m}_c C_{pc} \Delta t_c$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{m}_h C_{ph} \Delta t_h}{\dot{m}_c C_{pc} \Delta t_c} = 1$$

$$\Rightarrow 2 * \frac{90 - t_{ho}}{20} = 1$$

$$\Rightarrow t_{ho} = 80^\circ\text{C}$$

-2 $\dot{m}_h = \dot{V}_h \rho_h$ و عند $t_{hl} = 90^\circ\text{C}$ تكون:

$$\rho_h = 956.3 \text{ kg/m}^3$$

$$\leftarrow C_{ph} = 4206 \text{ J/Kg.k}$$

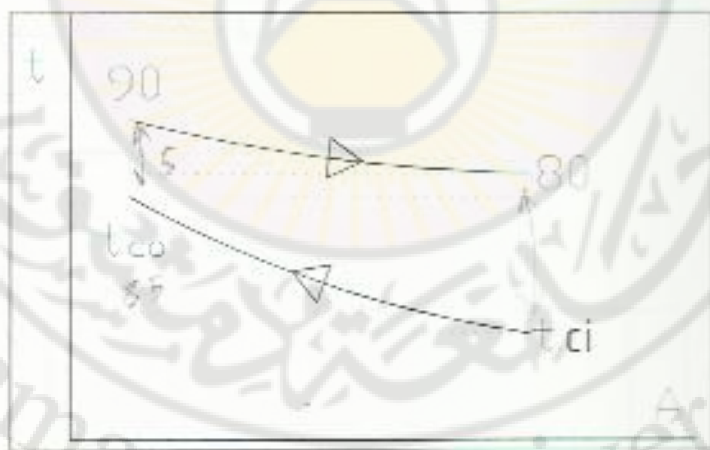
$$\dot{m}_h = 0.002 * 965.3 = 1.93 \text{ Kg/s}$$

-3

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{MAX} - \Delta t_{MIN}}{\ln \frac{\Delta t_{MAX}}{\Delta t_{MIN}}}$$

$$\Delta t_{MIN} = 5^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{15 - 5}{\ln \frac{15}{5}} = 9.1^\circ\text{C} \leftarrow \Delta t_{MAX} - 15^\circ\text{C}$$



4- حساب عدد الأنابيب:

$$Q = K * A * \Delta t_m = \dot{m}_h * C_{ph} * \Delta t_h$$

$$270 * A * 9.1 = 1.93 * 4206 (90 - 80) = 81175 \text{ W} \Rightarrow$$

$$Q = K * A * \Delta t_m = \dot{m}_c C_{pc} \Delta t_c$$

$$\Delta t_{MIN} = 30 - 22 = 8^\circ C$$

$$\Delta t_{MAX} = 30 - 14 = 16^\circ C$$

$$\Delta t_m = \frac{16 - 8}{\ln \frac{16}{8}} = 11.54^\circ C$$

$$Q = 2100 * 45 * 11.54 = 1090530 \text{ W}$$

$$1090530 = \dot{m}_c * 4180 * (22 - 14)$$

$$\Rightarrow \dot{m}_c = 32 \text{ Kg/s}$$

3- حساب تدفق البخار:

$$Q = \dot{m}_o r_o$$

$$1090.530 = \dot{m}_o * 2431$$

$$\Rightarrow \dot{m}_o = 0.45 \text{ Kg/s}$$

مثال (6):

مبرد ذو أنابيب نحاسية ملاء $d_a = 0.015 \text{ m}$ سماكة الأنبوب $\delta = 0.001 \text{ m}$ يتدفق عبر هذا المبرّد هواء بدرجة حرارة $0^\circ C$ وسرعة $w = 2.5 \text{ m/s}$ بشكل عرضاني. ويتدفق داخل الأنبوب وسيط تبريد R12 التدفق الكتلي النوعي $\dot{m} = 200 \text{ Kg/m}^2 \text{ s}$ والتدفق الحراري النوعي $\dot{q} = 250 \text{ W/m}^2$ يطلب حساب المقومات الحرارية ومعامل الانتقال الحراري الكلي لهذا المبرّد. يعطى للهواء $\nu = 13.3 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\lambda = 0.024 \text{ W/mk}$

الحل:

المقاومة الحرارية من طرف الهواء:

$$R_o = \frac{1}{\alpha_o}, Nu = \frac{\alpha_o d_o}{\lambda} = C_1 Pr^n Re^m = 0.615 Re^{0.47}, Re = \frac{w d_o}{\nu} = \frac{2.5 \times 0.015}{13.3 \times 10^{-6}} = 2820$$

$$\Rightarrow Nu = 0.615 (2820)^{0.47} = 25.8 \Rightarrow R_o = \frac{d_o}{Nu \lambda} = \frac{0.015}{2.8 \times 0.024} = 0.024 \text{ m}^2 \text{K} / \text{W}$$

المقاومة الحرارية من طرف وسيط التبريد:

من $\dot{m}, \dot{q}$ نجد α_i حيث:

$$\alpha_i = 2400 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K} \leftarrow \alpha_i = B \dot{m}^{0.1} \dot{q}^{0.7} / a \cdot d_i^{0.5}$$

$$\Rightarrow 1 / \alpha_i = 0.00042 \text{ m}^2 \text{K} / \text{W}$$

مثال (7):

مبخر لمضخة حرارية يعمل على R_{22} والمنبع الحراري ماء يدخل المبخر ذو حزمة الأنابيب بدرجة حرارة 12°C . أنابيب المبخر نحاسية قطرها الأنبوب x سماكته $0.8 \times 19 \text{ mm}$ مريش من الداخل، استقطاعة المبخر الحرارية $Q_0 = 104.5 \text{ Kw}$ ما يعادل 376 KJ/h يبرد الماء بمقدار 5 K يطلب حساب:

- 1- درجة حرارة غليان (تبخّر) وسيط التبريد.
- 2- مفاقد الضغط على طرف تنفق المياه.

يعطى وسيط التبريد داخل الأنابيب:

1- طرف المياه:

- سطح التبادل الحراري $A = 10.5 \text{ m}^2$

- قطر الأنابيب الخارجي $d_o = 0.019 \text{ m}$

- سماكة الأنبوب $\delta = 0.008 \text{ m}$

- مقطع الجريان الطولي $\delta_l = 7.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

- مقطع الجريان العرضي $\delta_a = 9.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

- عدد صفوف الأنابيب $Z_a = 8$

- مساحة الصفوف $S_l = 0.026 \text{ m}$

- عدد ريش توجيه الجريان $n_k = 21$

2- طرف وسيط التبريد:

- سطح التبادل الحراري $A = 9.6 \text{ m}^2$

- القطر المكافئ للأنبوب $d_{eq} = 0.0033 \text{ m}$

- مقطع الجريان للحزمة بكل مجرى $S_l = 6.45 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

- طول ريش الحزمة $l_r = 1.9 \text{ m}$

- عدد المجاري $n_g = 2$

- الارتفاع ضمن المبخر $H = 0.3 \text{ m}$

مواصفات الماء عند $t_m = 4.5^\circ\text{C}$:

$$v = 1.34 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\lambda = 0.58 \text{ W/mK}$$

$$C_p = 4.2 \text{ KJ/KgK}$$

$$\rho_f = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

مواصفات وسيط التبريد عند $t = 33^\circ\text{C}$:

$$B = 0.17 \frac{\text{W}^{0.3} \text{m}^{0.1} \text{s}^{0.1}}{\text{Kg}^{0.1} \text{K}}$$

$$\zeta'' = 12.1 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$$

$$\rho' = 1285 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho'' = 22.9 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_v = 0.89$$

مواصفات جدار الأنبوب:

$$R_i = 0, R_a = 0.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}, \lambda = 400 \text{ W/mK}$$

الحل:

$$Q_0 = \dot{m}_w C_p \Delta t \quad \text{2- حساب تدفق المياه}$$

$$104500 = \dot{m}_w \times 4.2 \times 5$$

$$\rightarrow \dot{m}_w = 4.96 \text{ Kg/s}$$

وهو تدفق مياه التبريد (المتبريد الحراري).

2- حساب سرعة الجريان للماء:

$$w = \frac{\dot{m}}{\rho} \frac{1}{\sqrt{S_a S_f}} = \frac{4.96}{1000 \sqrt{9.8 * 7.1}} = 0.59 \text{ m/s}$$

2- حساب معامل الانتقال الحراري للماء α_a :

$$N_a = \frac{\alpha_a d_s}{\lambda} = 0.25 \text{Re}_D^{0.6} \text{Pr}^{0.33} \left(\frac{\eta_a}{\eta_w} \right)$$

$$\Rightarrow \alpha_a = 0.25 \frac{1}{d_s} \left(\frac{w * d_s}{\nu} \right)^{0.6} \lambda_w \text{Pr}^{1/3} * 1$$

$$\Rightarrow \alpha_a = 3670 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

3- حساب معامل الانتقال الحراري لوسيط التبريد α_f :

$$Q_0 = \dot{m}_0 \Delta h_0 \Rightarrow \dot{m}_0 = \frac{Q_0}{\Delta h_0} = \frac{104.5}{160} = 0.653 \text{ Kg/s}$$

حساب التدفق خلال مقطع الجريان للحزمة بكل مجرى:

$$\dot{m} = \frac{m_0}{S_f} = \frac{0.653}{6.45}$$

2-3- الضواغط:

الضاغط هو قلب دورة التبريد البسيطة وأهم أجزائها، وظيفته الأساسية هي تحويل وسيط التبريد من غاز ذي ضغط منخفض إلى غاز ذي ضغط ودرجة حرارة عاليين.

أنواع الضواغط:

ويمكن تقسيم الضواغط إلى خمسة أنواع رئيسية هي:

- 1- الضواغط الترددية.
- 2- الضواغط الدورانية.
- 3- الضواغط اللولبية.
- 4- الضواغط الحلزونية.
- 5- الضواغط الطاردة المركزية.

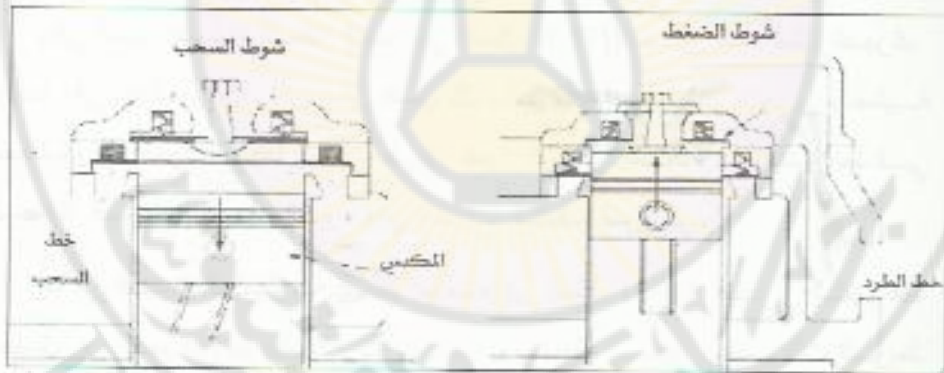
3-2-1 الضواغط الترددية (Reciprocating Compressors)

هي أبسط أنواع الضواغط المستخدمة في عمليات التبريد وأكثرها انتشاراً، وتستخدم الضواغط الترددية بصورة عامة في سعات التبريد التي تتراوح ما بين (90w-120Kw) تتكون الضواغط الترددية من عدة أجزاء أهمها:

- 1- المحرك.
- 2- الأسطوانة.
- 3- المكابس.
- 4- خط السحب.
- 5- خط الطرد.
- 6- عمود الدوران.
- 7- عمود التوصيل.

طريقة عمل الضواغط الترددية:

عند توصيل المحرك بمصدر الكهرباء يدور عمود الدوران وينتج عن حركته حركة أخرى لعمود التوصيل الذي ينقل الحركة من عمود الدوران إلى المكابس التي تتحرك داخل الأسطوانات بالارتفاع والانخفاض، فعندما ينخفض المكبس يقل الضغط داخل الأسطوانة ويصل لمرحلة يكون فيها الضغط خارج الأسطوانة أعلى منه داخلها فيدخل وسيط التبريد إلى داخل الأسطوانة عن طريق خط السحب. وعند ارتفاع المكبس يزداد الضغط تدريجياً داخل الأسطوانة حتى يصل الضغط داخل الأسطوانة إلى نفس قيمة الضغط خارج الأسطوانة فعندها يغلق خط السحب وتتم عملية الضغط بارتفاع المكبس إلى أعلى نقطة له ثم يتم طرد وسيط التبريد من خلال خط الطرد وكما هو موضح في الشكل (3-35) لاحظ أن هذه العملية تحدث في جزء من الثانية.



شكل (3-35) رسم توضيحي لعمل الضواغط الترددية أحادية التأثير

ويمكن تقسيم الضواغط الترددية بشكل عام إلى ضواغط أحادية التأثير وضواغط ثنائية التأثير.

ففي الضواغط أحادية التأثير (المرحلة) تتم عملية الضغط مرة واحدة في كل دورة لعمود الدوران أما في الضواغط ثنائية التأثير (المرحلة) فتتم عملية الضغط مرتين في كل دورة لعمود الدوران، وذلك لأن المكبس له رأسان يعمل كل منهما في

أسطوانة. وتستخدم الضواغط الترددية ثنائية التأثير (المرحلة) في السعات الكبيرة دون الصغيرة لارتفاع تكلفتها ولكنها أسهل من ناحية الصيانة.

ويمكن أن تكون الضواغط الترددية أحادية التأثير على أحد ثلاثة أقسام:

1- مغلق (Hermetic).

2- شبه مغلق (Semi-hermetic).

3- مفتوح (Open).

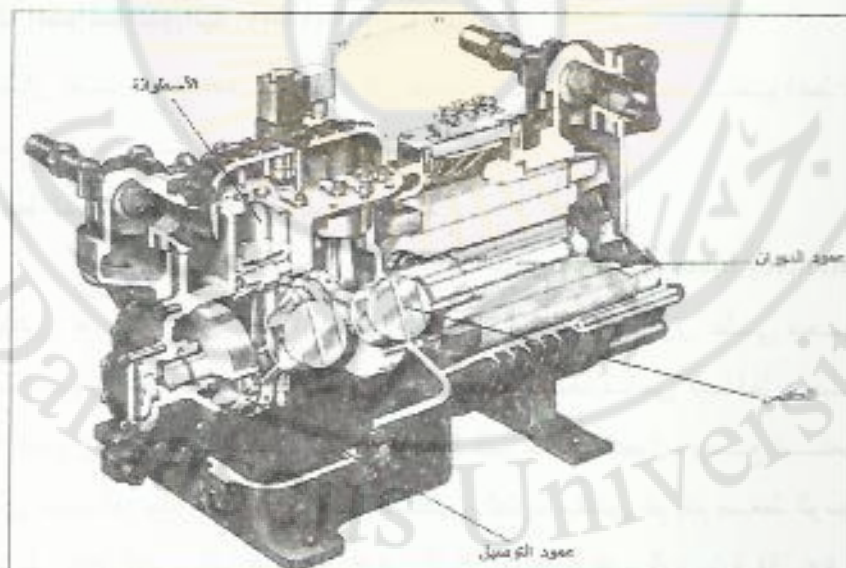
فالضواغط المغلقة الموضحة في الشكل (3-36) يكون فيها الضاغط والمحرك في غلاف واحد، مثل الضواغط الموجودة في المكيفات الشبكية. تستخدم الضواغط المغلقة في الوحدات الصغيرة ذات السعات الثابتة. تمتاز الضواغط المغلقة بأنها رخيصة الثمن ولكن يعيبها صعوبة إجراء عمليات الصيانة عليها.

وفي الضواغط شبه المغلقة (انظر إلى الشكل (3-37)) نجد أن الضاغط والمحرك يوجدان في غلاف واحد ولكن يمكن فصل كل واحد منهما عن الآخر لإجراء عملية الصيانة ونقل الحركة بينهما يتم عن طريق عمود النوران. تستخدم هذه الضواغط في الوحدات المتوسطة السعة والكبيرة وفي وحدات التكييف المركزي.

أما في الضواغط المفتوحة كما هو موضح في الشكل (3-38)، فنجد أن الضاغط منفصل عن المحرك ويتم نقل الحركة بينهما بواسطة السيور وصلات الربط (Coupling) كما هو الحال في مكيف السيارة حيث ينقل السير حركة المحرك النورانية إلى الضاغط، ويمكن في هذا النوع استخدام محرك واحد لتشغيل أكثر من ضاغط.



شكل (36-3) ضاغط ترددي مغلق



شكل (37-3) ضاغط ترددي شبه مغلق



شكل (38-3) ضاغط ترددي مفتوح

2-2-3- الضواغط الدورانية (Rotary Compressors)

يمكن تقسيم الضواغط الدورانية إلى قسمين رئيسيين هما: الضواغط ذات القرص الثابت، وذات القرص المتحرك.

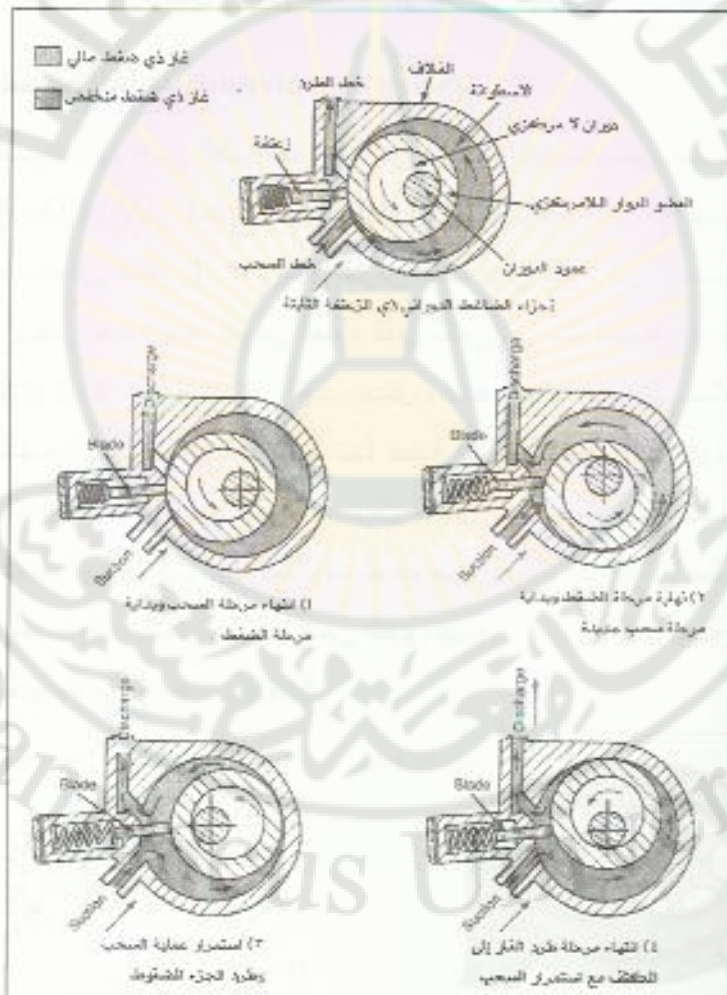
الضاغط الدورانية ذات الريشة (زعنفة) الثابتة:

(Stationary blade rotary compressors)

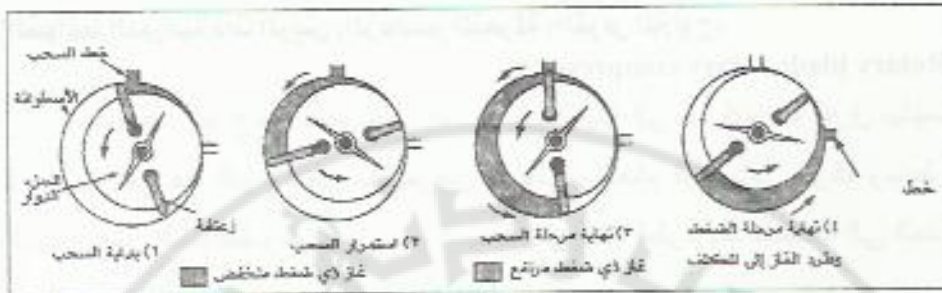
يتكون هذا النوع من الضواغط من عمود الإدارة، قرص يدور على محيط الغلاف الحاوي للضاغط بحيث يكون القرص ملاصقاً للغلاف من الداخل، خلال عملية الدوران يفتح خط السحب ليسمح لوسيط التبريد بالدخول، ومع استمرار الدوران تصل لمرحلة يكون فيها خط السحب والطرود مغلقين ثم يتم ضغط الوسيط التبريد إلى خط الطرد كما هو موضح في الشكل (39-3) تقوم الريشة (الزعنفة) بمنع اختلاط وسيط التبريد الداخل من خط السحب مع الخارج من خط الطرد، وتوجيه الوسيط إلى خط الطرد.

الضواغط الدورانية ذات الريش (الزعانف) المتحركة (القرص المتراوح):
(Rotary blade rotary compressors)

يتشابه هذا النوع مع الضواغط ذات الريش الثابتة إلى حد كبير، والفرق بينهما أن الريش في هذا النوع تتور مع القرص الداخلي وتتحكم الريش في حركة وسيط التبريد داخل الضاغط وتقوده من خط السحب إلى خط الطرد بعد ضغطه إلى الحد المطلوب كما هو موضح في الشكل (3-40).



شكل (3-39) عمل الضواغط الدورانية ذات الريشة الثابتة



شكل (3-40) الضاغط ذو القرص المتراوح

3-2-3- الضواغط اللولبية (Screw Compressors):

يستخدم هذا النوع من الضواغط زوجاً من التروس اللولبية يسمى أحدها القائد (المذكر (Male)) والآخر المقود (المؤنث (Female)) أو لولب واحد مع نجمتين (Stars) كما هو موضح في الشكل (3-41) يدور الترس القائد الذي يتكون من أربعة نتوءات (Lobes)، ويدور نتيجة لذلك الترس المقود الذي يتكون من ستة تجاويف (Gullies) في اتجاه معاكس لحركة دوران الترس القائد. يدخل وسيط التبريد إلى الضاغط يملأ الفتحات الموجودة في الترس المقود، ثم تبدأ عملية الضغط بدخول أحد رؤوس الترس القائد في إحدى فتحات الترس المقود، ثم يدخل الرأس التالي في الفتحة التالية. وهكذا حتى تتم عملية الضغط إلى الحد المطلوب ثم يتم طرد وسيط التبريد من خط الطرد على هيئة غاز مضغوط. يستخدم هذا النوع من الضواغط في الوحدات المتوسطة نسبياً التي تتراوح سعتها ما بين (70kw-4200kw).



شكل (3-41) الضاغط اللولبي

3-2-4- الضواغط الحلزونية (Scroll Compressors):

يتكون الضاغط الحلزوني من اللولب الثابت (Fixed scroll) واللولب المداري Orbiting Scroll والجسم وعمود المرفق، حيث يدار اللولب المداري بواسطة عمود المرفق حول مركز اللولب الثابت بزواوية اتجاه ثابتة. إن مبدأ عمل الضاغط الحلزوني يعتمد على سحب بخار وسيط التبريد وضغطه بين اللولبين كما هو موضح في الشكل (3-42) نتيجة تغير نقط التماس بين اللولبين بالنسبة إلى المركز ونتيجة لذلك يقل حجم الغاز المحجوز عند محيط اللولبين ويضغط عندما يتحرك الغاز باتجاه المركز ثم يتجه إلى غرفة الطرد من خلال فتحة الطرد إلى ملفات المحرك (Motor Windings) لتبريدها وفصل الزيت من وسيط التبريد ثم يخرج من ماسورة الطرد.



شكل (3-42) الضواغط الحلزونية

3-2-5- الضواغط الطاردة المركزية (Centrifugal Compressors):

تستخدم هذه الضواغط الموضحة في الشكل (3-43) في الوحدات ذات السعات التبريدية الكبيرة. يتم ضغط وسيط التبريد في هذه الضواغط بالاعتماد على نظرية الطرد المركزي. تنشأ القوة الطاردة المركزية نتيجة للدوران حول محور ثابت وتكون باتجاه قطري. وفي هذه الضواغط يدخل الغاز من عين مروحة الضاغط على هيئة غاز ذي ضغط منخفض، وعند دوران الدافعة (Impeller) شكل (3-44)

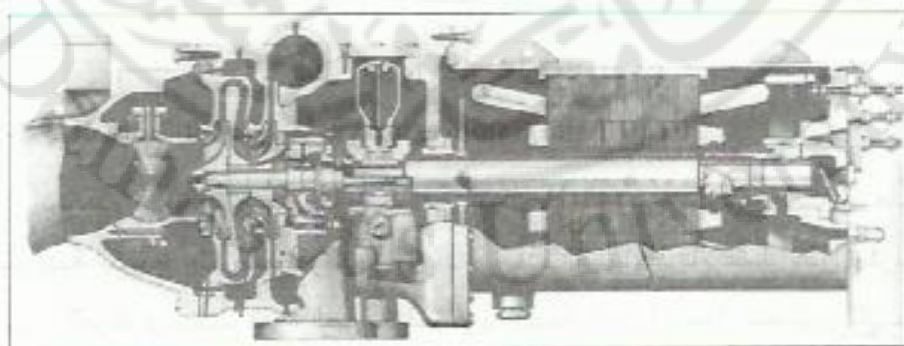
يطرد وسيط التبريد باتجاه قطري خارج الدافعة ويزداد ضغط الغاز نتيجة للدوران بسرعة عالية والارتطام بجدار الضاغط ثم يخرج وسيط التبريد من خلال فتحة مصممة بشكل خاص يساعد على تحويل الطاقة الكامنة التي اكتسبها وسيط التبريد إلى ضغط، ويخرج مدفوعاً من خط الطرد.

ويمكن تقسيم الضواغط الطاردة المركزية إلى قسمين، الضواغط المفتوحة والضواغط المغلقة.

فالضواغط المفتوحة يمكن استعمالها لوحدات التبريد على أنها وحدات منفردة في الساعات التبريدية التي تصل إلى 4500 طن تبريدي، ويكون الضاغط فيها مصمماً من مرحلة واحدة وقد يكون متعدد المراحل، يدور الضاغط في هذا النوع بسرعات كبيرة تتراوح بين 3000-18000 دورة في الدقيقة.

ويمكن استخدام محرك كهربائي أو محرك غازي أو محرك ديزل أو تسريين غازي إعطاء الضاغط الحركة الدورانية التي يحتاجها.

أما النوع المغلق فيستخدم مع الساعات التي تصل إلى 2000 طن تبريدي ويمكن أن يكون الضاغط فيها ذا مرحلة واحدة أو ذا مرحلتين ويدور الضاغط في هذا النوع بسرعة ثابتة.



شكل (3-43) الضاغط الطارد المركزي



شكل (3-44) الدافعة المستخدمة في الضواغط الطاردة المركزية

3-2-6- تبريد الضاغط:

تتأثر درجة حرارة الضاغط بشكل كبير، وذلك نتيجة لارتفاع درجة حرارة وسيط التبريد داخل الضاغط، بسبب زيادة الضغط ونقص الحجم المصاحب لهذه الزيادة. كذلك نتيجة الحركة الميكانيكية التي تحدث داخل الضاغط والتي ينشأ عنها احتكاك الأجزاء بعضها ببعض، لذلك كان لا بد من إيجاد وسائل مختلفة لتبريد الضاغط.

ويتم تبريد الضواغط باستخدام زيت خاص بالتبريد يقوم على طرد الحرارة الموجودة في المحرك والضاغط، ويمكن استخدام مراوح خاصة لتبريد الضواغط من الخارج. أما المحركات الكهربائية في الضواغط المغلقة فيتم تبريدها بتمرير خط غاز السحب الراجع ومعه الزيت الراجع على ملفات المحرك، وفي بعض الوحدات يتم تبريد الزيت الساخن لإعادة استخدامه للتبريد مرة أخرى، وفي الضواغط الصغيرة الترددية يستخدم التبريد التناثري حيث يرتطم بعمود المرفق أثناء دورانه مما يؤدي إلى نثر الزيت على أجزاء الضاغط المختلفة كالأسطوانات والمكابس وعمود التوصيل وكراسي التحميل، أما في الضواغط الكبيرة فتستخدم مضخة لتزييت جميع أجزاء الضاغط.

والزيوت المستخدمة لتبريد الضاغطة في دوائر التبريد المختلفة لا بد أن يتوفر فيها عدد من الخواص أهمها:

- 1- أن يكون معدنياً خالياً من الشمع والكبريت والرطوبة والشوائب.
- 2- أن يكون الزيت ذا ثبات حراري؛ أي لا يكون رواسب كربونية نتيجة لارتفاع درجة حرارته كما يحدث في السيارات.
- 3- أن يكون مقاوماً للتحلل عند درجات الحرارة العالية، وأن لا يتفاعل مع وسيط التبريد.
- 4- أن يكون له نقطة انصباب منخفضة حتى لا يتجمد بسهولة عند محاول تعبئة الضواغط به.
- 5- أن يحافظ على حالته السائلة مهما ارتفعت درجات الحرارة.
- 6- أن يكون ذا لزوجة عالية.
- 7- أن لا ينقل التيار الكهربائي.

ولزيوت التبريد المستخدمة في تبريد الضواغط فوائد غير عملية للتبريد تتلخص في منع تكون الصدأ على الأجزاء المتحركة داخل الضاغطة، منع تآكل أجزاء الضاغطة الداخلية، المساعدة على سهولة حركة الأجزاء المتحركة وكذلك تعمل كاتم صوت وبالتالي زيادة عمر الضاغطة، وفي أغلب أنواع الضواغط يتم وضع زجاجة خاصة ليبيان كمية زيت التبريد.

ملاحظة:

يجب استعمال نوع الزيت أو البديل الموصى به من قبل الشركة المصنعة فقط.

الضاغط المستخدم للتبريد يملك عادة نسبة حجم ميت متوسطة (نسبة حجم الغاز المتبقي في الأسطوانة إلى حجم الإزاحة الكلي).

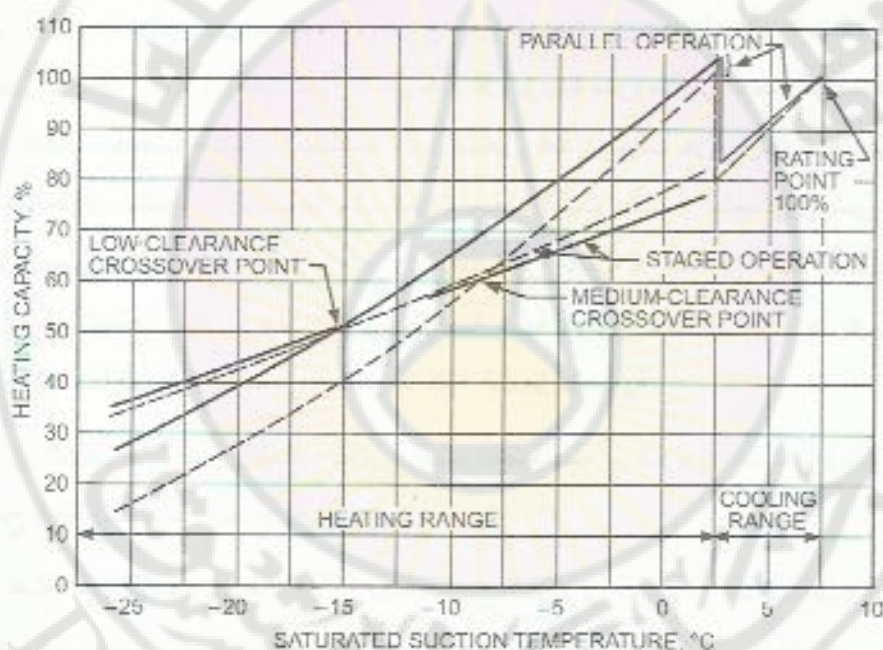
من أجل مضخة حرارية ذات مصدر هوائي يكون الضاغط ذو نسبة حجم متبقي أصغري مناسباً للتشغيل بدرجات حرارة منخفضة ويعطي استطاعة تبريدية أكبر عند درجات حرارة تبخرية أصغر. على أية حال فإن هذا للضاغط يحتاج طاقة أكبر عند حمل التبريد الاعظمي من ضاغط ذي فراغ متوسط، يمكن أن نحصل على استطاعة تسخين كلية أكبر عند درجات حرارة خارجية أقل بزيادة مدروسة في حجم للضاغط وهذا يتطلب تخفيضاً طفيفاً بالاستطاعة عند التشغيل عند درجات حرارة خارجية أعلى بواسطة طرق تخفيض الاستطاعة مثل محرك متعدد السرعات أو متغير السرعة أو قفل بعض الأسطوانات أو طرق أخرى. بينما تكون السيتة في هذا أن العدد الغالب من ساعات التشغيل عند درجات حرارة خارجية عالية سيكون للضاغط عندها غير محمل كلياً مما يخفض المردود عادة ويزيد كلفة التشغيل السنوية.

إن الكلفة الانشائية الإضافية لتكبير للضاغط يجب أن تدرس اقتصادياً وتقارن بالريح في الاستطاعة الحرارية.

هناك طريقة مقترحة من أجل زيادة الخرج الحراري عند درجات حرارة منخفضة تستعمل الانضغاط المرحلي. فعلى سبيل المثال يضغط ضاغط من 5 درجة مئوية درجة حرارة سحب مشبعة إلى 35 درجة مئوية حرارة دفع مشبعة. وهناك ضاغط ثانٍ يضغط البخار من 5 سحب مشبعة إلى 50 دفع مشبعة وبهذا الترتيب يمكن وصل ضاغطين على التفرع بكلاهما تضخ من 7 درجة حرارة سحب مشبعة إلى 50 دفع مشبعة من أجل التبريد وبعدها عند درجة حرارة خارجية منخفضة التدفئة ويعاد توصيلهما بالتسلسل ويقومون بالضغط بمرحلتين متتاليتين لتأمين التسخين المطلوب.

الشكل (3-45) يظهر أداء زوج من الضواغط من أجل وحدات ذات حجم ميت متوسط ومنخفض.

عند درجات حرارة سحب منخفضة فإن إعادة التوصيل على التسلسل أضاف بعض الاستطاعة. على أية حال فإن المحرك في هذه الحالة يجب أن يختار من أجل ظروف التحميل الأعظمية في الصيف على الرغم من أن الضاغط ذو المرحلة الدنيا يحتاج متطلبات طاقة منخفضة بشكل كبير عند شروط التدفئة.



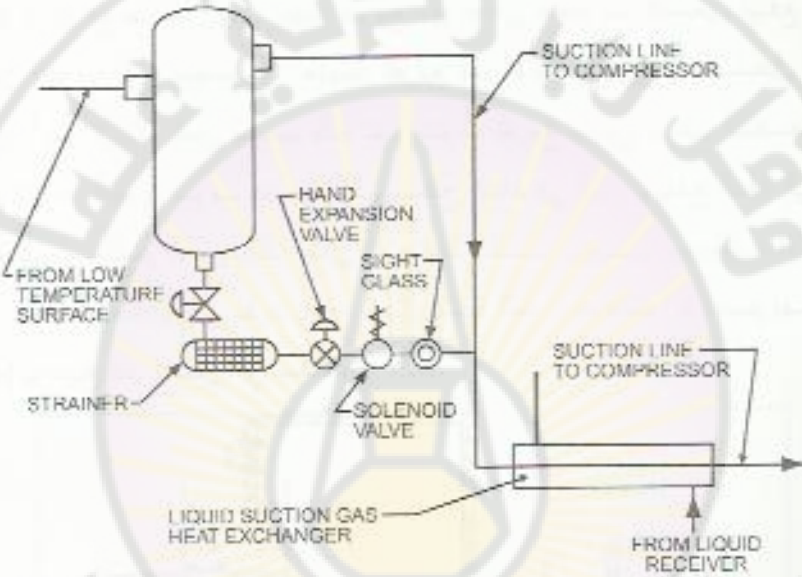
NOTE: Capacities of medium- and low-clearance staged compressors are based on rating point capacities for respective compressors in parallel.

—— LOW CLEARANCE
 ---- MEDIUM CLEARANCE

الشكل (3-45) يظهر أداء زوج من الضواغط من أجل وحدات ذات حجم ميت متوسط ومنخفض

حماية رجوع السائل للضاغط:

فاصل السائل على خط السحب مشابه للموجود في الشكل (46-3) ويمكن أن يحوي مبادلاً حرارياً غاز - سائل لتخفيض رجوع السائل المؤذي إلى الضاغط.



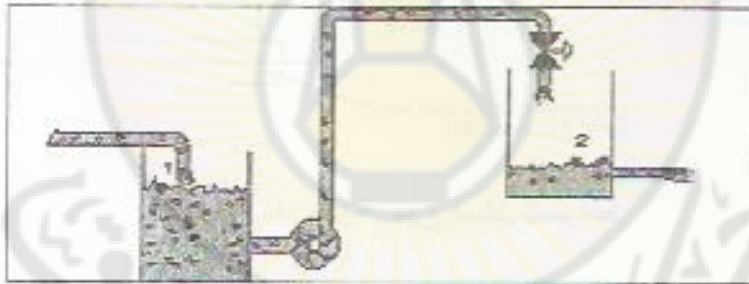
الشكل (46-3) حماية رجوع السائل للضاغط

يجب أن يتم التحكم بصمام القطع السولونويد بحيث يفتح عندما يكون الضاغط في وضعية التشغيل ويجب أن يعبر الصمام اليدوي بحيث يؤمن معدل تدفق مقبول في خط السحب.

3-3- مضخات الماء:

أساسيات عمل المضخة:

عمل جميع المضخات يعتمد على المبادئ العامة وهي إذا كان مطلوباً من مضخة أن ترفع ماء من بئر، يجب تفريغ الهواء من حجيرات التشغيل ليدفع الماء بدلاً من الهواء الذي سحب عند حدوث تفريغ الهواء من حجيرات التشغيل ليدفع الماء بدلاً من الهواء الذي سحب لأنه عند حدوث تفريغ جزئي يداخل المضخات فإن ضغط الهواء الجوي سوف يضغط على سطح الماء في البئر ويدفع الماء إلى أعلى في الحجيرات المفرغة، وبذلك يمكن الاحتفاظ بالماء تحت سيطرة الأجزاء المتحركة للمضخة، والتي تقوم بدفعه خلال فتحة الطرد ثم ماسورة التصريف: شكل (47-3) يوضح فكرة عمل أي مضخة.



شكل (47-3) يوضح المبادئ العامة لعمل المضخات

3-3-1- حساب استطاعة المضخة المطلوبة لنظام التدفئة بالمضخة الحرارية:

وفقاً للعلاقة التالية:

$$P = \frac{\dot{V} * \rho * h_{gs} * g}{\eta_p}$$

حيث:

$\dot{V}$: تدفق الحجمي للماء m^3/s .

ρ : كثافة الماء Kg/m^3 .

η : مردود المضخة.

g : تسارع الجاذبية الأرضية m^2/s .

الارتفاع الماتومتري المطلوب يحسب كما يلي:

$$h_{ges} = h_s + h_d + \sum h_w$$

حيث:

h_s : ارتفاع السحب الشاقولي m .

h_d : ارتفاع الدفع (الضغط) الشاقولي m .

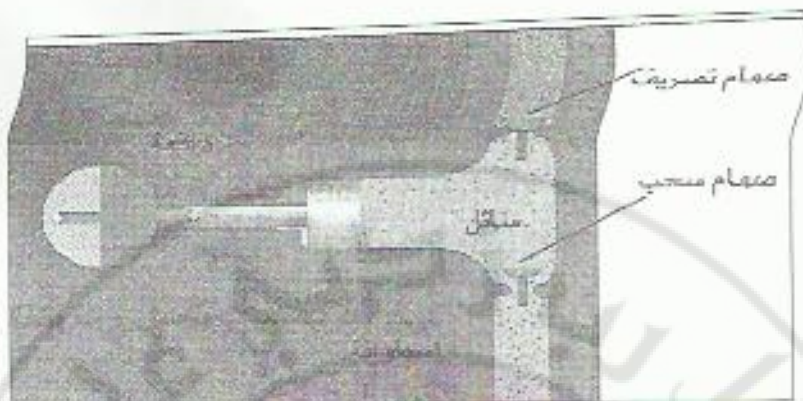
$\sum h_w$: مجموع مقاومات الاحتكاك ومقاومة المبادل الحراري m .

ويمكن تصنيف الأنواع المختلفة للمضخات تبعاً لتصميمها أو أسس تشغيلها.

3-2- المضخات الترددية:

لها إزاحة موجبة وذلك لأن كمية السائل التي تسحبها في شوط السحب، تدفعها في شوط الطرد بالكامل بغض النظر عن مقاومة شبكة أنابيب الطرد وهي تتشابه في ذلك مع المضخات الدورانية ويمكن توضيح أدائها كالآتي:

شكل (3-48) يبين مكونات مضخة ترددية مفردة الأداء حيث يتسحب بسائل الاسطوانة حجم من السائل مساوٍ لإزاحة المكبس أو الرافعة خلال صمامات السحب في شوط السحب، ثم يتم تصريف السائل تحت ضغط موجب خلال صمامات الطرد في شوط التصريف.



شكل (3-48) مضخة ترددية مفردة الأداء

فإذا كان الصمام (صمام التصريف) في شكل (3-47) على خط التصريف مغلقاً، ولم يكن هناك صمام أمان ليعمل على التهوية، فسوف يستمر تزايد الضغط بداخلها إلى أن تنفجر أنبوبة التصريف، ويتم ضخ كمية من السائل مع كل شوطين للمضخة الترددية، لذلك تعتمد كمية التصريف في المضخة الترددية اعتماداً كلياً على سرعتها. وعلى ذلك يمكن تغيير كمية التصريف للمضخة بتغيير سرعتها، كما يراعى أن الطرد يتم بكميات متتالية منفصلة، وكثيراً ما تزود المضخات الترددية بأسطوانتين لكل دافعة (من الجهتين) لجعلها مزدوجة الأداء حيث تكون إحدى الأسطوانتين في شوط الطرد بينما تكون الأسطوانة الأخرى في شوط السحب.

وتمتاز المضخات الترددية بالميزات الآتية:

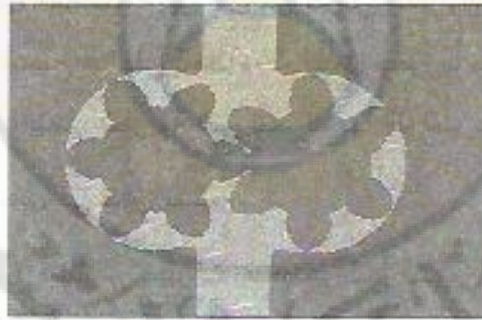
- بساطة فكرة تشغيلها وسهولة صيانتها.
- تتناسب سعتها مباشرة مع سرعتها.
- يمكنها السحب من أعماق كبيرة.
- يمكنها الضخ إلى ارتفاعات كبيرة وضغوط عالية.
- يعتمد عليها، ويمكنها العمل في ظروف خدمة شاقة.
- موجبة الإراحة، أي أن كل لفة لا بد أن تؤدي لتصريف كمية معينة من السائل.

3-3-3- المضخات الدورانية:

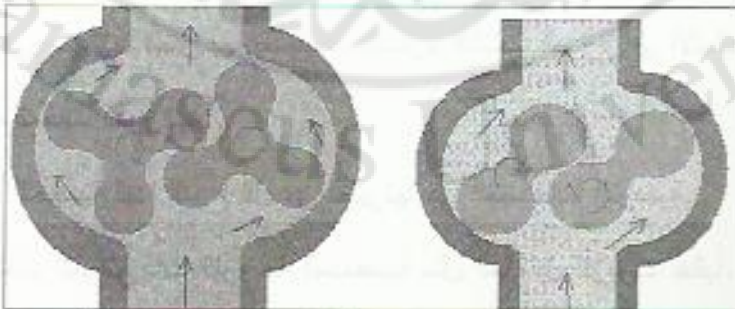
تجمع بين خواص المضخة الترددية في ايجابية التصريف وخواص المضخة المركزية من حيث ثبات التصريف وعدم تذبذب التدفق. ومن هذا النوع المضخات ذات التروس المتقابلة والمضخات ذات التروس الحلزونية.

1- مضخات التروس المتقابلة:

تتكون كما في شكل (3-49) من ترسين متقابلين يدوران في اتجاهين متضادين، ويكون الخلوص الطرفي والجانبى صغيراً للغاية، وتقوم المضخة عند دوران الترس باصطياد السائل المتدفق بين الأسنان للتدور به من جانب السحب إلى جانب التصريف (الدفع) وينتج عن التصريف المتتابع من أسنان التروس ارتفاع الضغط لدفع السائل في ماسورة التصريف. ويمكن استبدال حروس المستقيمة بالقباب (نقوءات مستديرة) المزوجة أو القباب الثلاثية كما هو مبين في الشكل (3-50).



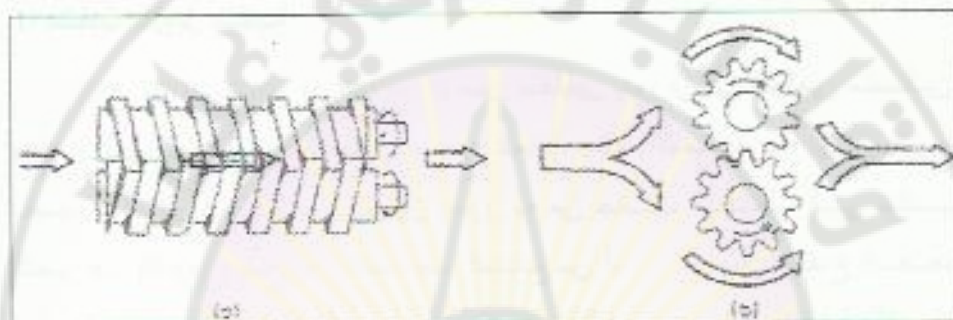
شكل (3-49) مضخة دورانية طراز التروس المتقابلة



شكل (3-50) مضخات تروس متقابلة طراز القبتين أو الثلاث قباب

2- مضخات التروس (اللولبية) الحلزونية:

تتكون من التروس الحلزونية المتوازية أفقياً والأسنان معشقة مع بعضها، ويجري تشغيل هذه التروس بخلوصات متناهية في الدقة داخل الغطاء المحيطة بها كما هو مبين في شكل (51-3).



شكل (51-3) مضخة التروس المتقابلة طراز الترس الحلزون

ويتم تدفق السائل المضغوط إلى كل من طرفي الحلزون حيث يتم اصطياؤه بين من الحلزون والسطح الداخلي للغطاء، ثم يحمل محورياً مع الحلزون ليتم طرده خلال فتحة التصريف بنفس الطريقة التي تتحرك بها اللوالب على مسمار السن.

- تقوم بتصريف السائل في تدفق مستمر.

- موجبة الإزاحة، ولا تستلزم تجهيزات التحضير لبدأ التدوير.

- بسيطة في إنتاجها حيث لا يوجد بها صمامات شفت أو تصريف.

- أسهل في صيانتها فليس بها صمامات تستلزم الكثف الدوري أو الاستبدال.

عيوب المضخات الدورانية:

- الكفاية الحجمية لهذا النوع أقل من نظيرتها في المضخات الترددية.

- لا تستخدم للموائع ذات اللزوجة المنخفضة مثل الماء بل للزيوت غالباً.

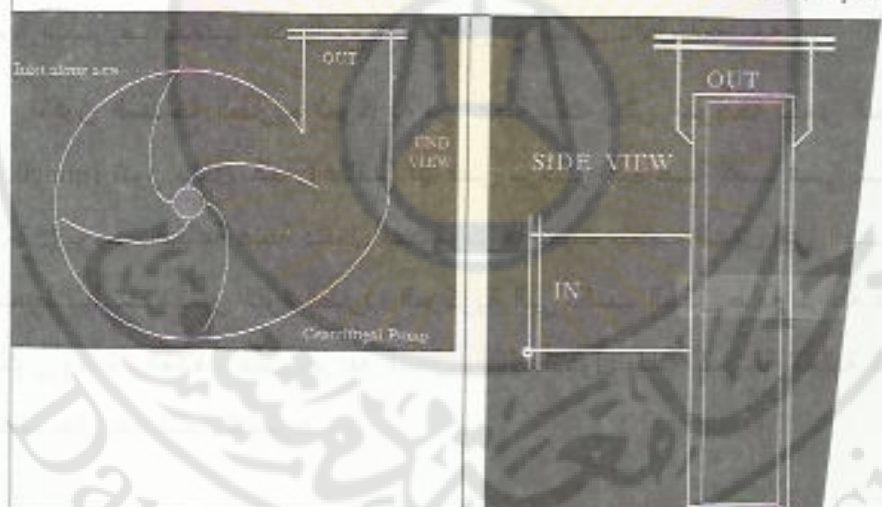
تتميز أنها ليس بها صمامات أو مكابس أو أذرع حولها حشو مثلما تتطلبه المضخة الترددية، وقد أدى ذلك إلى استخدام المضخة الطاردة المركزية لتداول السوائل التي تحمل مواداً صلبة. تعرف هذه المضخات بمولدات الضغط الديناميكي حيث إن انتقال السائل يتم عن طريق التغير في الضغط وذلك بعكس المضخات الترددية أو الدوارة التي يتم فيها انتقال السائل بطريقة الدفع. كما أن كمية التصريف في المضخات الترددية أو الدوارة ذات التروس تتوقف على سرعة الدوران فقط، بينما تتوقف في المضخات الطاردة المركزية ليس على الضغط الديناميكي المتولد بواسطتها فقط ولكن يتوقف أيضاً على المقاومات التي يواجهها السائل في مساره. كمية التصريف يتناسب عكسياً مع مقاومة توزيع السائل داخل المضخة.

تتكون المضخة الطاردة المركزية من عجلة ذات ريش المروحة تسمى الدفاعة (impeller) تدور داخل علبة (غلاف) لها نفس مركز الدفاعة كما في شكل (3-52) يوجد بالدفاعة فتحة دخول عند مركزها بحيث يتغذى السائل إلى الغلاف المحيط بها تحت تأثير القوة الطاردة المركزية التي تكسب السائل طاقة سرعة عالية وتكون وظيفة الغلاف تقليل سرعة السائل وبذلك تتحول طاقة السرعة العالية إلى ضغط عال عند فتحة التصريف.

Centrifugal Pumps



- use of centrifugal force to increase the liquid pressure
- motor driven impeller enclosed in case
- operation:
 - liquid enters at center of impeller rotation
 - due to centrifugal forces moves to the impeller periphery
 - the liquid experience maximum pressure and move to the exit of the pipe



Centrifugal Pumps

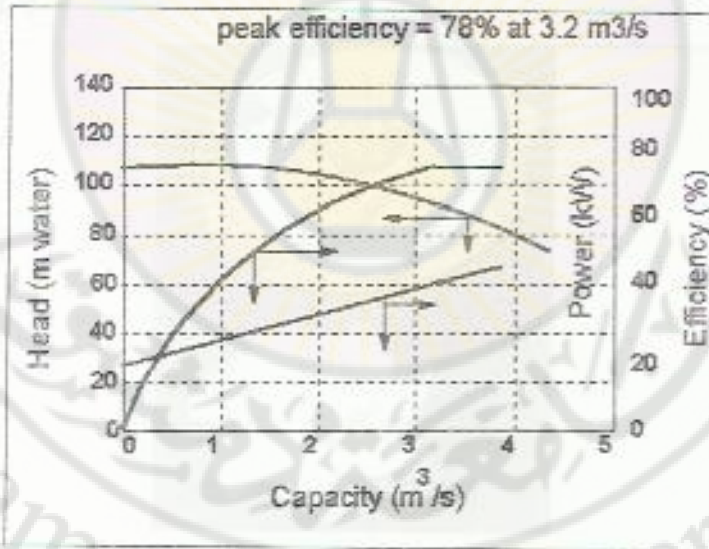
impeller - 4 blades



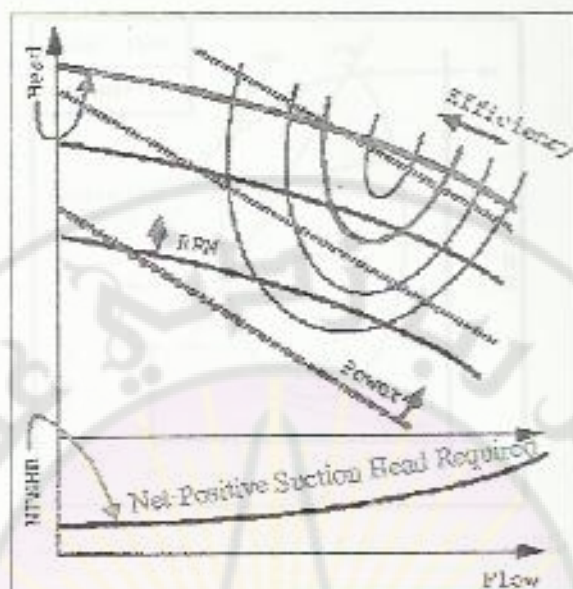
شكل (3-52) مخطط لبعض مضخات طرد مركزية وبعض الدفعات المستخدمة

5-3-3- منحنيات الأداء لمضخات الطرد المركزي:

يبين الشكل (53-3) العلاقة بين معدل التدفق (السعة) وكل من الضغط، والقدرة، والكفاءة. يتضح مما سبق أن مضخة الطرد المركزي تعمل على نقل كمية محددة من الطاقة إلى السائل، وإذا كان الضغط الخلفي مرتفعاً على المضخة، فسوف يحتاج السائل إلى طاقة أكبر عما لو كان الضغط الخلفي عليها، ويتضح ذلك في الشكل (54-3) عند سرعة محددة للمضخة. نلاحظ أن نقطة تشغيل المضخة معينة تدار بسرعة معينة، هي إحدى نقط متعددة على هذا المنحنى الذي يحدد سلوك المضخة عند تشغيلها في أحوال مختلفة، فيمكن تشغيل المضخة عند أي نقطة في المنحنى ابتداء من أقصى اليسار حيث يكون صمام الطرد مغلقاً، ولا تصريف للمضخة، إلى آخر نقطة في اليمين حيث أقل ضغط تعمل عنده المضخة.



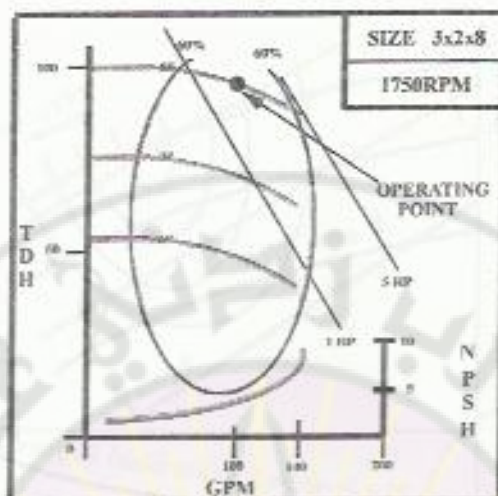
الشكل (53-3) العلاقة بين معدل التدفق (السعة) وكل من الضغط، والقدرة، والكفاءة



الشكل (54-3) العلاقة بين السعة وكل من الضغط، والقدرة، والكفاءة

6-3-3- القوانين التي تحكم أداء المضخات Affinity Laws:

- قوانين مضخة الطرد المركزي.
- أداء مضخة الطرد المركزي.
- أداء مضخة الطرد المركزي يتأثر بالتغير في سرعة الدوران وقطر الدفاعة كما في شكل (55-3) حيث:
- معدل التدفق (السعة) $Q = \text{Capacity (GPM or m}^3/\text{s)}$.
- قطر الدفاعة $D = \text{Impeller Diameter}$.
- ضغط السائل معبراً عنه بوحدة وزن السائل TDH Total Dynamic Head (Feet or meter).
- القدرة $P = \text{power (BHP (IHP) or Watts)}$.
- سرعة الدوران (عدد اللفات في الدقيقة) $N = \text{Speed (RPM)}$.



شكل (55-3) منحنيات أداء مضخة طرد مركزي عند أقطار مختلفة للدفاع

7-3-3- قوانين مضخة الطرد المركزي عند ثبات قطر اللولاب (التوربين) وتغير سرعة دورانها:

معدل التدفق Flow:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

مثال 1:

$$Q_1 = 100 \frac{m^3}{h}$$

$$N_1 = 1750 \text{ RPM}$$

$$N_2 = 3500 \text{ RPM}$$

$$Q_2 = 200 \frac{m^3}{h}$$

الضغط Head:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2}$$

مثال 2:

$$H_1 = 100 \text{ m}$$

$$N_1 = 1750$$

$$N_2 = 3500$$

$$100/H_2 = 1750 \times 1750 / 3500 \times 3500$$

$$H_2 = 400 \text{ Ft}$$

الاستطاعة (BHP) P :Horsepower

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{N_1^3}{N_2^3}$$

مثال 3:

إذا كان $P_1 = 5 \text{ HP}$

$$P_2 = 1750 \times 1750 \times 1750 / 3500 \times 3500 \times 3500$$

$$P_2 = 40 \text{ HP}$$

ويمكننا بذلك استنباط منحنيات الأداء من المنحنى الأصلي، لتبين منحنيات الأداء عند سرعات مختلفة.

قوانين مضخة الطرد المركزي عند ثبات سرعة دورانها وتغير قطر دفاعاتها التوربينية.

معدل التدفق Flow:

$$Q_1 / Q_2 = D_1 / D_2$$

مثال 4:

$$100/Q_2 = 8/6$$

$$Q_2 = 75 \text{ m}^3/\text{h}$$

الضغط Head:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2}$$

مثال 5:

$$100/H_2 = 8*8/6*6$$

$$H_2 = 56.25 \text{ Ft}$$

الاستطاعة (BHP) Horsepower:

$$BHP_1/BHP_2 = 8*8*8/6*6*6$$

$$BHP_2 = 2.1$$

كفاءة مضخة الطرد المركزي η

= (الاستطاعة المستفاد / الاستطاعة المعطاة)

$$\eta = (\text{Powerout} / \text{Pourinput}) = P_{\text{out}} / P_{\text{in}}$$

حيث إن القدرة المستفاد تعطى كالآتي:

$$P_{\text{out}} = \frac{\dot{V} * \rho * H * g}{\eta}$$

حيث:

$\dot{V}$: تدفق السائل m^3/s

ρ : كثافة السائل Kg/m^3

H : الارتفاع المانومتري m

P : استطاعة المضخة.

الوزن النوعي للماء (specific gravity - SG) = 1.0

مثال 6:

$$BHP = (100 \text{ GPM}) * (95 \text{ Ft}) * (1.0) / 3960 * 0.6$$

$$BHP = 4.0$$

أو

$$P_{out} = \dot{V} * \Delta p$$

حيث:

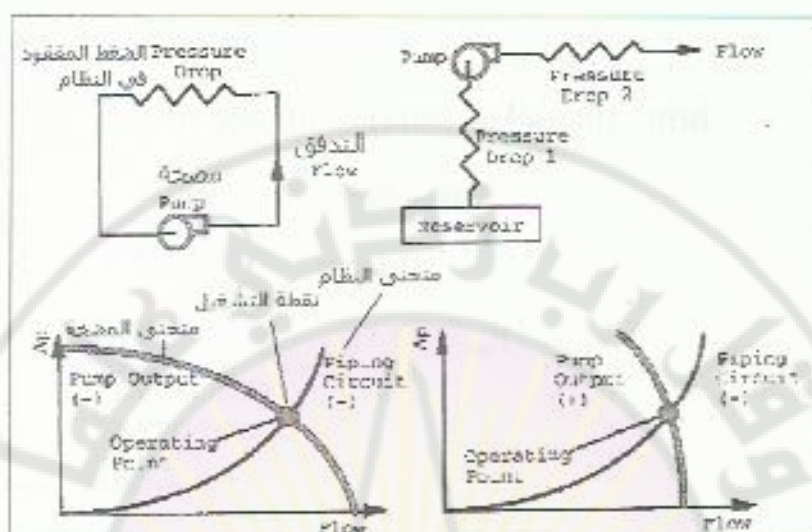
$\dot{V}$: معدل التدفق m^3/s .

ΔP : فرق الضغط $\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa}$.

ملحوظة: $IHP = 746 \text{ Wats}$

أداء مضخة الطرد المركزي عند استخدامها في نظام (شبكة أنابيب لتوزيع السائل المضخوخ):

وظيفة المضخة أن تضخ معدلاً معيناً من التدفق من السائل على أن تولد ضغطاً يتغلب على المقاومات التي تسبب هبوطاً في الضغط نتيجة جريان السائل في الأنابيب والمبادلات الحرارية وخطوط الاستقبال. يبين شكل (3-56) منحنى الأداء لمضخة مع منحنى الأداء للنظام. نقطة تشغيل المضخة التي نقي بالغرض المطلوب منهاء أي النقطة التي نقي بخواص كل من المنحنيين، هي نقطة تقاطعهما إذا تم رسمهما على نفس المخطط ونفس الوحدات كما يتضح من الشكل (3-56). فإذا درست المضخة بسرعة (عدد لفات/ الدقيقة) أيضاً فسوف يقل إنتاجها.



شكل (3-56) بعض تطبيقات استخدامات مضخات الطرد المركزي

8-3-3 تشغيل المضخات على التوازي:

تقوم عدة مضخات بالتصريف إلى نظام واحد، ويمكن الحصول على منحنى الأداء للمجموعة وذلك بجمع جميع كميات التدفق لكل مضخة عند كل نقطة ضغط. إن الفرضية التي تفترض أنه عند تشغيل مضختين على التوازي سيزيد التدفق زيادة كبيرة، هذا غير صحيح. لمعرفة الزيادة في التدفق يجب حساب العلاقة بين الضغط ومجموع تدفق المضختين عند كل نقطة ضغط.

9-3-3 تشغيل المضخات على التوالي:

ينتج عن تشغيل المضخات الطاردة المركزية زيادة في كمية التدفق وكذلك زيادة كبيرة في الضغط المتولد (مجموع الضغط لنفس نقطة التدفق)، مما يعرض النظام إلى خطورة انفجار في عناصر النظام وعليه يجب مراقبة هذا النظام مراقبة جيدة. وهو يعتبر حلاً رخيصاً عندما يراد التغلب على ضغط خلفي عال على أن يكون التدفق المطلوب ثابتاً.

4-3- المراوح:

مهمة المراوح دفع الهواء من مكان إلى آخر (وسط خارجي إلى وسط داخلي غير قلتر). يمكن للمراوح تأمين فرق ضغط حتى 30000 Pa.

4-3-1 أنواع المراوح:

تصنف المراوح حسب مبدأ العمل إلى نوعين أساسيين هما:

1- المراوح الطاردة المركزية:

يصنف هذا النوع من المراوح حسب الضغط الذي تؤمنه أو حسب تركيب الشفرات وشكلها وحسب مجال الاستخدام يوضح الشكل (3-57) مبدأ عمل المراوح الطاردة المركزية. يدخل الهواء بشكل عمودي على المحور ويخرج بشكل عمودي أو مواز للمحور.

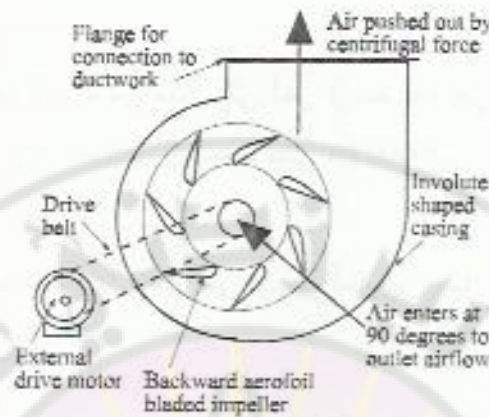
2- المراوح المحورية:

يدخل ويخرج الهواء في هذا النوع من المراوح بشكل مواز للمحور كما هو مبين في الشكل (3-58) حيث تتألف المروحة المحورية بشكل أساسي مما يلي:

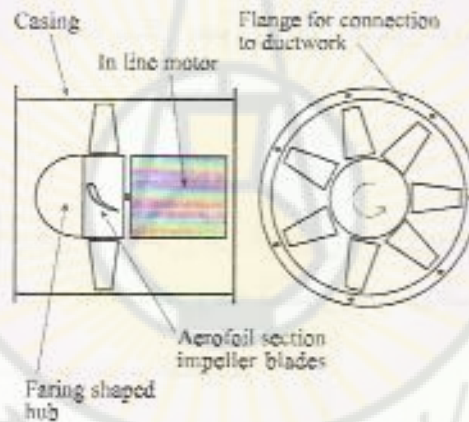
1- الغاية، 2- دواليب الشفرات والمحرك.

يمكن أن تصنف هذه المراوح حسب فرق الضغط والشكل وطريقة التركيب ومادة الصنع ومجال الاستعمال والتدفق أيضاً. تتميز المراوح المحورية عن الطاردة المركزية بصغر الحجم ورخص الثمن وسهولة التحكم بالشفرات.

بالمقابل لها مساوئ منها ارتفاع الضجيج وضيق مجال العمل وصعوبة الصيانة.



الشكل (57-3) المراوح الطاردة المركزية



الشكل (58-3) المراوح المحورية

3-4-2- استطاعة المراوح:

حساب استطاعة المروحة وفقاً للعلاقة التالية:

$$P_G = \frac{V \cdot \Delta P}{\eta_G}$$

حيث:

P_G : استطاعة المروحة .W

$\dot{V}$: تدفق الهواء m^3/s

ΔP : مفاقيد الضغط N/m^2 .

η_{Gi} : مردود المروحة.

عند اعتبار استطاعة دوران المروحة بدون حمل تحسب الاستطاعة الكلية للمروحة كما يلي:

$$P_G = \frac{V * \Delta P}{\eta_{Gi}} + P_{G0}$$

حيث:

P_{G0} : استطاعة المروحة بدون حمل أي $V = 0$ (W).
مفاقيد الضغط:

إما أن نقاس أو تحسب كما يلي:

$$\Delta P = c * v^2$$

حيث:

c : ثابت $N.s^2/m^4$.

v : سرعة الهواء m/s .

مساحة مقطع جريان الهواء اللازم بحسب بالعلاقة التالية:

$$\Delta L = \frac{\dot{V}}{v}$$

الرياح الحراري من تنفق الهواء (حمل التدفئة اللازم):

$$Q_L = c_p * V * \Delta T_L$$

حيث:

c_p : السعة الحرارية الحجمية للهواء $J/m^3.K$.

ΔT_L : فرق درجات حرارة الهواء t (K).



الفصل الرابع

وسائط التبريد للدارات البخارية

الانضغاطية - الامتصاصية الثنائية للمضخات الحرارية

4-1- وسائط التبريد وخصائصها:

وسائط التبريد Refrigerants:

وسيط التبريد هو عبارة عن مادة تعمل على نقل الحرارة من داخل غرفة أو حيز إلى الخارج، فمثلاً في جهاز التبريد الأساسي يتبخر وسيط التبريد السائل في المبخر مكتسباً كمية من الحرارة يفقدها عند مروره على المكثف، كذلك وسيط التبريد هو عبارة عن المادة التي يمكن تحويلها بسهولة من سائل إلى بخار وبالعكس. المواد المستعملة وسائط للتبريد يجب أن تتوفر لديها الخواص التالية:

- ١ - يجب أن تكون غير سامة Non-poisonous.
- ٢ - يجب أن تكون غير قابلة للانفجار Non - explosive.
- ٣ - يجب أن تكون غير قابلة تسبب التآكل Non - corrosive.
- ٤ - يجب أن تكون غير قابلة للاشتعال Non - flammable.
- ٥ - يجب أن تكون سهلة الاكتشاف عند تسربها.
- ٦ - يجب أن تكون سهلة التحديد عند تسربها.
- ٧ - يجب أن يعمل الوسيط على ضغط منخفض (درجة غليان منخفضة).
- ٨ - يجب أن يكون مستقر في الحالة الغازية.
- ٩ - يجب أن يكون غير ضار بجسم الإنسان عند التلامس.
- ١٠ - يجب أن يكون مستقر كيميائياً - لزجاً - رخيص السعر.

- يجب أن تكون نسبة حجم الوسيط السائل إلى كتلته عالية ليحصل ذلك على زيادة كفاءة أجهزة التحكم.

- يجب أن تكون نسبة حجم الوسيط المتبخر إلى كتلته بسيطة لتقليل الحمولة على الضاغط.

- يجب أن تكون الحرارة الكامنة للوسيط عالية لتعطي ذلك درجة أفضل من التبريد لكل Kg من البخار يتم ضغطه.

- الفرق بين الضغط في المكثف والمبخر يجب أن يكون قليلاً لتسهيل عملية الانضغاط على الضاغط وبالتالي إلى ارتفاع كفاءته.

نقسم وسائط التبريد إلى ثلاث مجموعات:

- المجموعة الأولى Group I: وهي الوسائط الأكثر أماناً (الهالوكاربونات - عائلة الفريون) مثال ذلك: R-12، R-22، R-502، R-134، R-404a، R-407a، R-411b.

- المجموعة الثانية Group II: سامة ولحد ما قابلة للاشتعال، مثال ذلك (Methyl chloride) R-40 و (Sulfur dioxide) R-764.

- المجموعة الثالثة Group III: وهي مجموعة وسائط التبريد القابلة للاشتعال، مثال ذلك (Ethane)، (Propane) R-290 - R-170.

أيضاً تنقسم وسائط التبريد إلى قسمين:

1- وسائط التبريد الأولية Primary Refrigerants:

وسائط التبريد مثل R-12، R-22، R-502 تسمى بوسائط التبريد الأولية Primary Refrigerants لأنها تغير حالتها عند اكتسابها أو فقدانها للحرارة (تحول طورى).

2- وسائط التبريد الثانوية Secondary Refrigerants:

وسائط التبريد الثانوية الأكثر استعمالاً هي الماء، كلوريد الكالسيوم، كلوريد الصوديوم، المحاليل الملحية (brines)، الإيثانول، الميثانول (methyalcohol) والجلسرين.

1-1-4- وسائل التبريد الأولية Identifying Primary Refrigerants

يعرف وسيط التبريد الأول بالحرف (R) متبوعاً بثلاثة أعداد وذلك وفقاً للتسمية التي أطلقتها عليها الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة، التبريد والتكييف (ASHRAE).

يتم تقسيم وسائل التبريد (الغريونات) إلى:

- 1- الكلوروفلوروكاربونات (Chlorofluorocarbons CFCs) وهي تتكون من الكربون، الفلور والكلور (بدون هيدروجين) مثال: R11, R12, R114.
- 2- الهيدروكلوروفلوروكاربونات (Hydrochlorofluorocarbons or HCFCs) وهي تتكون من الكربون، الفلور، والكلور والهيدروجين مثال ذلك: R-22 or R-123.
- 3- الهيدروفلوروكاربونات Hydrofluorocarbons or HFCs وهي التي تكون خالية من ذرات الكلور، مثل: R410a- R407c-R404a وهي صديقة البيئة.
- 4- وسائل مركبة: تتكون من مزيج من وسيطين للتبريد ولا اتسيوتروبي مزيج اتسيوتروبي.

التركيب الكيميائي لوسائل التبريد الأولية:

1- الفلوروكربونات: Fluorocarbons

الرقم الأول - عدد ذرات الكربون - 1

عدد ذرات الكربون - الرقم الأول + 1

في حالة عائلة الغريونات R11,.....,R22 للرقم الأول صفر.

وعليه يتضح أن عدد ذرات الكربون - صفر + 1 = 1

الرقم الثاني = عدد ذرات الهيدروجين - 1

عدد ذرات الهيدروجين - الرقم الثاني - 1

عدد ذرات الفلور - الرقم الثالث

عدد ذرات الكلور = الذرات المتبقية

مثال 1:

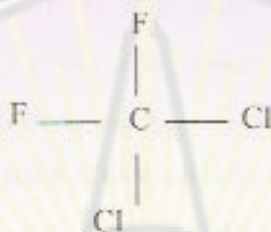
فريون 12 R12 Dichlorofluoromethane

عدد ذرات الكربون - 1 + 1 = 1

عدد ذرات الهيدروجين - 1 - 1 = 0

عدد ذرات الفلور - 2 = 2

التركيب:



R12

∴ عدد ذرات الكلور = 2

عليه يصبح التركيب الكيميائي لفريون R12 هو CCl_2F_2

مثال 2:

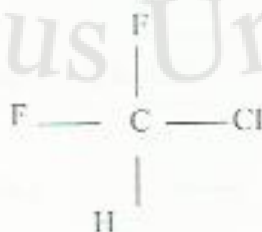
فريون 22 R22 Monochlorofluoromethane

عدد ذرات الكربون - 1 + 1 = 1

عدد ذرات الهيدروجين - 2 - 1 = 1

عدد ذرات الفلور = 2

التركيب:



∴ عدد ذرات الكلور = 1

عليه يصبح التركيب الكيميائي لفرين R12 هو CHClF_2 عائلة HFC (الهيدروفلوروكربونات).

مثل:

وسيط التبريد (Tetrafluoroethane) $(\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F})$

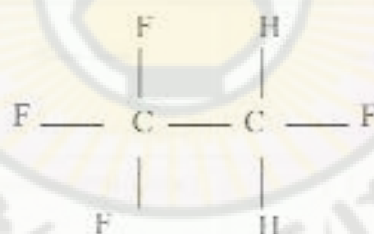
الرقم الأول = عدد ذرات الكربون - 1 = 2 - 1 = 1

العدد الثاني = عدد ذرات الهيدروجين + 1 = 2 + 1 = 3

العدد الثالث = عدد ذرات الفلور = 4

- لا يوجد كلور

- التركيب



- إذن رقم وسيط التبريد $(\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F})$ هو R134a

2- وسائط التبريد غير العضوية Inorganic Refrigerants

تميز بالوزن الجزيئي $700 + R (700 + mwt)$

مثال (1):

النشادر (الأمونيا) NH_3

الوزن الجزيئي للأمونيا $17 = 3 + 14$

عليه يصبح تمثيل النشادر هو R717

كما أن أسطوانات حفظ وسيط التبريد تعرف كل أسطوانة وسيط تبريد معين بلون معين لتسهيل معرفة نوعية وسيط التبريد الذي تحتويه الأسطوانة. جدول (1-4) يوضح للتركيب الكيميائي لبعض وسائط التبريد المستعملة مع بيان لون الأسطوانة الذي يحفظ فيه ذلك الوسيط.

جدول (1-4): لون أسطوانات بعض وسائط التبريد

لون أسطوانة الوسيط	الاسم العام	الصيغة	وسيط التبريد
برتقالي Orange	Trichloromonofluoromethane	(CCl_3F)	R11
أبيض White	Dichlorodifluoromethane	(CCl_2F_2)	R12
أزرق فاتح Pale Blue	Monochlorotetrafluoromethane	$(CClF_3)$	R13
أرجواني Purple	Tetrafluoroethane	(CF_3CF_2F)	R134a
أخضر Green	Monochlorodifluoromethane	$(CHClF_2)$	R22
أحمر بنفسجي Orchid	Monochlorotrifluoromethane	(CH_2ClF)	R40
خفيف Orchid	-	$(48.8\%R22 + 51.2\%R115)$	R502
فضي Silver	Ammonia	(NH_3)	R717

ولوسائط التبريد المذكورة سابقاً، سوف تتم مقارنة الخصائص التالية:

الخصائص الحرارية Thermodynamic Properties:

أ- درجة الحرارة والضغط Temperature & Pressure:

درجة الغليان (boiling point) لمختلف وسائط التبريد عند الضغط الجوي بينها

الجدول (2-4):

جدول (2-4): درجة الغليان لبعض وسائط التبريد عند الضغط الجوي

نوع وسيط التبريد	درجة الغليان (°C)
R11	23.7
R12	-29.4
R13	-81.4
R134a	-26.1
R22	-40.8
R40	-11.8
R502	-46.0
R717	-33.0

تتغير وسائط التبريد عند تغير الطور وتُعطى دائماً في جداول كما في الجدول

(3-4) الخاص بـ R134a مبيناً فيه درجة حرارة الإشباع (T) وضغط الإشباع

(P)، الحجم النوعي (V) في حالة السيولة والغازية وأيضاً طاقة الإنثالبي (h) عند

السيولة والغازية كما يبين الجدول أيضاً الحرارة الكامنة:

جدول (3-4): جزء من جدول وسيط التبريد R134a

درجة الحرارة	الضغط	الحجم النوعي		طاقة الإنثالبي		الحرارة الكامنة
T {°C}	P {bar}	V' {l/kg}	V'' {l/kg}	H' {kJ/kg}	H'' {kJ/kg}	L {kJ/kg}
-26	1.020	0.726	188.56	166.35	381.71	215.37
-25	1.067	0.728	180.67	167.59	382.34	214.75
-24	1.116	0.730	173.18	168.84	382.97	214.13

وخاصية الضغط بالنسبة لوسائط التبريد هامة جداً حيث إن وسائط التبريد التي

تعمل عند ضغوط مرتفعة تحتاج إلى أجهزة قوية لتحمل ذلك الضغط وغالباً ما تكون

هذه الأجهزة غالية الثمن.

ب- الحجم النوعي (v) Specific volume:

يتم مقارنة الحجم النوعي لوسائط التبريد عند 15°C - درجة تبخير - وعند حالة التشبع الغازية (X=1) - والجدول (4-4) يوضح تلك القيم:

جدول (4-4): الحجم النوعي لبعض وسائط التبريد

وسيط التبريد	الحجم النوعي (L/Kg)
R11	766.73
R12	91.45
R13	-
R40	279.3
R134a	120.15
R22	77.70
R502	50.02
R717	507.9

ج- الحرارة الكامنة والتأثير التبريدي:

جدول (5-4): الحرارة الكامنة والتأثير التبريدي لبعض وسائط التبريد

وسيط التبريد	الحرارة الكامنة* (Kj/Kg)	التأثير التبريدي* (Kj/Kg)	معدل سريان وسيط التبريد (Kg/min/Kw)
R11	195.30	156.73	0.383
R12	159.55	117.16	0.512
R134a	208.29	146.96	0.408
R22	217.00	162.47	0.369
R40	-	349.058	0.172
R502	156.61	104.39	0.575
R717	1311.3	1104.68	0.054

* التأثير التبريدي عند 15°C - درجة تبخير و 30°C درجة تكثيف

♦ الحرارة الكامنة عند 15°C - درجة تبخير .

الخصائص الفيزيائية Physical Properties:

الخصائص الفيزيائية هي الخصائص التي ليس لها تأثير مباشر على كمية الحرارة التي يمكن أن يمتصها وسيط التبريد لو يفقدها وتعتبر الخصائص الفيزيائية هذه أساسية عند اختيار وسيط التبريد، ومن هذه الخصائص الفيزيائية نذكر التالي:

أ- ذوبان وسيط التبريد في الزيوت Oil Miscibility:

ذوبان وسائط التبريد في الزيوت له مزايا ومساوئ، ومن مزايا ذوبان وسيط التبريد مع الزيوت تسهيل عملية التشحيم والسهولة النسبية لرجوع الزيت مرة أخرى للضاغط. أما أهم عيوب ذوبان وسيط التبريد في الزيت هو تخفيف الزيت في الضاغط ورداءة انتقال الحرارة بواسطة الزيت.

الجدول (6-4) يوضح قابلية بعض وسائط التبريد للذوبان في الزيت:

جدول (6-4): ذوبان بعض وسائط التبريد في الزيت

هل يذوب وسيط التبريد مع الزيت؟	وسيط التبريد
نعم	R11
نعم	R12
نعم	R13
نعم	R40
لا	R134a
نعم	R22
لا	R717

ب- الرائحة Odor:

جدول (4-7)

وسيط التبريد	وسيط التبريد سام
R11	أثيرية لحد ما slightly ethereal
R12	أثيرية لحد ما slightly ethereal
R22	أثيرية لحد ما slightly ethereal
R502	أثيرية لحد ما slightly ethereal
R717	لاذعة pungent

ج- سلامة وسيط التبريد (Safety):

يجب أن يكون وسيط التبريد المستعمل في دارات التبريد غير سام وغير قابل للانفجار (الاشتعال) وذلك لضمان سلامة الذين يتعاملون مع مثل هذه الوسائط. الجداول التالية توضح مدى سلامة بعض وسائط التبريد:

جدول (4-8): سمية بعض وسائط التبريد

وسيط التبريد	وسيط التبريد سام
R11	لا
R12	لا
R13	لا
R40	نعم
R134a	لا
R22	لا
R502	لا
R717	نعم

جدول (4-9) قابلية بعض وسائط التبريد للاشتعال أو الانفجار

وسيط التبريد	وسيط التبريد قابل للاشتعال والانفجار
R11	لا
R12	لا
R40	نسبياً
R134a	لا
R22	لا
R502	لا
R717	نسبياً

د- الرطوبة في وسائط التبريد:

إن وجود الرطوبة (الماء) في أنظمة التبريد والمضخات الحرارية يعرض أنظمة التحكم للتلوث نتيجة الانسداد وذلك عندما تتجمد المياه وتتحول إلى ثلج صلب عند درجات الحرارة المنخفضة. كذلك فإن وجود المياه مع بعض وسائط التبريد عند درجات الحرارة العالية (بعد الضاغط) يكون له تأثير ضار حيث يعمل على تحلل وسيط التبريد ويتحد مع الماء مكوناً أحماضاً قد تكون ضارة جداً. كذلك فإن وجود المياه قد يسبب الصدأ والتآكل أو تحلل زيت التبريد في الضاغط مما يعرض المحرك الكهربائي للاحتراق خاصة في الضواغط المغلقة التي لا يمكن الكشف عن حالة الزيت بها أثناء الظروف العادية في العمل.

وبما أنه من الصعب إزالة كل الرطوبة من وسيط التبريد، فإن كمية الرطوبة يجب أن تكون في الحدود المسموح بها. علماً بأن كمية الرطوبة المسموح بها تتوقف على:

1- نوع وسيط التبريد:

الجدول (10-4) يوضح الحدود المسموح بها لكمية الرطوبة لبعض أنواع وسائط التبريد بوحدات جزء لكل مليون جزء (ppm):

جدول (10-4) الرطوبة المسموح بها لبعض وسائط التبريد

وسيط التبريد	النسبة المسموح بها (PPm)	أقصى نسبة (PPm)
R134a	أقل من 5	أكبر من 15
R22	أقل من 30	أكبر من 100
R502	أقل من 15	أكبر من 50

كيميائياً يتغير لون وسيط التبريد مع زيادة نسبة الرطوبة، وعندما يدل لون المبيّن على أن نسبة الرطوبة في وسيط التبريد أصبحت مرتفعة فإنه يجب تغيير المجفف فوراً.

2- أقل درجة حرارة موجودة في النظام:

الجدول (11-4) يوضح نسبة الرطوبة المسموح بها عند درجات الحرارة المختلفة: جدول (11-4): نسبة الرطوبة عند درجات الحرارة المختلفة

نسبة الرطوبة					درجة الحرارة
R13B1	R502	R500	R22	R12	°C
2	40	48	120	1.7	-40
5	69	81	195	3.8	-20
10	115	129	308	8.3	0
21	180	200	472	17	20
40	278	293	690	32	40

يلاحظ أن كمية الرطوبة المسموح بها تزداد بازدياد درجة الحرارة.

و- اختبار التسريب (عدم الإحكام):

لاختبار تنقيس دارة التبريد يلزم أولاً رفع ضغط وسيط التبريد الموجود بداخلها وبعد ذلك يتم فحص كل جزئية من الدارة يحتمل حدوث التنقيس به. وفي الحالة التي لم تشحن الدائرة بوسيط التبريد يكون من الأوفر في مثل هذه الحالة شحنها جزئياً بوسيط التبريد حتى يرتفع الضغط داخلها إلى حوالي 40Mpa، وبعد ذلك يستعمل غاز النيتروجين الجاف أو ثاني أكسيد الكربون الجاف. هذا الضغط يمكن رفعه إلى 180Mpa في المنشآت الكبيرة أو إلى 80Mpa في المنشآت الصغيرة وهذا الضغط كاف لإجراء اختبار التسرب بدقة عالية.

توصل كل من أسطوانة غاز النيتروجين الجاف وأسطوانة وسيط التبريد بدارة التبريد المراد اختبار التنقيس فيه.

الاحتياطات الواجب مراعاتها عند اختبار التنقيس بواسطة النيتروجين:

- لا يستعمل قط غاز الأكسجين لرفع ضغط دارة التبريد لأن ذلك قد يحدث انفجاراً عند تلامسه مع الزيت الموجود بدارة التبريد.

- يجب تركيب منظم للضغط مجهز بأجهزة قياس للضغط على أسطوانة النيتروجين.

- يجب تركيب بلف (صمام) تصريف (Relief Valve) على الأنبوب بدارة المضخة الحرارية وذلك حتى يمكن تلاقي ارتفاع الضغط داخل دائرة التبريد فوق الحد المسموح به.

- يجب تركيب بلف عدم رجوع (Check valve) بعد أسطوانة وسيط التبريد مباشرة وذلك لمنع رجوع وسيط التبريد إلى الأسطوانة، مع ملاحظة أن ضغط أسطوانة غاز النيتروجين الكامل قد يسبب انفجاراً لأسطوانة وسيط التبريد أو أجزاء من دورة التبريد في حالة عدم وجود بلف التصريف ولف عدم الرجوع.

الطرق المختلفة للكشف عن أماكن التسريب:

1- الكشف بواسطة لمبة التجربة (بوساطة الذهب).

2- الكشف بواسطة رغوة كاشفة (محلول الرغاوي).

3- الكشف باستخدام جهاز الكشف الإلكتروني.

1- الكشف بواسطة لمبة التجربة (بوساطة الذهب) - مشعل هاليد:

تعبأ لمبة التجربة بواسطة غاز البيوتان أو الكحول الميثيلي أو غاز الإيثيلين ويتم بعد ذلك إشعال الذهب. يتم بعد ذلك إمرار الخرطوم المطاطي المتصل باللمبة على أماكن الوصلات فإذا تغير لون الذهب من الأزرق إلى الأخضر فإن ذلك يدل على وجود تسرب في هذا المكان.

2- الكشف بواسطة رغوة كاشفة (محلول الرغاوي):

في هذه الطريقة يتم تغطية الوصلات برغوة كاشفة (مواد كيميائية أو مسحوق الصابون المذاب في الماء) حيث تتصاعد فقاعات غازية عند مكان التسرب.

3- الكشف باستخدام جهاز الكشف الإلكتروني:

عند تشغيل الجهاز فإنه يصدر عنه إشارة صوتية تختفي تدريجياً مما يدل على أن الجهاز صالح للعمل يمرر الجزء الحساس على الوصلات فإذا أحدث صوتاً فإن هذا يدل على وجود تسرب وسيط التبريد في ذلك المكان.

كيفية تحديد الوسيلة المناسبة لكشف التسريب How to Choose a leak Detector:

كما عرفنا سابقاً إن تسرب وسائط التبريد (مثل الكلوروفلوروكربونات (CFCs) يؤدي إلى تلوث البيئة. ومن المؤسف أنه في بعض الأحيان لا يعلم بتسرب وسيط التبريد إلا بعد ملاحظة انخفاض أداء عمل وحدة التبريد؛ حينها يكون وسيط التبريد قد تسرب إلى الخارج.

بعض الخصائص والميزات لبعض وسائط التبريد:

وسيط التبريد فريون CCl_3F Trichloromonofluoromethane R11

- درجة غليانه 23.7°C عند الضغط الجوي.
- يتفاعل مع طبقة الأوزون (مخرب لها) $\text{ODP}=1$
- غير سام.
- غير قابل للاشتعال.
- لا يحدث تآكلاً لكنه يذيب المطاط.
- يستعمل مع ضواغط الطرد المركزية.
- يستعمل على أنه منظف من الرطوبة لأجزاء دائرة التبريد.
- يستعمل منظفاً للضواغط عند استبدالها.
- يمكن الكشف عليه بوساطة مشعل (هاليد) Halide torch.
- يحفظ في أسطوانات برتقالية اللون.

وسيط التبريد (CCl_2F_2) Dichlorodifluoromethane R12

- كان أكثر عائلة الفريون استعمالاً.
- درجة غليانه -29.4°C .
- غير سام، وغير قابل للاشتعال أو الانفجار.
- مستقر كيميائياً.
- يذوب في الزيت إلى درجة -68°C مما يجعل الزيت يتكون في المبخر البارد ثم يبدأ الزيت في الانفصال عن وسيط التبريد وبما أن الزيت أخف من الوسيط فإنه يمكن تجميعه على سطح الوسيط السائل.
- يمكن الكشف عليه بوساطة مشعل (هاليد) Halide torch.
- يحفظ في أسطوانات بيضاء اللون.

وسيط التبريد (R134a) ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$) Tetrafluoroethane:

- من مكونات HFC وهو البديل للفلورون R12.
- يستعمل في الضواغط الدورانية، الحلزونية، التدرجية وضواغط الطرد المركزي.
- غير سام، وغير قابل للاشتعال والانفجار ولا يأكل المعادن.
- درجة غليانه 26.1°C .
- عندما تكون درجة حرارة المبخر بين 29°C و 40°C فإن الضغط في المبخر يكون أعلى من الضغط الجوي في حالة R22 أما بالنسبة R12 فإن الضغط يكون أقل من الضغط الجوي عند نفس هذه الدرجات.
- ما عدا ذلك فإن الوسيط R12 هو الأفضل نظراً لانخفاض درجة حرارة التصريف وامتزاجيته للتامة للزيت.

وسيط التبريد (R502) ($\text{CHClF}_2 + \text{C}_2\text{ClF}_5$) (R22+R115) (فريون 502):

- يتكون من 48.8% من R22 + 51.2% من R115.
- غير قابل للاشتعال وغير سام.
- لا يأكل المعادن.
- مناسب للحصول على درجات حرارة منخفضة ومتوسطة (من 18°C إلى -51°C).
- يستخدم في الضواغط الترددية فقط.
- درجة غليانه 46°C عند الضغط الجوي.
- يجمع بين المميزات الجيدة لكل من R12 و R22.
- يعطي سعة التبريد لفريون R22 مع درجة حرارة تكثيف R12 أي بضغط تصريف (Condensing Pressure) قليل نسبياً مما يطيل من عمر الضاغط وعمر الصمامات وبقية أجزاء الضاغط.

- له خواص تزييت جيدة نسبة لزيادة درجة لزوجة الزيت مع درجة حرارة التكثيف المنخفضة.

- بسبب انخفاض درجة حرارة المكثف فإن الضاغط لا يحتاج إلى تبريد كما يحدث لفرين 22 (R22).

- يحفظ في أسطوانات (Orchid) اللون.

وسيط التبريد (فرين 22) (R22) Monochlorodifluoromethane (CHClF_2):

- درجة غليانه -40.8°C

- يستعمل في مجموعات تبريد والمضخات الحرارية ذات درجات الحرارة المنخفضة التي تستخدم في المصانع والمتاجر، كذلك يستخدم بكثرة في وحدات تكييف الهواء الشبكية والمنفصلة والمركبة.

- يختلط بالماء أكثر من فرين 12؛ لذا يلزم استعمال مجففات للتخلص من الندوة.

- ينوب في الزيت إلى درجة حرارة -9°C وينفصل عن الزيت بنفس الطريقة المذكورة سابقاً.

- يمكن الكشف عليه بوساطة مشعل (هاليد) Halide torch.

- يحفظ في أسطوانات خضراء اللون.

مزايا وسيط التبريد 22 على الوسيط 12:

- صغر إزاحة الضاغط اللازمة حيث تصل إلى 60% تقريباً من الإزاحة اللازمة عند استخدام فرين 12 فإذا أخذنا ضاغطاً ذا إزاحة معينة فإن سعة التبريد عند استخدام R22 تكون أكبر بحوالي 60% من سعة التبريد عند استخدام R12.
- مواسير التبريد عند استخدام R22 تكون أصغر منها عند استخدام R12.

- قابلية الوسيط R22 لامتصاص الندواة (الرطوبة) أكبر بكثير من قابلية الوسيط R12 لذلك فإن R22 أقل تعرضاً لمشكلات تجمد الماء.
- النشادر (الأمونيا) R717 (NH₃).
- من وسائط التبريد غير العضوية.
- مستقر جداً.
- سام للغاية.
- قليل للاشتعال والانفجار لحد ما.
- لا يتفاعل مع الأوزون (ODP=0).
- معامل الأداء له أقل من فريون R12.
- يذوب في الماء عند درجة حرارة 25°C.
- يعياً في أسطوانات لونها أزرق خفيف light blue.
- غير منسجم مع الزيوت المعدنية.
- الفلتر له من النوع المنخل الغشائي (Molecular sieve).
- يجب عدم استعمال ممتص الرطوبة من نوع السيليكون الهلامي (silicone gel).
- يمكن استعمال رغاوي الصابون، الصبغ الفلورسنت (fluorescent dyes) والكشاف الإلكتروني.... الخ لكشف التسقيش.
- له خواص حرارية ممتازة ويعطي تأثيراً تبريدياً لكل kg أعلى من أي وسيط آخر لذا يستعمل في مصانع الثلج ومصانع التعليب وغرف التخزين الباردة الكبيرة.
- درجة غليانه هي 33°C عند الضغط الجوي.
- ضغط التشغيل (العالي والمنخفض) أعلى من R12 و R22 لذا فهو يحتاج إلى مواسير أقوى نسبياً.

- يعمل على تآكل المواد غير الحديدية كالتحاس والنحاس الأصفر لذا يجب تجنب استعمالهما.

- لا يمتزج مع الزيت - لذا يلزم عمل الاحتياطات لإزالة الزيت من المبخر وتركيب جهاز لفصل الزيت على خط التصريف في مجموعات النشائر .
يتم الكشف عليه باستخدام شموع من الكبريت لأنها تعطي دخاناً أبيض عند تلامسها مع النشائر .

4-2-1- وسائط التبريد الثانوية Secondary Refrigerants:

وسائط التبريد الثانوية الأكثر استعمالاً هي الماء، كلوريد الكالسيوم، كلوريد الصوديوم، المحاليل الملحية (brines)، الإثيلين، الميثانول (methyalcohol) والجلسرين.
الماء هو أكثر الوسائط الثانوية استعمالاً حيث يستعمل في أجهزة التكييف الضخمة وعمليات التبريد التي تصل درجة الحرارة المطلوب فيها أعلى من درجة حرارة التجمد للماء.

يعتبر الماء أجود الوسائط الثانوية وذلك للأسباب التالية:

- خواصه الانسيابية.

- حرارته النوعية عالية ($C_p=4.18\text{kJ/kg}$).

- رخيص الثمن.

- غير مسبب للتآكل نسبياً.

كلوروفلوروكربونات (CFCs) وطبقة الأوزون:

طبقة الأوزون تعمل على امتصاص أشعة بيتا فوق البنفسجية Uv-R Radiation لأن وجود كميات كبيرة من Uv-R Radiation يعني:

- تأثير على الجلد مما يسبب سرطان الجلد.

- إعتام عدسة العين للإنسان.

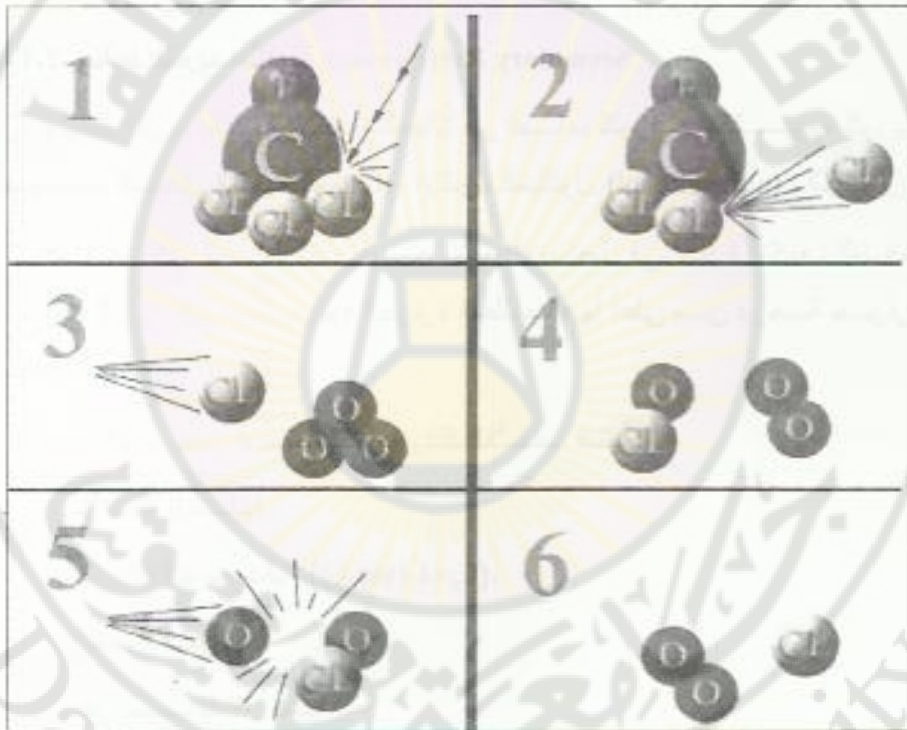
- ضعف نظام المناعة.

- التقليل من إنتاجية المحاصيل الزراعية.

- التأثير على المحيطات والأسماك.

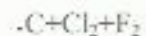
جزيئات الكلوروفلوروكربونات تنتشر خلال طبقة الجو العليا منذ 15-20 سنة

وعملت على تحطيم طبقة الأوزون كما هو موضح بالشكل (1-4).



شكل (1-4): الأثر البيئي للكلوروكربونات

1- الكلوروفلوروكربونات تتحلل عندما تصطدم بأشعة الشمس الينفيسجية لتعطي



2- الأشعة تعمل على فصل ذرة الفلورين.

3- ذرة الفلورين تصطدم بذرة الأكسجين (الأوزون).

4- الأوزون (O_3) يتفاعل مع الكلورين ليعطي Cl_2O .

5- غرة الأكسجين الحرة تصطدم مع Cl_2O .

6- أكسيد الكلورين يتحلل إلى $Cl_2 + O_3$.

ليصاً $3Cl_2 + O_3 = 3Cl_2O$ وهكذا

وذلك بوضح لنا التأثير الضخم لوسائط التبريد بالجهد الحراري العالمي (Global warming Potential, GWP) وهذه تساوي:

$$GWP = 1 \text{ For } CO_2$$

$$GWP = 0.05 \text{ for CFCs}$$

اتفاقية مونتريال لحماية طبقة الأوزون Montreal Protocol:

الاتفاقية تنص على التخلص تدريجياً من تصنيع وسائط التبريد الكلوروكربونات (CFCs) وذلك كالتالي:

- التخلص من تصنيع وسائط التبريد R12, R11 في الفترة من 1986-2000.

- لوسائط التبريد الكلوروفلوروكربونات (CFCs) الأخرى تكون فترة التخلص منها هي:

- 2015-2030 وخاصة R22.

- تم تعديل هذه الاتفاقية عدة مرات.

- الاتفاقية استتبت الدول النامية في الفترة الابتدائية حتى 2005.

- تم تصنيع بدائل لوسائط التبريد صديقة للبيئة مثال ذلك R134a.

- إعادة تشغيل وسائط التبريد مرة أخرى بعد تنقيتها وتنظيفها.

3-1-4- وسائط التبريد البديلة Alternative Refrigerants:

تم تصنيع بدائل لوسائط التبريد صديقة البيئة لتحل مكان وسائط التبريد القديمة (HFCs) و (HCFCs) لتعمل في مختلف مجالات التبريد وتكييف الهواء. الجدول (12-4) يوضح بعض البدائل واستخداماتها:

جدول (12-4): وسائط التبريد البديلة

وسيط التبريد	بديلاً عن	ملاحظات
R134a	R12	يستعمل لمثلجات المياه (صواغط الطرد المركزي أو الحثروني)
R407c (R32+R125)	R22	يستعمل في النظم المجمعة - مثلجات وحدات منفصلة
R410a (R32+R125)	للمعدات المجمعة فقط	يعطي لمصنعي المعدات اقتصادية في حجم الوحدة والصواغط
R417A (R218+R134a+R600A)	R12	يعمل مع النظام الموجود حالياً
R417a (R134a+R600a)	R22	يعمل مع النظام الموجود حالياً

للأسف، فإن الوسائط البديلة السابقة تؤثر على البيئة بظاهرة البيت الزجاجي (greenhouse effect) مما جعل بعض البلدان كالذيتماركة، النرويج والسويد تفكر في التخلص من مثل هذا النوع من وسائط التبريد، عليه بدأ التفكير في تكنولوجيا حديثة ووسائط تبريد بديلة كالتي تستعمل في الدارات الامتصاصية، من أمثلة الوسائط البديلة: أ- الهيدروكربونات HCs:

لها خصائص تبريد ممتازة مع تأثير قليل على البيئة، السبب الذي جعلها تستخدم في التلاجات المنزلية وبعض نظم التبريد التجارية وكذلك في نظم تكييف الهواء. ولكن هذه الوسائط لها قابلية للاشتعال؛ عليه يلزم استعمال وسائل سلامة أكبر.

ب- النشادر R717 (NH_3): Ammonia

كما ذكرنا سابقاً يستعمل بكثرة في صناعة الأغذية ومضازن التبريد نسبية لخصائصه التبريدية الجيدة. النشادر له $\text{ODP}=0$ و $\text{GWP}=0$ غير أنه سام وقابل للاشتعال في ظروف معينة.

ج- ثاني أكسيد الكربون R744 (CO_2): Carbon dioxide

من حيث السلامة له $\text{ODP}=0$ و GWP منخفض ويعتبر ثاني أكسيد الكربون من الوسائط الممتازة بعييه فقط التدني في كفاءته للطاقة (low energy efficiency) بسبب تنكس درجته الحرجة ($T_{\text{critical}}=31.3^\circ\text{C}$) ولكن يمكن التغلب على هذه المشكلة باستعمال مبادل حراري.

د- الهواء Air (R729)

يمكن استخدامه في دارات التبريد غير التقليدية غير أن كفاءته منخفضة.

هـ- الماء R718 (H_2O): Water

يعتبر الماء من وسائط التبريد الأمثل لاستعمالات درجات الحرارة العالية ($T > 0^\circ\text{C}$) غير أن كبر الحجم النوعي في حالته الغازية (Specific vapor volume) يجعل هناك صعوبة من حيث كبر حجم المضاط. يستخدم الماء في نظم التبريد بالمتصل مع بروميد الليثيوم (Lithium Bromide).

والجنول (4-13) يبين مقارنة ما بين وسائط التبريد المستخدمة في دارات المضخات الحرارية كما يعطي قيم درجة حرارة الغليان وإن كانت قيمة معامل جهد تنقص الأوزون ODP وقيمة معامل تأثير الجهد الحراري العالمي GWP .

الجدول (13-4): مقارنة وسائط التبريد

Comparison of new refrigerants					
Refrigerant type/no.	Substitute for	ODP	GWP	Cond. temp. at 26 bar (°C)	Sat. temp. at 1 bar abs °C
HCFC (short term)					
R22	R502, R12	0.05	1700	63	-41
HFCFC/HFC service-blends (transitional alternatives)					
R401A	R12	0.03	1080	80	-33
R401B	R12	0.035	1190	77	-35
R409A	R12	0.05	1440	75	-34
HFC-Chlorine free (long-term alternative)					
R134A	R12, R22	0	1300	80	-26
HFC-Chlorine free-blends-(long-term alternatives)					
R404A	R502	0	3750	55	-47
R407A	R502	0	1920	56	-46
R407B	R502	0	2560	53	-48
R407C	R22	0	1610	58	-44
ISCEON 59	R22	0	2120	68	-43
R410A	R22, R13B1	0	1890	43	-51
R411B	R12, R22, R502	0.045	1602	65	-42
Halogen free (long-term alternatives)					
R717 ammonia	R22, R502	0	0	60	-33
R600a isobutane	R114	0	3	114	-12
R290 propane	R12, R22, R502	0	3	70	-42
R1270 propylene	R12, R22, R502	0	3	61	-48

كما يعطى الجدول (13-4) وسائط التبريد البديلية. مثال: نلاحظ أن R401A بديل R12، أما الجدول (14-4) يعطي قيم ODP وقيم GWP بالمقارنة مع قيمة التبريد R11 وثاني أكسيد الكربون بالنسبة GWP.

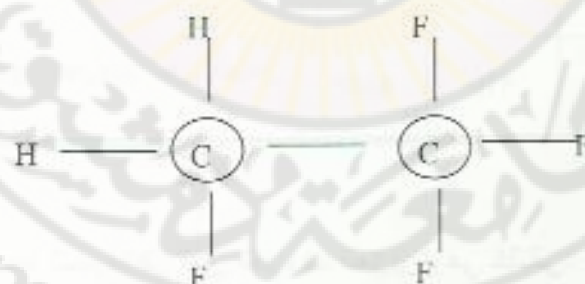
الجدول (14-4)

Table 3.3 Environmental impact of some of the latest refrigerants

Refrigerant		ODP (R11 = 1.0)	GWP (CO ₂ = 1.0)
R22	HCFC	0.05	1700
R134a	HFC	0	1300
R404a	HFC	0	3750
R407c	HFC	0	1610
R410a	HFC	0	1890
R411b	HCFC	0.045	1602
R717	ammonia	0	0
R290	propane	0	3
R600a	isobutane	0	3
R1270	propylene	0	3

10 مانع التبريد R-134a HFC

من المعلوم أن (HFC) لا تحتوي على ذرات الكلور وبالتالي فإنها لا تؤثر على طبقة الأوزون والشكل (2-4) يوضح التركيب الكيميائي الجزيئي للغاز R134a



الشكل (2-4) التركيب الكيميائي الجزيئي للغاز

الشكل (2-4) يوضح التركيب الكيميائي الجزيئي للغاز الذي هو الأكثر اقتراباً من سائل التبريد R12 التي تعتبر خطيرة جداً على طبقة الأوزون. لذلك فإن البديل الأقرب إلى R12 هو R134a والجدول (15-4) يوضح مقارنة بين الغازين من عدة نواحي.

الجدول (4-15) يوضح مقارنة بين R12 و R134a

نسبة R134a إلى R12	R134a HFC	R12 CFC	الخواص
5% أكثر	0.956	0.908	ضغط المكثف mpa Condenser pressure
4% أقل	0.342	0.356	ضغط المبخر mpa Evaporator pressure
25%	63.2	50.5	التأثير التبريدي Cooling capacity
3% أقل	3.0	3.08	تدفق الغاز Gas flow
28% أكثر	7.1	9.1	خط البخار المشبع
2% أقل	6.94	7.07	معامل الأداء c o p
خامل	0.0	1.0	تآكل الأوزون
أقل تأثير	570	6100	التأثير الحراري على البيئة

وقد أجريت هذه المقارنة في نفس الظروف للغازين وهي كالتالي:

عند درجة حرارة التكثيف - 38 °C

درجة حرارة التبخير - 4.5 °C

حمل النظام - 1 ton

من خلال الجدول نلاحظ أن غاز R134a يزيد عن R 12 بنسبة 5% بالنسبة لضغط التكثيف ويقل عنه بنسبة 4% في ضغط التبخير التي بدورها تزيد من معدل فرق الضغط بالنسبة لـ R134a.

التأثير التبريدي بالنسبة لـ R134a زيادة 25% الذي يتطلب 3% أقل من معدل التدفق بالنسبة لغاز التبريد.

الزيادة في معدل فرق الضغط بالنسبة لـ R134a مقارنة بـ R12 يسبب زيادة في الطاقة اللازمة للضغط الذي يؤثر سلباً على معامل الأداء COP بنسبة 2%.

2- الزيت المستخدم:

تعويض R134a بدلاً من R12 يستلزم استعمال الزيت المجانس بـ R134a، لأن R134a لا يذوب في الزيوت المعدنية المستخدمة لضواغط R12، وعدم ذوبان غاز التبريد في الزيوت المستخدمة بسبب مشكلة في دائرة الزيت الراجعة إلى الضواغط وخصوصاً من الضواغط الترددية واللولبية حيث يكون غاز التبريد والزيت في تلامس مباشر لذلك فإنه يستخدم زيت صناعي يدعى polyalkyleneglycols.

4-1-4- استخدام ثنائيات وسيط التبريد في المضخة الحرارية:

يتميز الاستخدام الثنائي لوسيط التبريد (المزيج لا اتسيوتروبى) بالخصائص التالية:

- 1- عند تغير الحالة نلاحظ أن تركيز السائل يختلف عن تركيز البخار.
- 2- عملية التبخر والتكاثف تتم بإجراء لا إيزوثرمي تحت ضغط ثابت أي لا تتم عند درجة حرارة ثابتة كما هو معروف بالنسبة لوسيط تبريد وحده، وإنما تتم عند تدرج في درجات الحرارة.

تعريف الاتسيوتروب: هي كلمة يونانية وتعني أنه عند مزج وسيطي تبريد أو أكثر يمكن أن توجد نقطة واحدة يتم التبخر والتكاثف (تغير الحالة) عندها بدرجة حرارة ثابتة تحت ضغط ثابت.

مثال:

الغريون R-502: هو عبارة عن مزيج لـ R22 و R115، يعامل هذا المزيج معاملة وسيط التبريد الأحادي لأن هذا المزيج اتسوتروبي، وتكون نسب المزج:

$$R22 = 48.2 \text{ Kg / Kg}, R115 = 51.8 \text{ Kg / Kg}$$

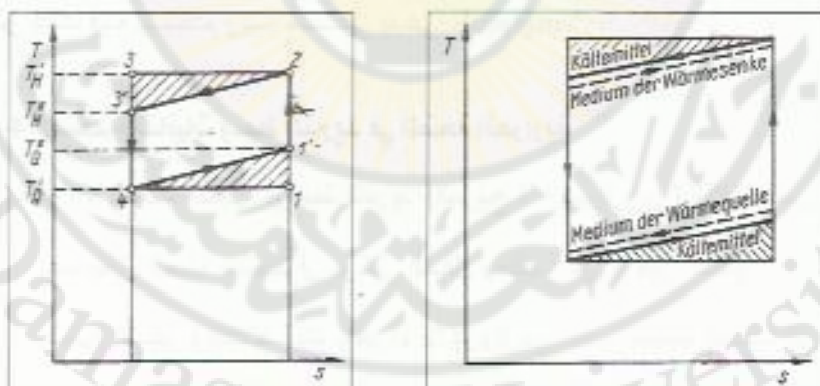
المزيج R22/R114 أو R22/R152a هو مزيج لا اتسوتروبي حيث لا يوجد نقطة ثابتة يتم عندها تغير الحالة.

لاستخدام ثنائيات وسيط التبريد يجب تطبيق دائرة لورنس الترموديناميكية بدلاً من دورة كارنو.

الشكل (3-4): مقارنة بين دورة كارنو ودورة لورنس حيث:

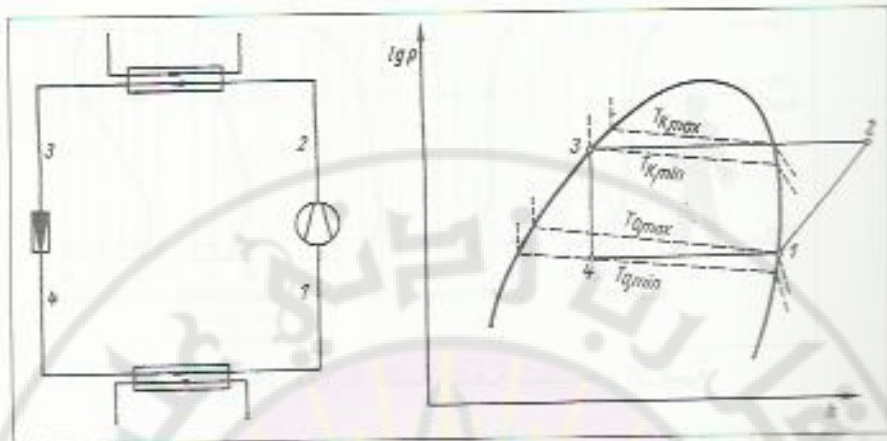
1-2-3-4- دورة كارنو.

1'-2'-3'-4- دورة لورنس.



الشكل (3-4): مقارنة دورة لورنس مع دورة كارنو

الشكل (4-4): تمثيل دورة لورنس على مخطط log p-h لمضخة حرارية:



الشكل (4-4)

بالمقارنة مع حالة استخدام وسيط تبريد نلاحظ أنه يجب استخدام عدة مضخات على التسلسل من أجل تحقيق الفرق المطلوب على طرفي المكثف:

$$\Delta t = (10-20) ^\circ C$$

في حالة التكلفة الأرضية يلاحظ فائدة المضخات الحرارية وجداها، حيث إن التكلفة الأرضية لا تحتاج لدرجات حرارة أعلى من $(45-55) ^\circ C$ وهذا ما تقدمه المضخة الحرارية في استخدام الماء الساخن للاستعمالات المنزلية $(10-60) ^\circ C$.

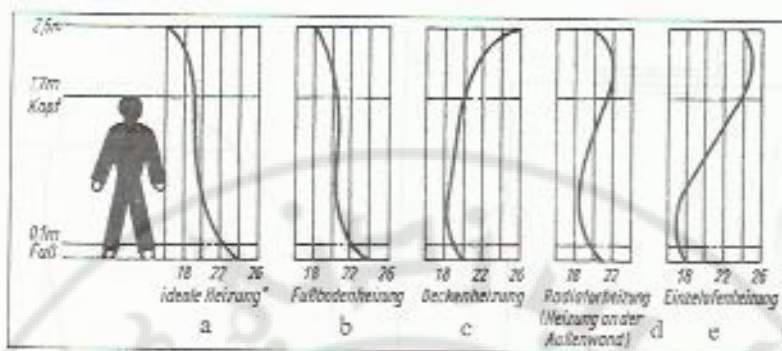
شكل (5-4): مقارنة أنظمة التدفئة التقليدية والأرضية مع النظام الأمثل:

== النظام الأمثل.

== تدفئة أرضية.

== تدفئة تقليدية.

== نظام المضخات مع نظام الموقد.



الشكل (5-4): مقارنة أنظمة التدفئة التقليدية والأرضية

الشكل (6-4): يبين قيمة الاستطاعة الحرارية الحجمية q_v لأنه تابع لحجم الغرفة عند حالات مختلفة:

a: غرفة سكنية، مكتب.

b: بناء، مصنع.

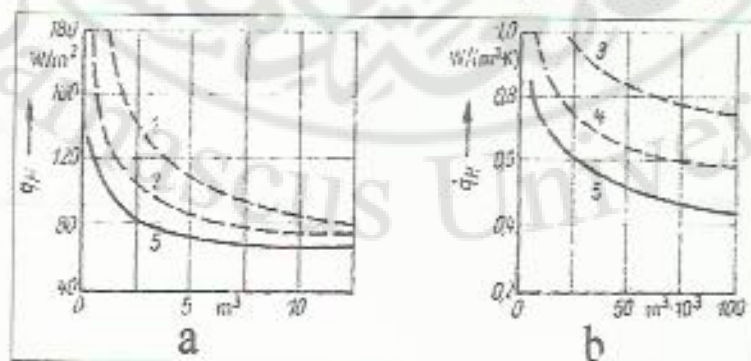
(1): نافذة بسيطة (بطبقة واحدة).

(2): نافذة بطبقتين.

(3): إنارة بسيطة + أبواب صغيرة.

(4): إنارة عالية + أبواب كبيرة.

(5): تسرب حراري مرتفع.



الشكل (6-4): قيمة الاستطاعة الحرارية الحجمية باعتباره تابعاً لحجم الغرفة

2-4- وسائط التبريد الامتصاصية الثنائية وخصائصها:

تستخدم دارات المضخات الحرارية الامتصاصية محلولاً ثنائياً من مادتين إحداهما تعمل توسيط تبريد بعد فصلها في حالة البخار من الخليط داخل المولد الحراري، والأخرى مادة ماصة لبخار وسيط التبريد العائد من المبخر ويجب أن تتوفر الخصائص التالية في الخليط حتى يمكن اختياره للعمل في دورة المضخة الحرارية الامتصاصية.

- 1- عدم وجود أي من المادتين في الحالة الصلبة عند أي نقطة عن الدورة.
- 2- سهولة تطاير (تبخر) وسيط التبريد من المحلول عند إضافة الحرارة في المولد الحراري.
- 3- انخفاض قدرة المادة الماصة على الالتصاق ببخار وسيط التبريد عند فصله من المحلول في المولد الحراري.
- 4- درجة عالية من الاستقرار لفترات طويلة من التشغيل.
- 5- قيمة مرتفعة للحرارة الكامنة للتبخير لوسيط التبريد حتى يتسنى فصل أقل كمية ممكنة من وسيط التبريد من المحلول.
- 6- عدم القدرة على إحداث تآكل أو انخفاضها.
- 7- غير سام أو ضار صحياً.
- 8- سهولة امتصاص وسيط التبريد بالمادة الماصة وسرعته.
- 9- انخفاض معامل اللزوجة للمحلول عند ظروف التشغيل.
- 10- انخفاض درجة حرارة التجمد لسائل المحلول عن أقل درجة حرارة في الدورة.
- 11- عدم وجود أي من المادتين في الحالة الصلبة عند أي نقطة عن الدورة.
- 12- سهولة تطاير (تبخر) وسيط التبريد من المحلول عند إضافة الحرارة في المولد الحراري.

13- انخفاض قدرة المادة الماصة على الالتصاق ببخار وسيط التبريد عند فصله من المحلول في المولد الحراري.

14- درجة عالية من الاستقرار لفترات طويلة من التشغيل.

15- قيمة مرتفعة للحرارة الكامنة للتبخير لوسيط التبريد حتى يتسنى فصل أقل كمية ممكنة من وسيط التبريد من المحلول.

16- انعدام القدرة على إحداث تآكل أو انخفاضها.

17- غير سام أو ضار صحياً.

18- سهولة امتصاص وسيط التبريد بالمادة الماصة وسرعته.

19- انخفاض معامل اللزوجة للمحلول عند ظروف التشغيل.

20- انخفاض درجة حرارة التجمد لسائل المحلول عن أقل درجة حرارة في الدارة.

والجدول (4-16) يوضح عدة محاليل من وسائط التبريد والمادة الماصة التي تحقق معظم الشروط والخواص السابقة الذكر إلا أنه تنحصر استخدامات دارات المضخات الحرارية الامتصاصية في استخدام محلول الماء وبرميد الليثيوم - أو محلول الأمونيا والماء نظراً لتفوق هذين المحلولين في تحقيق الخواص المطلوبة مسبقاً على باقي المحاليل المذكورة في الجدول.

الجدول (4-16) وسائط التبريد للدارة الامتصاصية

وسيط التبريد	المادة الماصة	الرمز الكيميائي
ماء	بروميد الليثيوم	$H_2O-LiBr$
أمونيا	ماء	NH_3-H_2O
أمونيا	ثيومينات الصوديوم	$NH_3-NaSCN$
أمونيا	نترات الليثيوم	NH_3-LiNO_3
أمونيا	كلوريد الكالسيوم	NH_3-CaCl_2

3-4- جداول ومخططات وسائط التبريد:

التبريد أو ضخ الحرارة يُعنى بالدرجة الأولى بالمادة والطاقة. المادة تتواجد في ثلاث حالات: حالة المادة الصلبة والسوائل والغازات. من الناحية الأخرى يعبر عن الطاقة بأنها القدرة على إنجاز عمل ما. وجميع عناصر المواد تتكون من جزيئات صغيرة تتأثر بالضغط ودرجة الحرارة التي يمكن عن طريقيهما تحويل المادة من حالة إلى أخرى حسب ترابط جزيئات المادة وكمية الطاقة المبذولة على المادة نفسها.

ترجة الغليان والضغط:

يمكن تقسيم أحوال المادة إلى ثلاث أحوال هي:

- حالة الصلابة solids.
- حالة السيولة liquids.
- الحالة الغازية gases.

ويمكن القول إن المواد الصلبة غير قابلة للانضغاط incompressible، بينما السوائل (liquids) صعبة الانضغاط relatively incompressible، أما الغازات فهي قابلة للانضغاط حيث تتبع كثير منها القانون العام للغازات:

$$p_v = mRT$$

حيث إن:

$p = \{Pa\}$ ضغط الغاز

$V = \{m^3\}$ حجم الغاز

$m = \{Kg\}$ كتلة الغاز

$T = \{K\}$ درجة الحرارة المطلقة للغاز

$R = \{J/Kg K\}$ ثابت الغاز

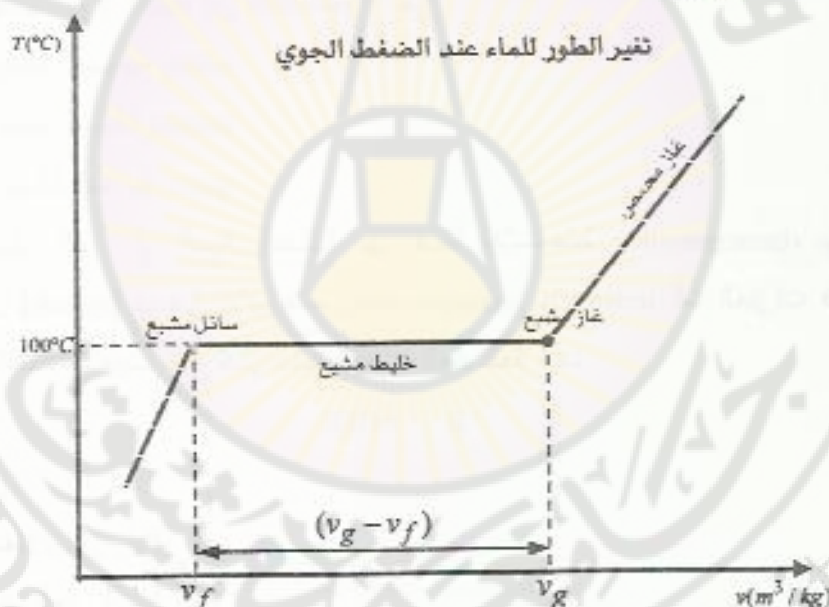
والحالات الأكثر شيوعاً لتغير المادة من طور إلى آخر يمكن تلخيصها في

التي:

جدول (4-17): أحوال المادة

الطور	الاسم	مثال
حالة الصلبة - حالة السائلة	الانصهار Melting	تحول الثلج إلى ماء
حالة السائلة - الحالة الغازية	الغليان Boiling	تحول الماء إلى بخار ماء
الحالة الغازية - حالة السائلة	التكثيف Condensation	تحول بخار الماء إلى ماء
حالة السائلة - حالة الصلبة	التجمد Freezing	تحول الماء إلى ثلج

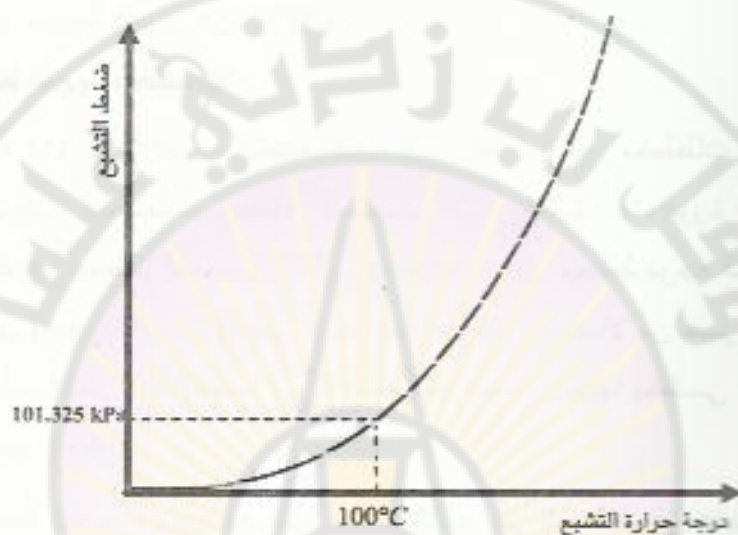
والشكل (4-7) يوضح حالة تغير الطور بالنسبة للماء مع زيادة درجة الحرارة عند الضغط الجوي.



الشكل (4-7) علاقة درجة الحرارة مع الحجم النوعي للماء

وبلاحظ في هذا الرسم أنه في حالة غليان الماء (تغير الطور) فإن درجة الحرارة تبقى ثابتة، وتعرف كمية الحرارة هذه بالحرارة الكامنة (latent heat)؛ وهي الحرارة اللازمة لتغير كتلة مادة ما من طور إلى آخر دون زيادة في درجة الحرارة. وهذه الحرارة لا يمكن قياسها عن طريق التيرمو متر thermometer.

بينما يلاحظ التغير في الحجم النوعي مع زيادة درجة الحرارة. كما يلاحظ الزيادة في الحجم النوعي في كل الأحوال. غير ذلك فإن زيادة الضغط يصحبه زيادة في درجة الحرارة كما يلاحظ في الشكل (8-4).



الشكل (8-4) علاقة ضغط التشبع مع حرارة التشبع للماء

يطبق الشكل (8-4) على كثير من السوائل وخاصة وسائط التبريد عند مختلف درجات الحرارة.

سابق يمكن استخلاص الآتي:

عند تغير الطور (الغليان مثلاً) تكون درجة الحرارة والضغط ثابتين بينما يتغير الحجم النوعي.

تعرف الزيادة في درجة الحرارة عن درجة الغليان بالتحميص (superheating) مثلاً إذا كانت درجة حرارة ماء عند الضغط الجوي هي 107°C فإن مقدار التحميص هو 107°C حيث إن درجة غليان الماء عند الضغط الجوي هي 100°C .

يعرف التبريد الدوني subcooling بمقدار الانخفاض في درجة حرارة سائل ما عن درجة الغليان، فمثلاً إذا كانت درجة حرارة ماء عند الضغط الجوي هي 95°C فإن مقدار التبريد الدوني هو 5°C حيث إن درجة غليان الماء عند الضغط الجوي هي 100°C .

جداول وسائط التبريد ومخططاتها:

لمعرفة أداء دورة التبريد الانضغاطية، يجدر التعرف على مخططات وجدول وسائط التبريد. والمخططات الشائعة الاستعمال عند تحليل أداء دورة التبريد الانضغاطية هي مخطط الضغط والإنثالبي (p-h diagram) ومخطط درجة الحرارة - الإنتروبي (T-s diagrams). غير أن خرائط p-h أكثر استعمالاً من خرائط T-s. وهذا المخطط الشكل (9-4) مقسم إلى ثلاث مناطق مفصول بينها بخطي التشبع (سائل أو بخار) وهي:

أ- منطقة التبريد الدوني تقع على الجانب الأيسر من المخطط. في هذه المنطقة يكون وسيط التبريد في حالة سائل فقط ودرجة الحرارة تكون أقل من درجة حرارة التشبع بالنسبة لأي ضغط.

ب- منطقة التجميد وهي المنطقة التي تقع على الجانب الأيمن من المخطط. وفي هذه المنطقة يكون وسيط التبريد في حالة بخار فقط ودرجة الحرارة تكون أكبر من درجة حرارة التشبع بالنسبة لأي ضغط.

ج- المنطقة الوسطى حيث يكون وسيط التبريد في حالة تغير الطور (سائل + غاز). المسافة الأفقية بين خطي التشبع مقروءة على إحداثيات الإنثالبي عند أي ضغط تعبر بالحرارة النوعية للانصهار لوسيط التبريد (latent heat of vaporization)، مع ملاحظات أن قيمة هذه الحرارة الكامنة تقل مع زيادة الضغط.



الشكل (9-4) مخطط الضغط مع الإنثالبي

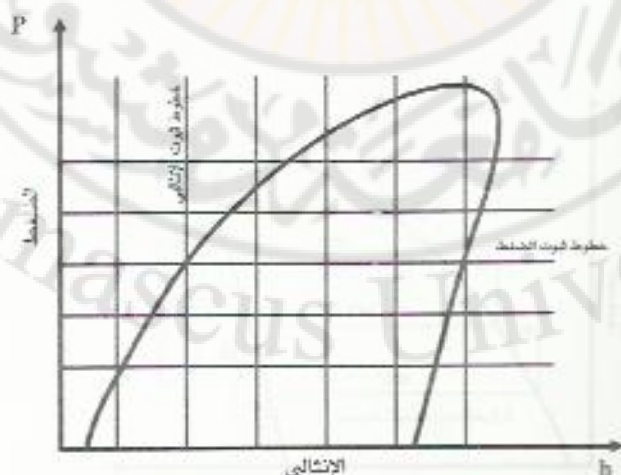
ومخطط p-h يحتوي على ست خطوط وهي كالتالي:

1- خطوط ثبوت الضغط ($p = c$):

وهي الإحداثيات الرأسية للمخطط ($\log p$) بوحدة الضغط (bar).

2- خطوط ثبوت طاقة الإنثالبي ($h = c$):

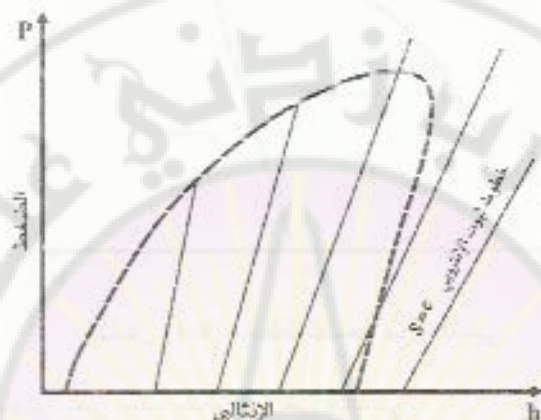
وهي الإحداثيات الأفقية للمخطط بوحدة الإنثالبي (KJ/Kg).



الشكل (10-4) خطوط ثبوت الضغط وخطوط ثبوت طاقة الإنثالبي على مخطط p-h

3- خطوط ثبوت الإنتروبي ($s = c$) وهي بوحدة (KJ/KgK):

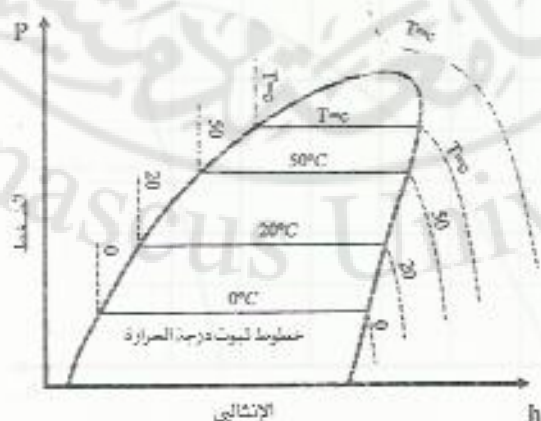
تكون هذه الخطوط قطرية (diagonally) مع ميل ناحية الاتجاه الرأسي.



الشكل (11-4) خطوط ثبوت الإنتروبي ($s = c$)

4- خطوط ثبوت درجات الحرارة ($T = c$):

في منطقة التبريد الدوني تكون خطوط درجة الحرارة رأسية موازية لإحداثيات الضغط وتكون هذه الخطوط أفقية وموازية لإحداثيات الإنتالبي في منطقة تغير الطور وفي منطقة التخميص تكون هذه الخطوط مائلة إلى أسفل المخطط وهي بوحدة $^{\circ}C$.



الشكل (12-4) خطوط ثبوت درجة الحرارة

5- خطوط ثبوت الحجم النوعي ($v - c$):

يكون منحنى ثبوت الحجم النوعي منطقة التجميع تقريباً أفقية مع زاوية ميل بسيطة تجاه الرأس. وهي إما بوحدة m^3/Kg أو بوحدة l/Kg . خطوط ثبوت الحجم النوعي تزيد ناحية الأسفل.



الشكل (4-13) خطوط ثبوت الحجم النوعي

6- معامل الجفاف (x) dryness fraction:

يكون تغير الطور من سائل إلى بخار في المنطقة الوسطى من ناحية اليسار إلى اليمين. ويكون تغير الطور من بخار إلى سائل في المنطقة الوسطى من ناحية اليمين إلى اليسار. وتعرف نسبة كمية البخار لوسيط التبريد في هذه المنطقة نسبياً إلى كتلة الكتلة لوسيط التبريد بمعامل الجفاف (x) dryness fraction.

معامل الجفاف = كتلة بخار ووسط التبريد / الكتلة الكلية لوسيط التبريد

$$x = \frac{m_v}{m}$$

حيث:

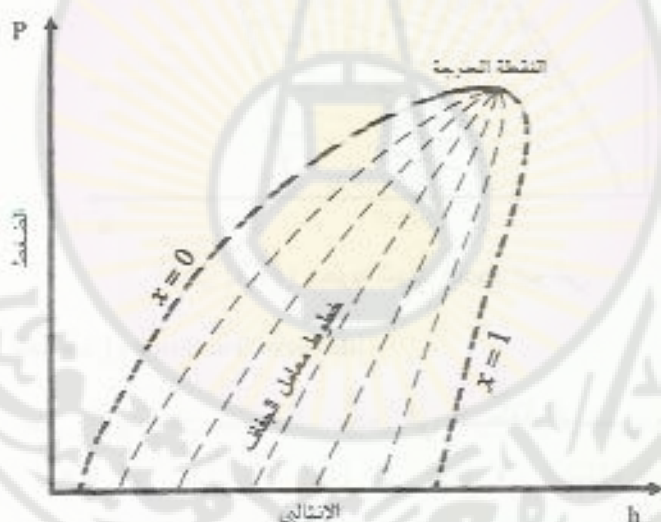
معامل الجفاف: x

كتلة بخار وسيط التبريد: m_v

كتلة وسيط التبريد: m

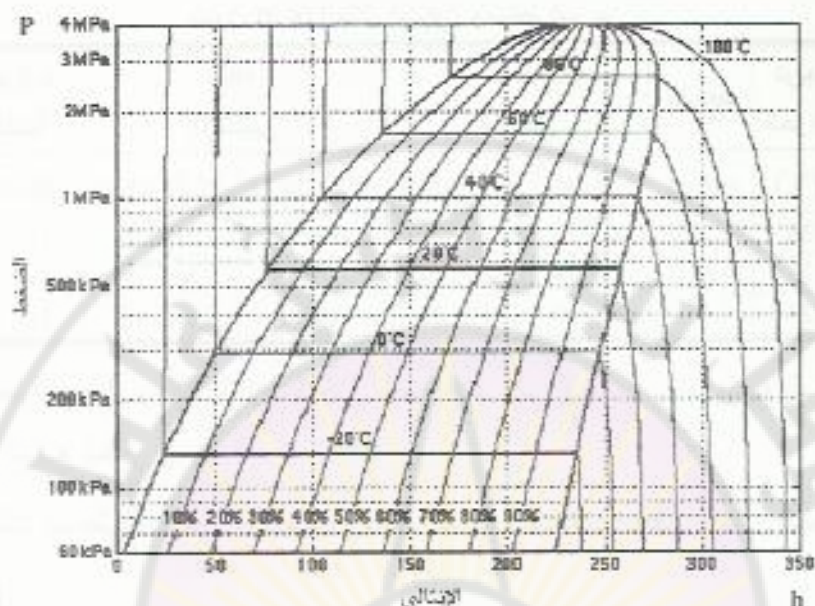
(ملحوظة $0 < x < 1$)

فمثلاً عند خط تشبع السائل يكون $x = 0$ وعند خط التشبع لبخار وسيط التبريد يكون $x = 1$ وعندما يكون $x = 0.10$ يعني أن كمية بخار وسيط التبريد 10% بالنسبة لكتلة وسيط التبريد، وفي هذه الحالة تكون أقرب إلى خط التشبع للسائل وعندما يكون $x = 0.90$ يعني أن كمية بخار وسيط التبريد تكون 90% بالنسبة لكتلة وسيط التبريد، وفي هذه الحالة تكون أقرب إلى خط التشبع للبخار.



الشكل (14-4) خطوط معامل الجفاف

والشكل (15-4) يوضح الشكل العام لأخذ وسائط التبريد (R134a)، به بعض الخطوط المذكورة سابقاً وكل وسائط التبريد تقريباً لها خرائط مشابهة في الشكل.



الشكل (15-4) مخطط p-h لوسيط التبريد R134a

يوجد عدد من مخطط وسائط التبريد (مخطط p-h) $\text{NH}_3 - \text{R22}$.

إضافة إلى مخططات وسائط التبريد هناك جداول لوسائط التبريد تظهر فيها الخصائص التالية لوسيط التبريد عند منطقتي التشبع (سائل أو بخار):

- درجة الحرارة: وهي درجة حرارة التشبع وهي غالباً ما تكون بأقصى العمود الأسير في الجدول وبوحدة $^{\circ}\text{C}$.

- الضغط: وهو الضغط المناظر لدرجة حرارة وبوحدة bar.

- الحجم النوعي: (في منطقة تشبع السائل يرمز إليه بالحرف v' ولمنطقة

تشبع بخار وسيط التبريد يشار إليه بالحرف v'') وهو بوحدة m^3/kg .

- الإنثالبي: (في منطقة تشبع السائل يرمز إليها بالحرف h' ولمنطقة تشبع

بخار وسيط التبريد يشار إليها بالحرف h'') وهي بوحدة kJ/kg .

- الحرارة الكامنة: (L) وهي تساوي $L = h'' - h'$ بوحدة kJ/kg .

جدول (18-4) مثال لجداول وسائط التبريد

درجة الحرارة	الضغط	الحجم النوعي		طاقة الإنثالبي		الحرارة الكامنة
T(°C)	p(bar)	v' (U/Kg)	v'' (U/Kg)	h' (KJ/Kg)	h'' (KJ/Kg)	L(KJ/Kg)
-26	1.020	0.726	188.56	166.35	381.71	215.37
-25	1.067	0.728	180.67	167.59	382.34	214.75
-24	1.116	0.730	173.18	168.84	282.97	214.13

بعض جداول وسيط التبريد تعطى أيضاً الإنتروبي (s) عند حالة تشيع السائل وحالة التشيع لبخار وسيط التبريد.

وللتدرب على استعمال مخططات وسائط التبريد وجداولها، نعطي الأمثلة التالية:

مثال 1:

لوسيط تبريد (R11) سائل مشبع ($x = 0$) عند درجة حرارة 20°C تم خنقه أدياباتياً (عند ثبوت الإنثالبي) إلى درجة حرارة 0°C أوجد:

أ- الضغط والإنثالبي عند النقطة الأولى باستعمال الجدول.

ب- الضغط ومعامل الجفاف لوسيط التبريد بعد الخنق باستعمال الجدول وعن طريق الحساب.

ج- ما التغير الذي يحدث لحالة وسيط التبريد إذا كان وسيط التبريد مشبعاً عند درجة الحرارة 50°C وتم خنقه أدياباتياً (عند ثبوت الإنثالبي) إلى درجة حرارة 0°C؟

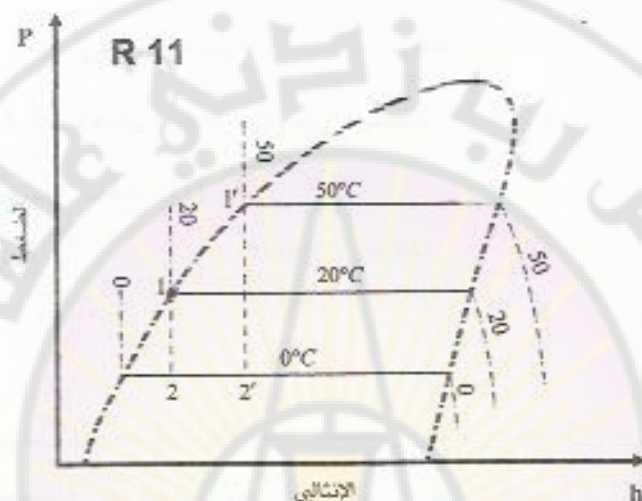
الحل:

أ- باستعمال الجدول الخاص بوسيط التبريد (R11) يمكن إيجاد الضغط والإنثالبي

عند $T = 20^\circ\text{C}$:

$$p_1 = 0.889 \text{ bar} \quad h_2 = 217.26 \text{ KJ/Kg}$$

ب- من مخطط وسيط التبريد يتم تحديد النقطة (1) ومع خطوط ثبوت الإنثالبي يتم النزول إلى درجة حرارة 0°C حيث يتم تحديد النقطة (2) كما هو موضح بالشكل (16-4):



الشكل (16-4) مخطط p-h للمثال (1)

عليه يكون:

$$p_1 = 0.400 \text{ bar} \text{ الضغط}$$

ولحساب معامل الجفاف (x) نستخدم المعادلة التالية:

$$x = \frac{h_x - h'}{h'' - h'}$$

وبحيث أن:

$$h_x = 217.26 \text{ KJ/Kg}$$

$$h'' = 390.63 \text{ KJ/Kg}$$

$$h' = 200.00 \text{ KJ/Kg}$$

$$x = \frac{217.26 - 200.00}{390.63 - 200.00} = 0.09$$

ومن الرسم على مخطط وسيط التبريد يمكن أيضاً قراءة معامل الجفاف بالتقريب $(x - 0.10)$.

ج- عند درجة حرارة التثبيع 50°C يكون:

$$p_i = 2.379 \text{ bar} \quad h_i = 244.61 \text{ KJ/Kg}$$

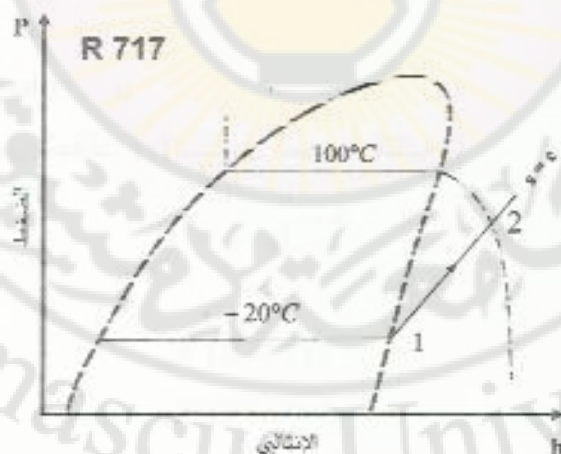
و يمكن أيضاً قراءة معامل الجفاف (x) من المخطط $x = 0.25$

يمكن حساب معامل الجفاف (x) كالتالي:

$$x = \frac{244.61 - 200.00}{390.63 - 200.00} = 0.23$$

مثال 2:

وسيط التبريد الأمونيا (R717) بخار محمص عند درجة حرارة -20°C و $(x = 1)$ تم ضغطه عند ثبوت الإنتروبي إلى درجة حرارة 100°C . أوجد الإنتالبي، الضغط والحجم النوعي لوسيط التبريد بعد الانضغاط.



الشكل (17-4) الرسم المخطط p-h

الشكل (17-4) يوضح نقطة البداية (1) قبل الانضغاط والنقطة (2) بعد الانضغاط.

من المخطط يمكن قراءة الآتي:

$$v_2 = 0.178 \text{ m}^3/\text{Kg}, p_2 = 10 \text{ bar}, h_2 = 1680 \text{ KJ/Kg}$$

مثال 3:

وسيط التبريد (R12) عند إنثالبي $h = 450 \text{ KJ/Kg}$ وإنتروبي $s = 1.75 \text{ KJ/Kg K}$ ، تم تبريده مع ثبوت الضغط إلى درجة التشبع $(x = 0)$ حدد أحوال وسيط التبريد التالية:

أ- p_1, v_1, T_1 قبل التبريد (الحالة الابتدائية).

ب- T_2, h_2 بعد التبريد (الحالة النهائية).

الحل:

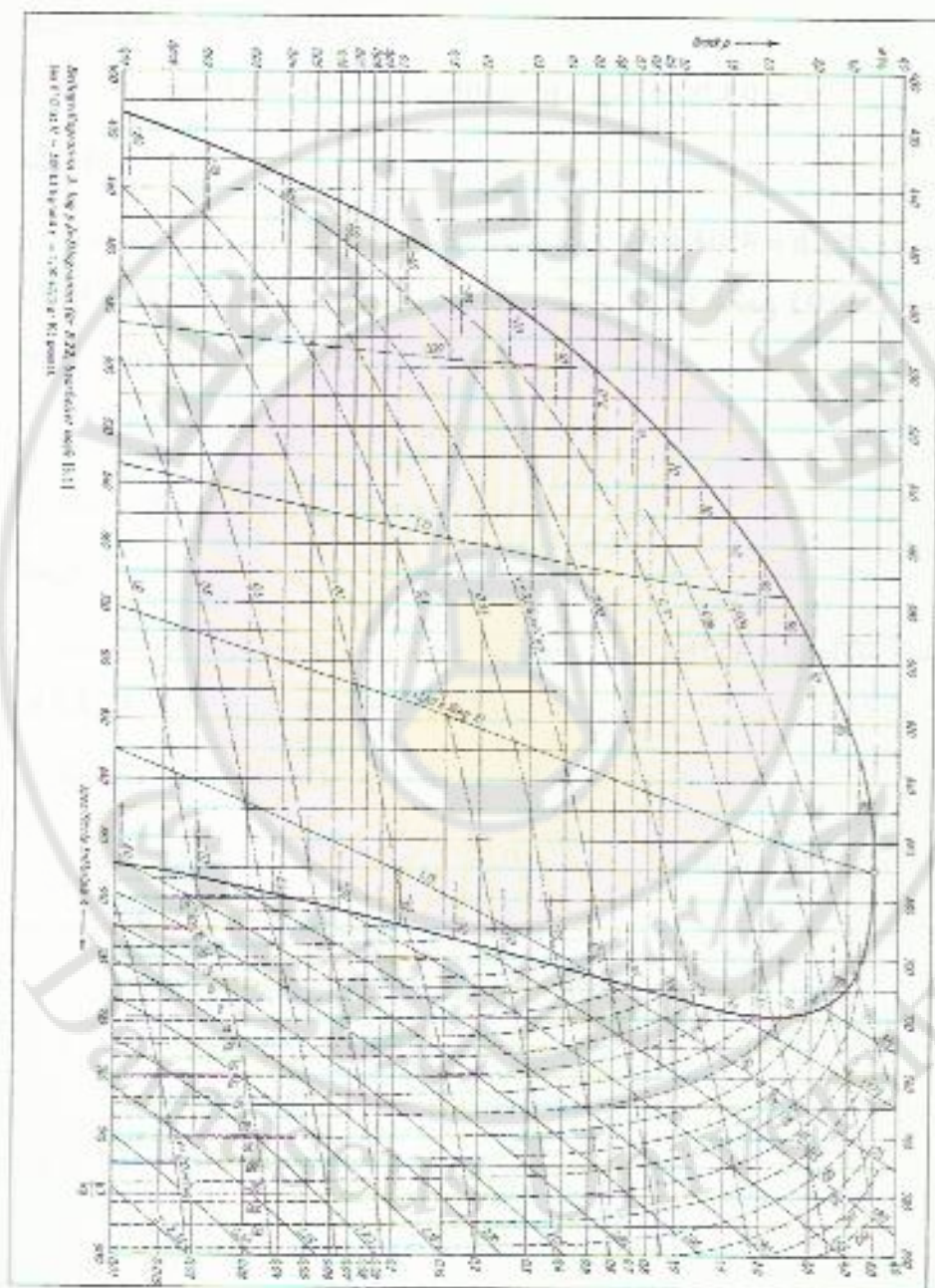
أ- تحدد النقطة الابتدائية (1) مع تقاطع الإنثالبي $h = 450 \text{ KJ/Kg}$ والإنتروبي $s = 1.95 \text{ KJ/Kg K}$ كما هو موضح بالرسم.

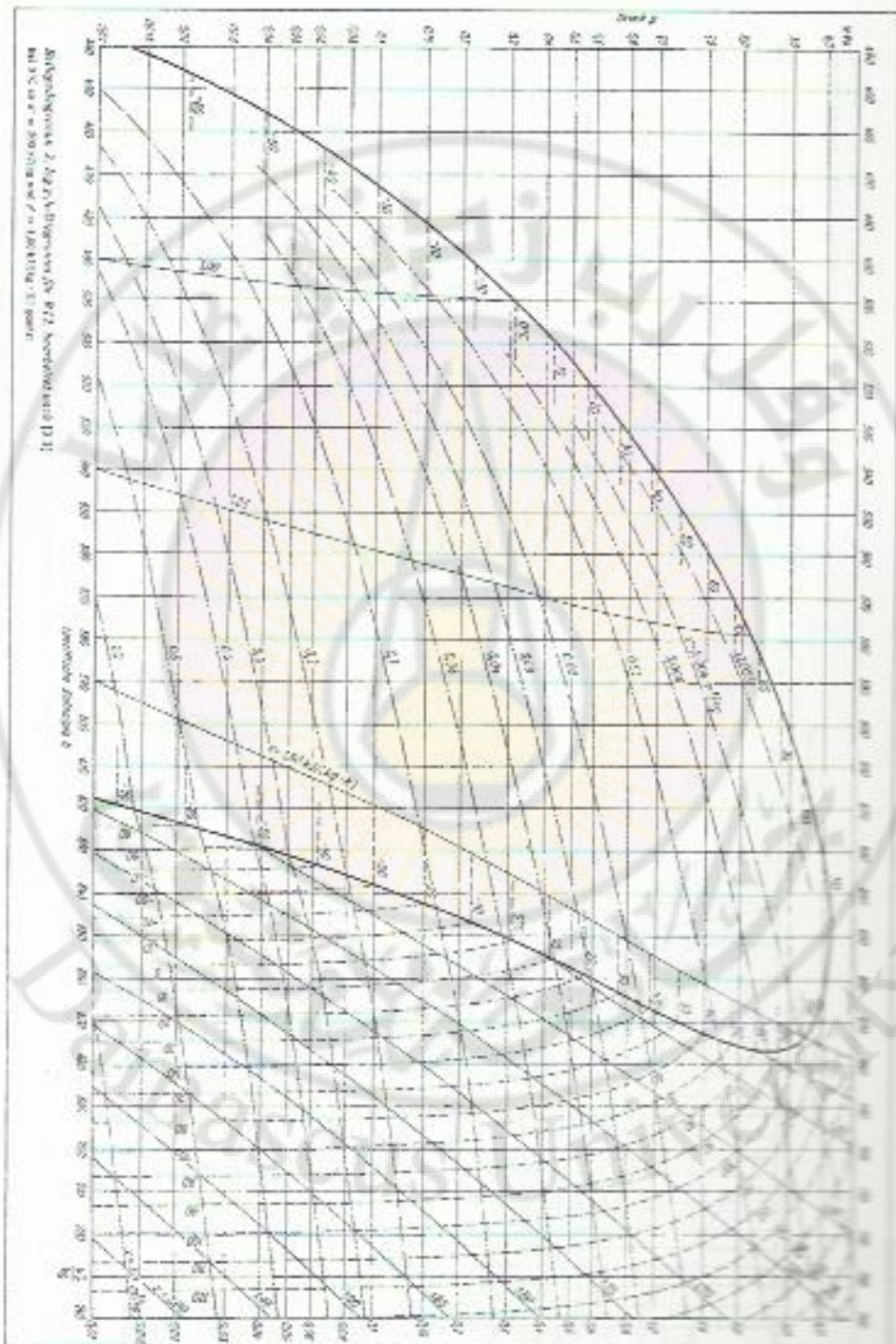
من المخطط عند النقطة (1)، نقرأ الكميات التالية:

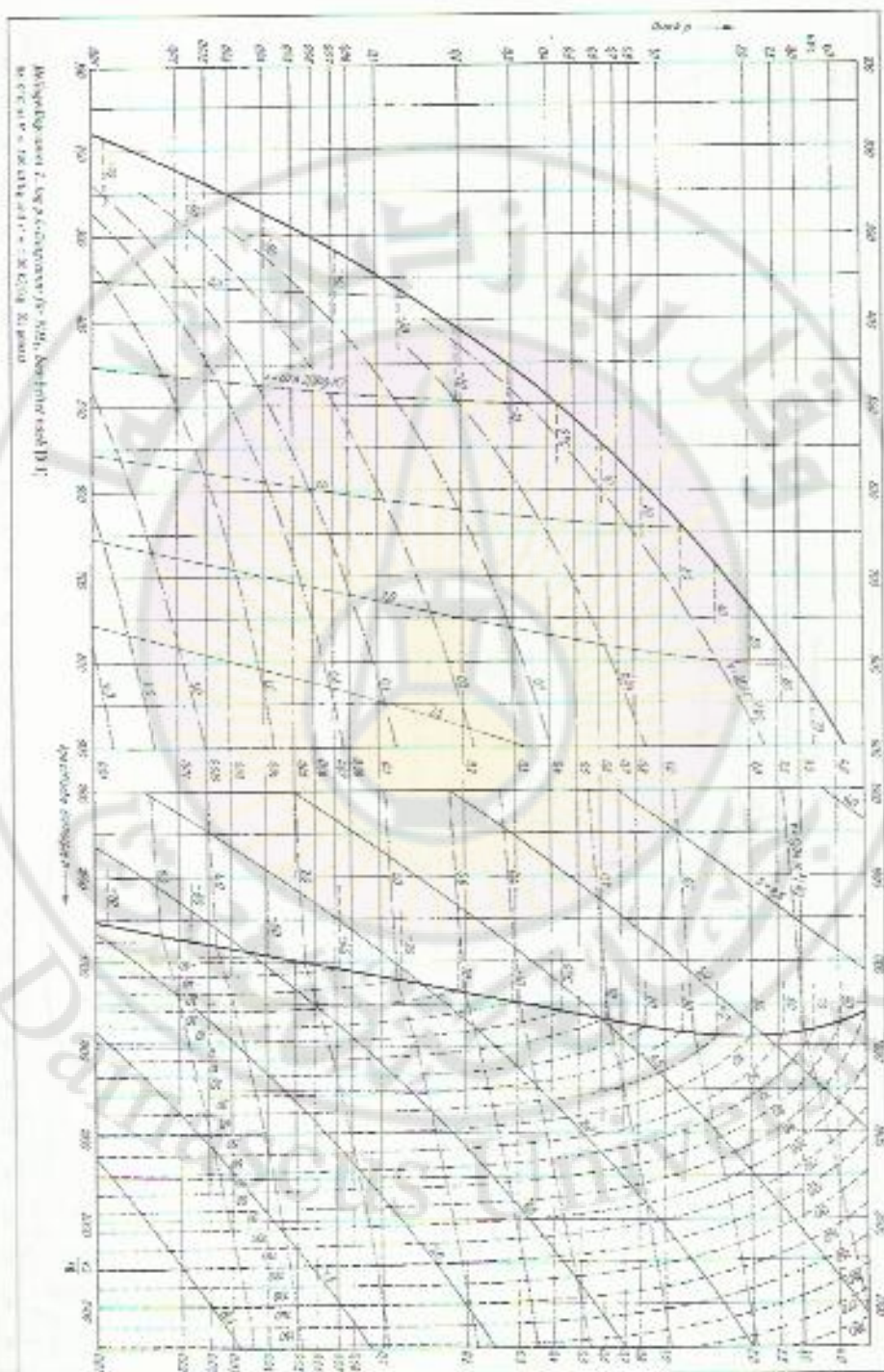
$$p_1 = 8 \text{ bar} \quad v_1 = 0.028 \text{ m}^3/\text{Kg} \quad T_1 = 80^\circ \text{C}$$

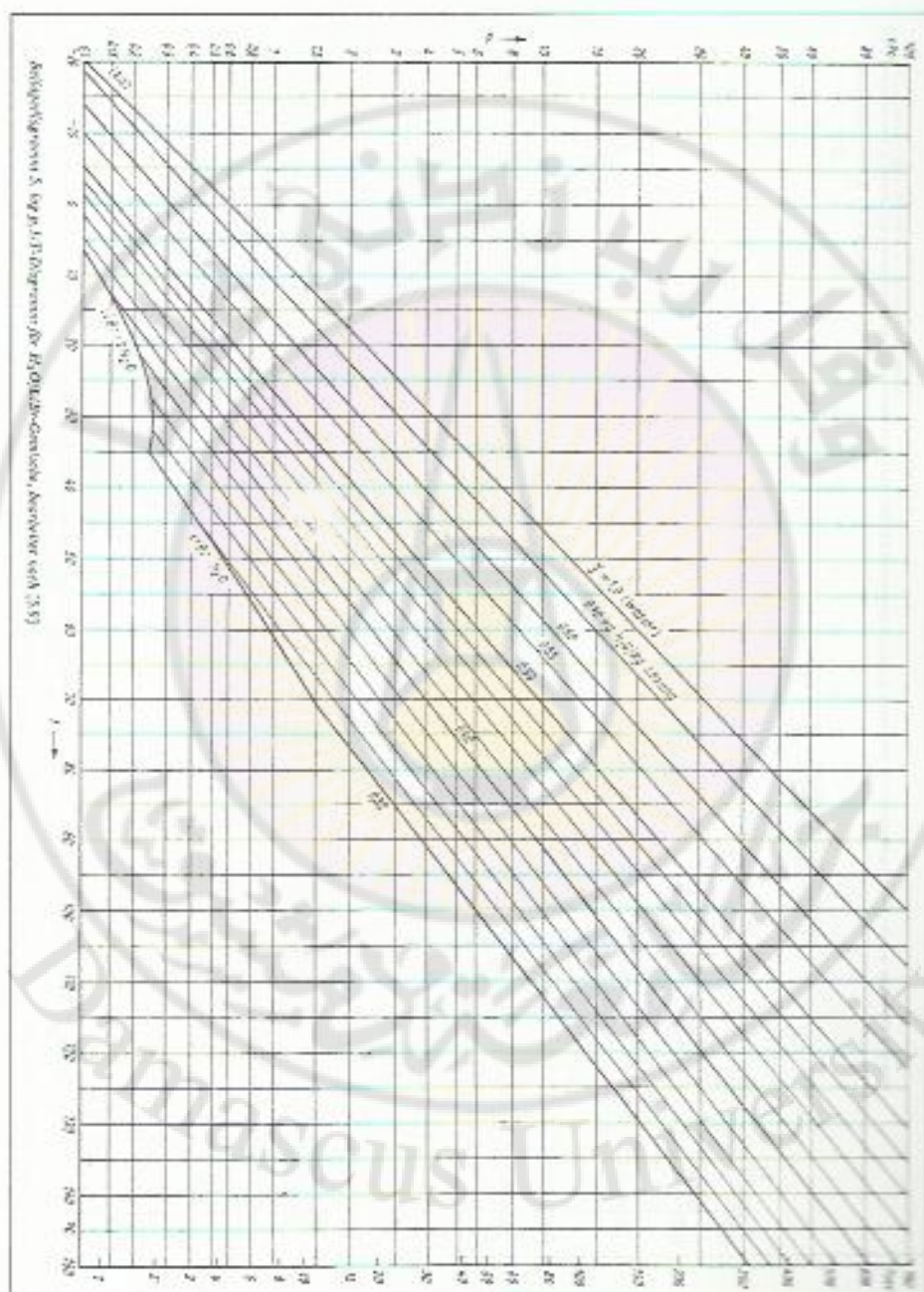
ب- بعد التبريد، وعند خط التشبع $x = 0$ ، نجد أن:

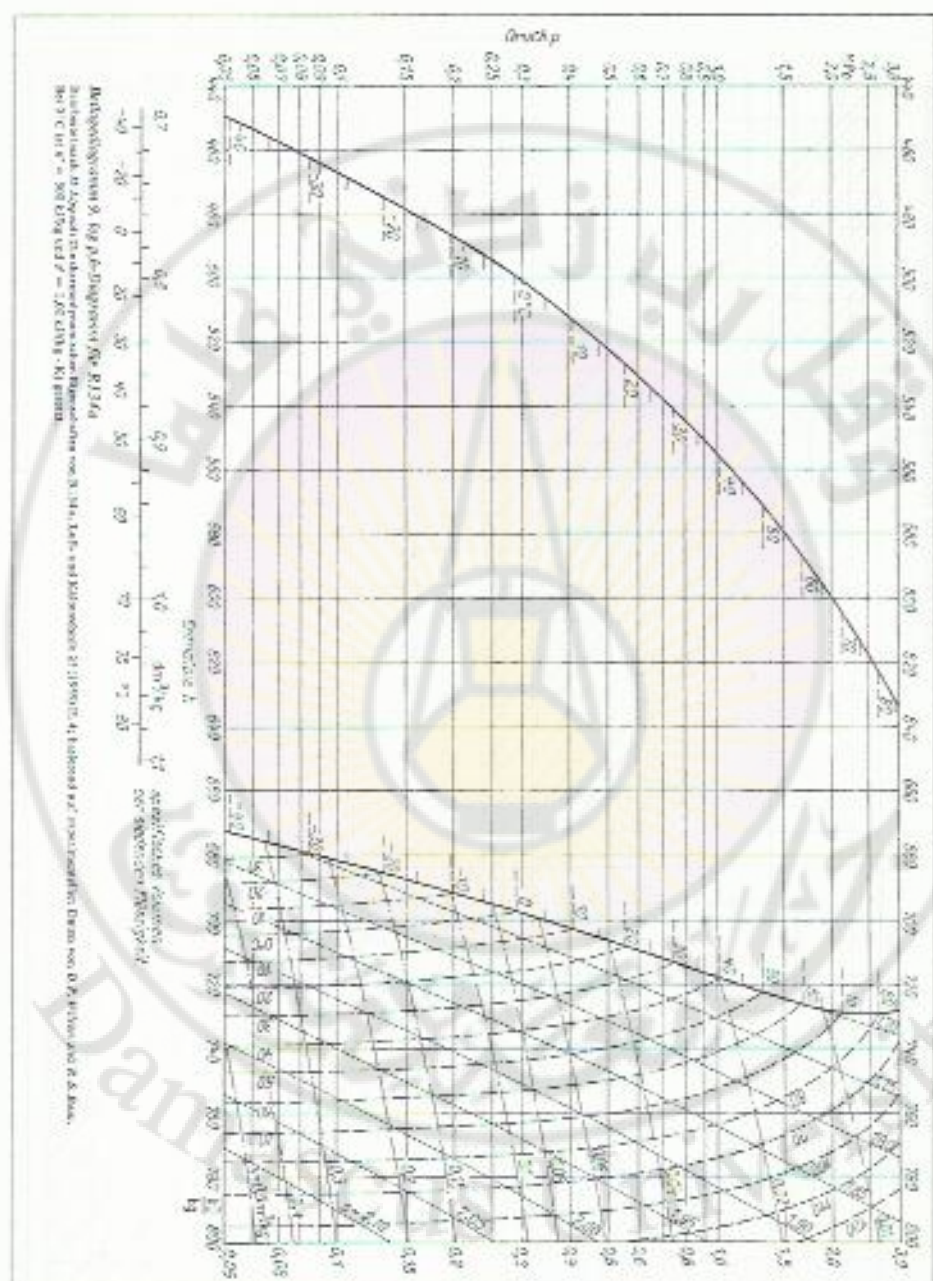
$$h_2 = 230 \text{ KJ/Kg} \quad T_2 = 32^\circ \text{C}$$











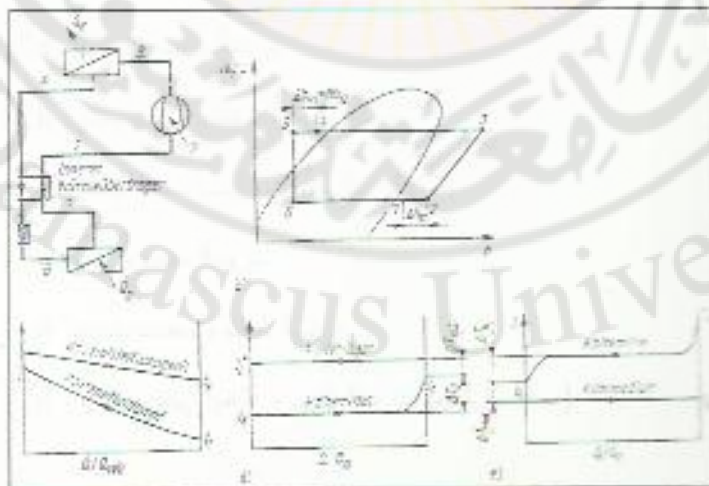
الفصل الخامس

المضخات الحرارية البخارية الانضغاطية الميكانيكية

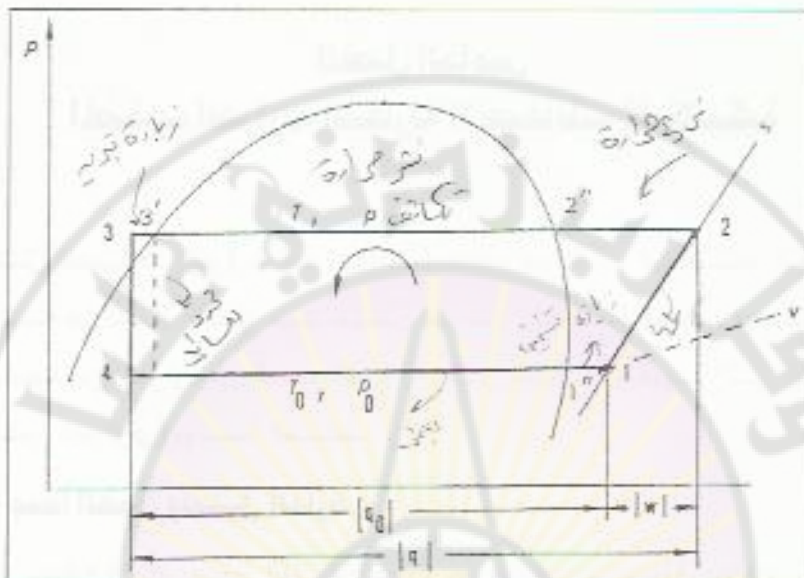
تمثل المضخات الحرارية البخارية الانضغاطية أهم دوائر المضخات الحرارية المستخدمة في المجال العملي حيث تستعمل هذه الدوائر وسائط (موانع) تبريد تعمل على امتصاص الحرارة من المصادر الحرارية عبر المبخر ودفعها إلى المكثف (المستمر الحراري) بواسطة الضاغط.

1-5- مبدأ العمل وتمثيل الدارة:

إن عملية التبريد بضغط الغاز هي عبارة عن دورة تبريد بسيطة، يتم فيها تغيير حالة وسيط التبريد المستخدم من حالة إلى أخرى بغرض الحصول على التبريد والتسخين المطلوب، مر شرح ذلك بشكل مفصل بالفصل الثاني. ولكن في الواقع العملي تعمل دارة المضخة الحرارية بزيادة تبريد وزيادة تسخين كما هو مبين بالشكل (1-5).



الشكل (1-5) تمثيل دارة المضخة الحرارية الحقيقية مع مبادل حراري



الشكل (2-5) تمثيل دورة المضخة الحرارية الحقيقية مع مبادل حراري على مخطط (p-h) (log-p-h)

مراحل عمل الدارة:

$$h_2 - h_2' \text{ نزاع الحرارة}$$

$$h_2' - h_3' \text{ تكاثف وسيط التبريد}$$

$$h_3' - h_3 \text{ زيادة تبريد تكاثف وسيط التبريد}$$

$$h_3 = h_4 \text{ عملية تمدد لسائل وسيط التبريد}$$

$$h_4 - h_1 \text{ تبخر وسيط التبريد}$$

$$h_1 - h_1' \text{ عملية ضغط وسيط التبريد}$$

$$h_1' - h_1'' \text{ زيادة تسخين بخار وسيط التبريد (خط السحب)}$$

2-5- العمليات الترموديناميكية للدائرة:

2-1- عملية ضغط وسيط التبريد في حالة البخار المحمص من النقطة 1 أي ضغط المبخر p_0 إلى النقطة 2 ضغط المكثف p_c بثبوت الانثروبي ويتم صرف عمل w يدعى عمل الضاغط ويتم حسابه وفقاً للعلاقة التالية:

$$W = m(h_2 - h_1)$$

حيث:

h_1 و h_2 : انتالبي النقطة 1, 2.

m : كمية تدفق وسيط التبريد في الدارة.

2'-2- عملية نزع الحرارة بالمكثف من بخار محمص إلى مشيع جاف.

2''-3- تكاثف وسيط التبريد حيث يدخل وسيط التبريد بحالة البخار المحمص إلى المكثف لتتم عملية التحول الطوري من بخار إلى سائل عند ضغط ثابت يدعى ضغط التكاثف p_c ودرجة حرارة ثابتة تدعى درجة حرارة التكاثف t_c ، مما يؤدي إلى إطلاق كمية حرارة تدعى استطاعة المكثف Q_c التي نستفيد منها في عمليات التسخين والتدفئة وتحسب استطاعة المكثف وفقاً للعلاقة التالية:

$$Q_c = m \cdot (h_{2'} - h_{3'})$$

حيث:

$h_{2'}$ و $h_{3'}$: انتالبي النقطة 2', 3'.

3-3- زيادة تبريد تكاثف وسيط التبريد من أجل أن يتم تكاثف وسيط التبريد بأكمله وبذلك يرفع معامل أداء الدارة زيادة التبريد التي قد تتم في المكثف أو ضمن أنابيب ما بين المكثف والتمدد عند استخدام وسيط الأمونيا أو ضمن مبادل حراري إذا استخدمت الفريونات R22.

$$t_0 = t_{w,c} - \Delta t_{w,0} - \Delta t_{m,0} \quad (1-5)$$

$\Delta t_{m,0}$: فرق درجات الحرارة اللوغاريتمية الوسطية، وتؤخذ عادة:

$$\Delta t_{m,0} = 4 \div 7 C^{\circ}$$

$t_{w,c}$: درجة حرارة دخول المياه إلى المبخر، وتؤخذ عادة:

$$t_{w,c} = 7 \div 15 C$$

$\Delta t_{w,0}$: فرق درجات الحرارة لدخول المياه وخروجها من المبخر (مياه المنبع الحراري)، وتؤخذ عادة:

$$\Delta t_{w,0} = 4 \div 5 C$$

3- تحديد درجة حرارة التكاثف لوسيط التبريد t_c :

تتعلق بدرجة حرارة المستهلك (المياه الساخنة)، وفق العلاقة التالية:

$$t_c = t_{w,c} + \Delta t_{w,c} + \Delta t_w \quad (2-5)$$

$\Delta t_{w,c}$: فرق درجات الحرارة اللوغاريتمية الوسطية، وتؤخذ عادة:

$$\Delta t_{w,c} = 4 \div 8 C^{\circ}$$

Δt_w : درجة حرارة دخول المياه إلى المكثف، وتؤخذ عادة:

$$t_{w,c} = 35 \div 50 C^{\circ}$$

Δt_w : فرق درجات الحرارة لدخول المياه وخروجها من المكثف (مياه التدفئة)،

وتؤخذ عادة:

$$\Delta t_w = 10 C$$

3- تحديد زيادة تبريد وزيادة التسخين:

كما سبق شرح زيادة تسخين بعد المبخر وزيادة تبريد بعد المكثف، كمثال في

الفرع R-22 عادة ما تؤخذ درجة زيادة التسخين حوالي $15-20 C^{\circ}$ ، وزيادة التبريد

حوالي $3-5 C^{\circ}$ في حال استخدام الأمونيا.

4- تحديد نسبة الانضغاط π :

يتم تحديد الضغط P_c, P_0 من مخطط $\log p - h$ وذلك بدلالة درجتي الحرارة t_c, t_0 ومن ثم تحسب نسبة الانضغاط بالعلاقة التالية:

$$\pi = P_c / P_0$$

إذا كانت نسبة الانضغاط أكبر من 9 تؤخذ دورة المضخة الحرارية بمرحلتين انضغاط.

أما إذا كانت نسبة الانضغاط أقل من 9 تؤخذ دورة المضخة الحرارية بمرحلة واحدة (ضاغط ذو مرحلة واحدة).

3-5- عمل الدارة على مخطط LOG P-H

أداء دورة التبريد الانضغاطية البسيطة Performance of VCC:

أ- التأثير التبريدي (RE) Refrigeration effect - استطاعة المبخر:

تعرف كمية الحرارة التي يمتصها كل كيلوجرام واحد من وسيط التبريد في المبخر من الوسط المحيط به من بعد دخوله المبخر حتى خروجه بخاراً مشبعاً وهي تمثل فرق الإنثالبي بين النقطتين (4) و(1)، الشكل (2-5) في حالة دورة التبريد البسيطة كما في حمل المبخر وهي:

$$RE = h_1 - h_4$$

ب- عمل الانضغاط (We) Input Work:

كما سبق لاحقاً فإن وظيفة الضاغط هي العمل على سريان وسيط التبريد في دورة التبريد إضافة إلى رفع ضغط دورة التبريد من ضغط السحب إلى ضغط الطرد. ويحسب شغل الانضغاط بإيجاد فرق الإنثالبي بين مخرج وسيط التبريد ومدخله إلى الضاغط مضروباً في معدل جريان وسيط التبريد في الدورة.

$$W_c = \dot{m} \Delta h$$

وللتدرة الموضحة سابقاً يكون شغل الانضغاط (W_c) هو :

$$W_c = m(h_2 - h_1)$$

ج- حمل المبخر (Q_e) Evaporator load :

يعبر عن حمل المبخر عن معدل الطاقة التي سوف يزيله المبخر من الحيز المبرد المنبع الحراري لو (kw) وهذا يعتمد على حمل التبريد ($cooling load$) للحيز .
وقبل عصر التبريد الميكانيكي كان يستخدم الثلج بانتساع على أنه وسيط تبريد وعليه كان من الطبيعي أن تقارن استطاعة التبريد للثلاجات الميكانيكية بمكافئ انصهار الثلج. فحين ينصهر طن واحد من الثلج؛ فإنه سوف يمتص (وحدة حرارة بريطانية) 288000، فإذا تم انصهار هذا الثلج في يوم واحد 24hours فإن معدل امتصاص الحرارة يكون 12000BTU/h وهذا ما يعبر عنه بطن التبريد:
(Ton of Refrigeration, T.R.) وحمل المبخر (Q_e) في الدائرة المثالية يمكن للتعبير عنه:

$$Q_o = m(h_1 - h_4)$$

$$12000 \text{ BTU} = 1 \text{ ton} = 3.51 \text{ Kw}$$

د- حمل المكثف (حمل المضخة الحرارية):

يعبر عن حمل المكثف عن كمية الحرارة المطروحة نتيجة تحول وسيط التبريد من الحالة التجارية (الغازية) إلى الحالة السائلة.

$$Q_c = Q_H = m(h_2 - h_3)$$

مثال:

مضخة حرارية تعمل على وسيط تبريد R22 حدد بارامترات دائرة هذه المضخة،
عماً بأن الحمل الحراري اللازم للتدفئة $Q_H = 20 \text{ kw}$.

الحل:

1- تحديد درجة حرارة غليان وسيط التبريد t_0 :

$\Delta t_{m,0}$: فرق درجات الحرارة اللوغاريتمية الوسطية، وتؤخذ عادة:

$$\Delta t_{m,0} = 4 \div 7 \text{ C}^\circ$$

نختارها:

$$\Delta t_{m,0} = 6 \text{ C}^\circ$$

$t_{w,0}$: درجة حرارة دخول المياه إلى المبخر، وتؤخذ عادة:

$$t_{w,0} = 7 \div 15 \text{ C}^\circ$$

نختارها:

$$t_{w,0} = 9 \text{ C}^\circ$$

$\Delta t_{w,0}$: فرق درجات الحرارة لدخول المياه وخروجها من المبخر (مياه المتبوع

الحراري)، وتؤخذ عادة:

$$\Delta t_{w,0} = 4 \div 5 \text{ C}^\circ$$

نختارها:

$$\Delta t_{w,0} = 5 \text{ C}^\circ$$

وبالتعويض في العلاقة (1-5) ينتج: $t_0 = 9 - 6 - 5 - 2 \text{ C}^\circ$

2- تحديد درجة حرارة للتكاثف لوسيط التبريد:

وهي تتعلق بدرجة حرارة المستهلك (المياه الساخنة)، وفق العلاقة التالية:

$\Delta t_{m,c}$: فرق درجات الحرارة اللوغاريتمية الوسطية، وتؤخذ عادة:

$$\Delta t_{m,c} = 4 \div 8 \text{ C}^\circ$$

نختارها:

$$\Delta t_{m,c} = 5 \text{ C}^\circ$$

$t_{H,e}$: درجة حرارة دخول المياه إلى المكثف، وتؤخذ عادة:

$$t_{H,e} = 35 + 50\text{ C}$$

نختارها:

$$t_{H,e} = 35\text{ C}$$

Δt_w : فرق درجات الحرارة لدخول المياه وخروجها من المكثف (مياه التفتية)، وتؤخذ عادة:

$$\Delta t_w = 10\text{ C}^\circ$$

وبالتعويض في العلاقة (2-5) ينتج:

$$t_c = 35 + 5 + 10 + 50\text{ C}^\circ$$

3- تحديد زيادة التبريد وزيادة التسخين:

كما أثير في الفقرة (2-5) نقوم بزيادة تسخين بعد المبخر وزيادة تبريد بعد المكثف، وفي الفريون R-22 عادة ما تؤخذ درجة زيادة التسخين حوالي 15 C° ، وزيادة التبريد حوالي 4 C° .

4- تحديد نسبة الانضغاط:

نحدد ضغط P_0 من جداول الإشباع للفريون R-22 وذلك بدلالة درجتي الحرارة t_0 و t_c :

$$P_0 = 4.667\text{ bar} \quad t_0 = -2\text{ C}^\circ$$

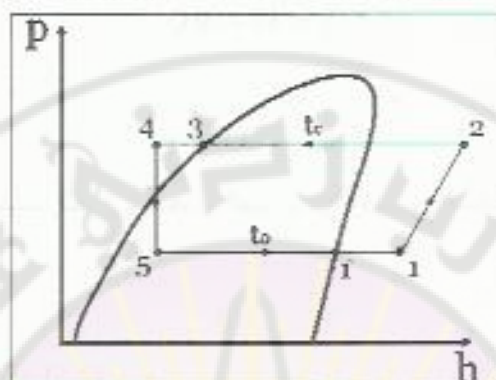
$$P_c = 19.395\text{ bar} \quad t_c = 50\text{ C}^\circ$$

وبالتالي نسبة الانضغاط تكون:

$$\pi_c = P_c / P_0 = 4.2 < 9$$

وبما أن نسبة الانضغاط أقل من 9 لذلك تؤخذ دورة تبريد بمرحلة واحدة (ضغوط ثمر مرحلة واحدة).

تمثيل الدارة على مخطط (log p - h)، كما هو موضح في الشكل (3-5).



الشكل (3-5) تمثيل الدورة الحرارية للمضخة الحرارية على مخطط (log p-h)

النقطة	حالة النقطة	t (C°)	p (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg C°)
1	بخار مشبع رطب	-2	4.667	405.5	1.75
1	بخار محمص	13	4.667	414.2	1.79
2	بخار محمص	90	19.395	454.3	1.79
3	بخار مشبع رطب	50	19.395	262.8	1.21
4	سائل	46	19.395	254.3	1.18
5	بخار مشبع رطب	-2	4.667	254.3	1.2

6- تحديد كمية وسيط التبريد المار في الدارة:

تُعطى كمية وسيط التبريد وفقاً للموازنة الحرارية التالية:

استطاعة المكثف = الحمل الحراري للتدفئة

$$Q_c = Q_{II}$$

$$m_c \cdot \Delta h_c = Q_{II}$$

$$m_c = Q_{II} / \Delta h_c = 20 / (454.3 - 254.3) = 0.1 \text{ Kg/sec}$$

ملاحظة: زيادة التسخين في المكثف.

7- تحديد تدفق المياه اللازمة للتدفئة:

$$Q_c = m_{cw} * C_{p,w} * \Delta t_{w,c}$$

$$m_{cw} = Q_c / (C_{p,w} * \Delta t_{w,c})$$

$\Delta t_{w,c} = 5^\circ C$: فرق درجات حرارة دخول الماء وخروجه

$C_{p,w} = 4.2 \text{ Kj/Kg } ^\circ C$: الحرارة النوعية للماء

Q_c : الحمل الحراري على المكثف وهو يساوي إلى حمل التدفئة.

m_{cw} : تدفق مياه التدفئة في المكثف.

$$m_{cw} = 20 / (4.2 * 5) = 0.95 \text{ Kg/sec}$$

8- تحديد تدفق مياه المنبع الحراري:

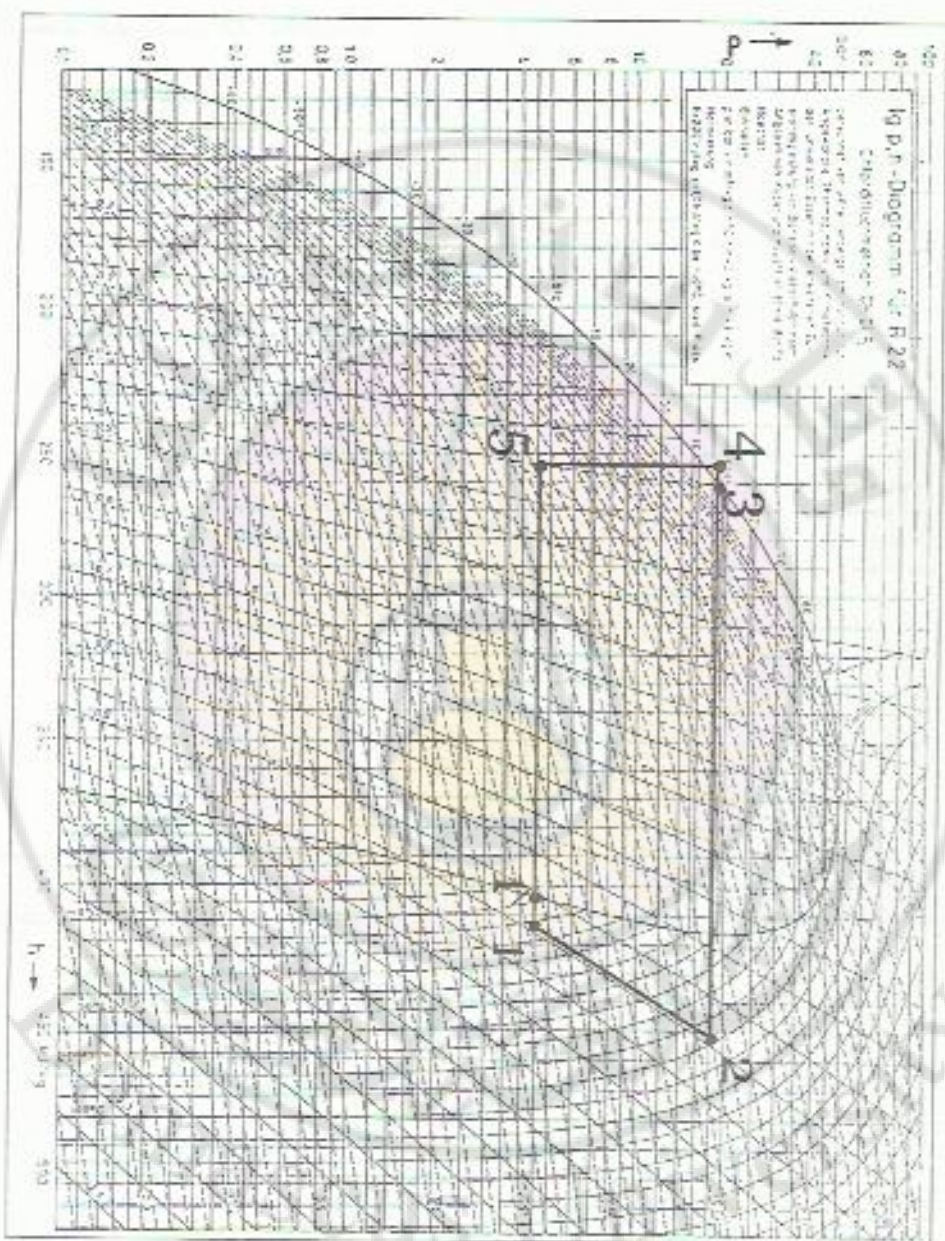
$$m_{w,0} = \frac{m_c (h_1 - h_2)}{C_p * \Delta t_{w,0}}$$

$$m_{w,0} = \frac{0.1 (414.2 - 254.3)}{4.2 * 5} = 0.76 \text{ Kg/sec}$$

ملاحظة: زيادة التسخين ضمن المبخّر.

وتؤخذ سرعة تدفق المياه في الأنابيب:

$$c_w = (0.5 \div 3) \text{ m/sec}$$



الشكل (4-5) مخطط (p-h) للتفريون R-22

4-5- ضاغط المضخة الحرارية:

4-5-1- العوامل المؤثرة على نسبة الانضغاط لعمل الضاغط:

يقاس أداء الضاغط بدلالة استطاعته التبريدية Refrigerating Capacity والقدرة
الفرملية Brake Power والقدرة الفرملية لكل طن تبريد BHP/Ton. وتغير الاستطاعة
التبريدية للضاغط أثناء التشغيل عامل هام لتقرير ما إذا كان نظام التبريد قادراً على
القيام بحمل معين أم لا. وكذلك تغير القدرة الفرملية/ لكل طن تبريد عامل هام لتقرير
ما إذا كان نظام التبريد اقتصادياً أم لا. أما تغير القدرة الفرملية هام لتقرير ما إذا كان
المحرك أو التوربين قادراً على القيام بالحمل المطلوب أم لا. وأهم العوامل التي تؤثر
على أداء الضاغط هي درجة حرارة السحب ودرجة حرارة التكثيف.

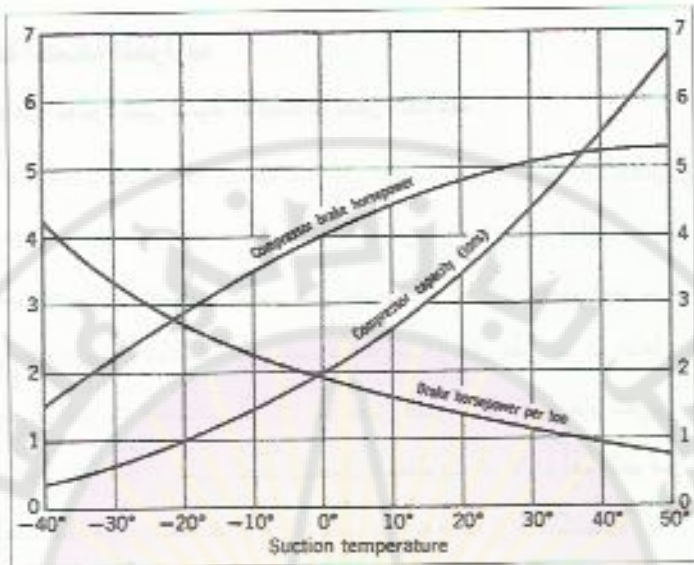
1- درجة حرارة السحب:

- التأثير على الاستطاعة التبريدية للضاغط:

عند ثبوت درجة حرارة التكثيف تقل استطاعة الضاغط مع نقص درجة حرارة
السحب (المبخر)، ويرجع ذلك لأنه كلما قلت درجة حرارة المبخر كلما قل ضغطه
وبالتالي قلت الكثافة لبخار السحب، وبالتالي فإن كمية الفريون التي تسري في الدورة
تقل مع نقص درجة حرارة السحب لإزاحة مكبس معينة.

- التأثير على القدرة الفرملية:

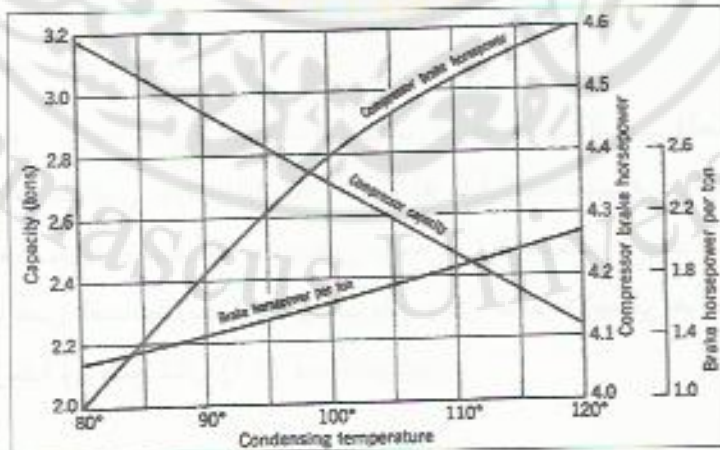
عند ثبوت درجة حرارة التكثيف، فإن خفض درجة حرارة السحب (المبخر) تزيد
من القدرة الفرملية/طن BHP/Ton ولكن القدرة الفرملية الكلية تعتمد في الأساس على
كل من معدل جريان وسيط التبريد، ونقص درجة حرارة المبخر تزيد من تشغيل
الضاغط ونقص الضاغط ونقص معدل السريان، ولكن التأثير الإجمالي هو نقص في
القدرة الفرملية ويوضح شكل (5-5) هذه التأثيرات.



الشكل (5-5) تأثير درجة حرارة السحب على أداء الضاغط

2- درجة حرارة التثقيب:

عموماً، تقل الاستطاعة التبريدية للضاغط مع زيادة درجة حرارة المكثف. ولكن القدرة الفرمالية BHP و القدرة الفرمالية/طن تبريد BHP/Ton تزيد مع زيادة ضغط المكثف وكل ذلك مع ثبوت درجة حرارة السحب (المبخر) وهذه التأثيرات موضحة بالشكل (6-5).



الشكل (6-5) تأثير درجة حرارة التثقيب على أداء الضاغط

2-4-5- نسبة الانضغاط:

تعرف نسبة الانضغاط بأنها نسبة قيمة ضغط التكاثف إلى قيمة ضغط التبخر
تعطى بالعلاقة التالية:

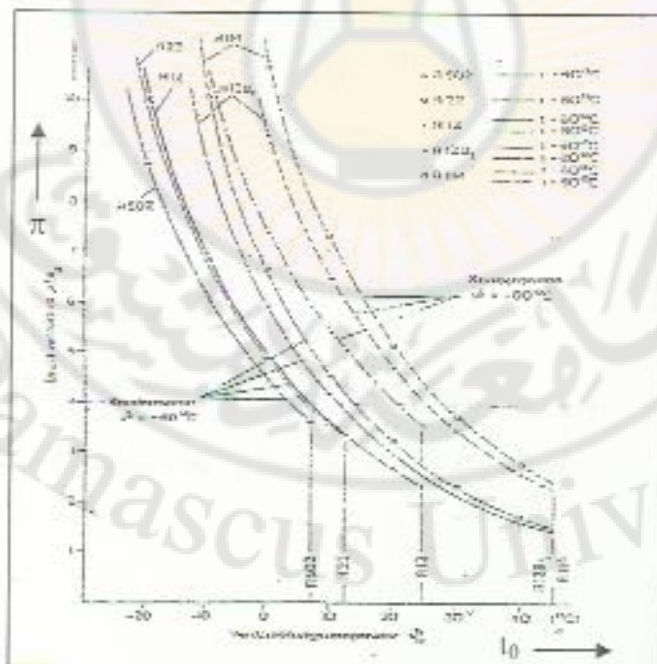
$$\theta = \pi = \frac{P_c}{P_e}$$

وهي كما هو معروف تتعلق بدرجة حرارة التبخر والتكاثف، فهناك علاقة ما بين
الضغط ودرجة حرارة التبخر أو التكاثف.

كلما زادت نسبة الانضغاط ينخفض معامل أداء المضخة الحرارية.

كلما انخفضت درجة حرارة الغليان (التبخر) ينخفض معامل أداء المضخة
لحرارية.

والشكل (7-5) يبين نسبة الانضغاط كتابع لدرجة حرارة الغليان.



الشكل (7-5) نسبة الانضغاط كتابع لدرجة حرارة الغليان

3-4-5- معامل الانضغاط الحجمي λ :

يعطى معامل الانضغاط الحجمي بالعلاقة التالية:

$$\lambda = \frac{V_{ab}}{V}$$

حيث:

V_{ab} : التدفق الحجمي لبخار وسيط التبريد الحقيقي ويقاس بـ $\frac{dm^3}{s}$.

V : التدفق الحجمي للهيدرو.

كلما كبر معامل الانضغاط الحجمي λ كلما كان عمل الضاغط ذو فعالية أكبر.

وتحسب الاستطاعة الحجمية التبريدية كتابع لحمل المبخر ومعامل الانضغاط الحجمي للضاغط وفقاً للعلاقة التالية:

$$q_0 = \frac{Q_0}{V * \lambda}$$

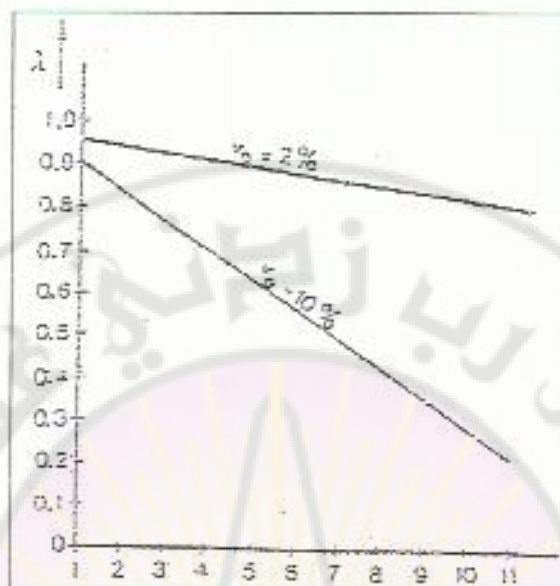
والاستطاعة الحجمية للتسخين وفقاً للعلاقة التالية:

$$q_k = \frac{Q_k}{V * \lambda}$$

حيث Q_k : حمل المكثف.

والشكل (8-5) يبين علاقة معامل الانضغاط الحجمي.

كتابع لنسبة الانضغاط والفرغ الميت في مكبس الضاغط V_0 .



الشكل (8-5) علاقة معامل الانضغاط الحجمي كتابع لنسبة الانضغاط والفراغ الميت

4-4-5 الطاقة الكهربائية للضاغط:

تُحسب الطاقة الكهربائية التي يستهلكها الضاغط وفقاً للعلاقة التالية:

$$P = h_2 - h_1$$

5-4-5 معامل أداء المضخة الحرارية:

كما مر في الفقرات السابقة يُحسب معامل أداء المضخة الحرارية الحقيقي

كما يلي:

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{P} * \eta_{ke}$$

حيث إن η_{ke} معامل أداء الضاغط حيث تعطي هذه القيمة من الشركة الصانعة

للمضاغط.



الفصل السادس

الدارة الامتصاصية للمضخات الحرارية

مقدمة:

إن أكثر طرق التبريد شيوعاً هي التبريد بواسطة انضغاط الغاز ميكانيكياً. ولعلنا نجد في بعض التطبيقات الهندسية صعوبة أو استحالة في استخدام هذه الطريقة للتبريد، أو قد يكون الأفضل اقتصادياً إيدال التبريد بانضغاط الغاز ميكانيكياً بطريقة أخرى أكثر ملاءمة لظروف العمل.

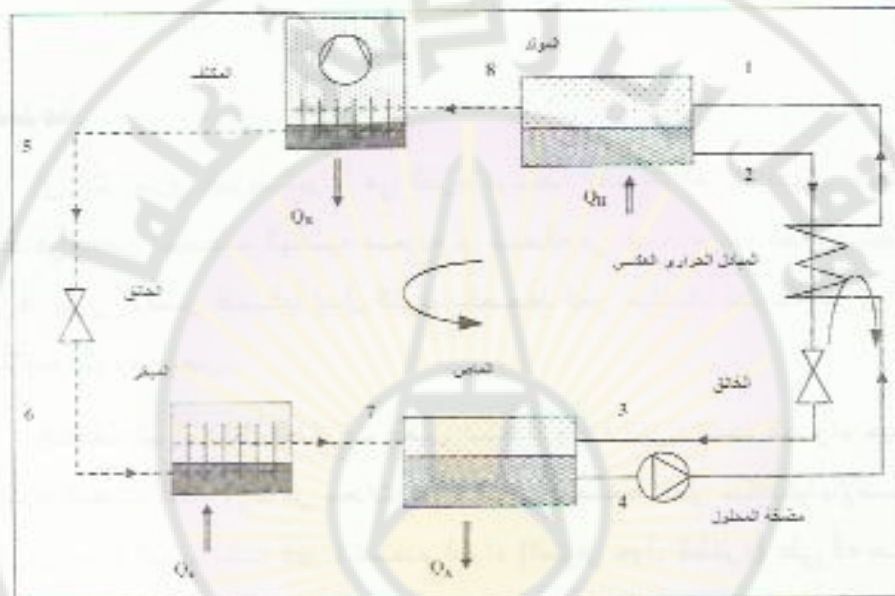
فلتكيف الهواء داخل الطائرات يفضل استخدام وحدة التبريد بتمدد الهواء حيث تصبح المعدات أخف وزناً من معدات دورة التبريد بانضغاط الغاز ميكانيكياً بالإضافة إلى أن دورة التبريد بتمدد الهواء تستخدم الهواء (المتوفر حول الطائرة) على أنه مائع للتبريد أيضاً. عند العمل بمنطقة نائية لا يوجد بها أي مصدر للكهرباء لتشغيل المضاعط فتصبح دورة التبريد بالامتصاص هي الاختيار الأمثل للتبريد في هذه المنطقة.

كما يتطلب تكيف مركبات الفضاء أو بعض الأماكن الصغيرة جداً لبعض الأجهزة العلمية والطبية الدقيقة وحدة تبريد خفيفة الوزن وصغيرة الحجم لتلائم هذه التطبيقات مما يتوافر عند استخدام دورة التبريد الكهروحراري.

مما تقدم يتضح أهمية وجود طرق أخرى للتبريد خلاف التبريد بانضغاط الغاز ميكانيكياً. وسنقوم بعرض الفكرة الأساسية وتصميم دورات التبريد بالامتصاص وتشغيلها.

1.6. مبدأ العمل آلة التبريد الامتصاصية ذات المرحلة الواحدة:

يبين الشكل (1-6) مخطط عمل مضخة حرارية آلة للتبريد الامتصاصية - ذات المرحلة الواحدة:



الشكل (1-6) مخطط الجريان لآلة التبريد
مضخة حرارية الامتصاصية ذات المرحلة الواحدة

Q_H (قدرة المولد) كمية الحرارة الواجب تزويدها في المولد.

Q_0 كمية الحرارة الواجب طرحه من الماص (قدرة الماص).

Q_K كمية الحرارة الواجب طرحه من المكثف (قدرة المكثف).

$Q_K + Q_0$ كمية الحرارة المستفاد منها للمستهلك الحراري.

Q_0 كمية الحرارة المزودة في المبخر (تكافئ قدرة التبريد المطلوبة) (المنبع

الحراري في حال مضخة حرارية).

إن أهم مكونات الآلة الامتصاصية ذات المرحلة الواحدة هي: المكثف (Condenser)، صمام التمدد Expansion Valve، المبخر Vapourator، الماص Absorber، مضخة المحلول Solution Pump، المبادل الحراري الخاص بمزيج التبريد Solution Heat Exchanger (مبادل حراري معاكس)، والمولد Generator.

إن محلول مزيج التبريد ومادة التبريد يجب أن يتصف بخاصيتين أساسيتين وهما: الأولى أن مادة التبريد يجب أن تكون قابلة للتبخر من المحلول بشكل جزئي عند درجات الحرارة المرتفعة نسبياً (درجة حرارة منبع القدرة الساخن الذي يتم تزويده للمولد T_H) والثانية أن يكون محلول مزيج التبريد قادراً على امتصاص بخار مادة التبريد عند درجات حرارة منخفضة نسبياً (درجة حرارة الماص T_A التي تحدد من درجة حرارة وسيط التبريد الذي يشكل الماص والمكثف معاً).

أما عن سير الدورة الترموديناميكية فهو كما يلي:

يتم ضخ محلول مزيج التبريد الغني (غني بمادة التبريد) من الماص (Absorber) إلى المولد Generator. في الدارة المغلقة للآلة، كما هو مبين في الشكل أعلاه توجد دارتان مشتركتان بالماص والمولد. كما هو معروف تستخدم الدورة الأساسية للتبريد بالامتصاص محلولاً متجانساً من مادتين، الأولى هي المادة الماصة، والثانية هي مادة التبريد تسري مادة التبريد في كامل الدورة، لكن محلول مادة التبريد يوجد فقط ضمن الدارة: الماص، مضخة المحلول والمبادل الحراري الخاص بمزيج التبريد والمولد. تتبخر مادة التبريد السائلة في المبخر نتيجة سحب كمية الحرارة Q_0 من المنبع الحراري عند درجة حرارة T_0 أو المواد المراد تبريدها، بعدها يتدفق البخار الناتج إلى الماص حيث يتم امتصاصه من قبل المحلول الضعيف التركيز العائد من المولد عند درجة حرارة الإمتصاص T_A ، وبالتالي يتم امتصاص بخار مادة التبريد من قبل المحلول الضعيف التركيز في الماص، حيث يتم طرح كمية حرارة الامتصاص (تصريفها) إلى ماء أو هواء تبريد الماص أو للمستهلك الحرارة.

يضخ المحلول الغني لمزيج التبريد بواسطة مضخة المحلول من الماص إلى المولد عبر المبادل الحراري المعاكس لمزيج التبريد.

إن العمل الميكانيكي الذي يجب أن تزود به مضخة المحلول قليل نوعاً ما ومهملاً بالنسبة لكمية حرارة المولد لذلك غالباً لا يؤخذ بعين الاعتبار أثناء الحسابات الطاقية للدارة.

بعد ضخ المحلول يسري المحلول الغني في المبادل الحراري لمزيج التبريد (مبادل حراري معاكس) حيث يسخن من قبل المحلول الضعيف التركيز الساخن العائد من المولد إلى الماص.

يتم غلي السائل الغني في المولد عن طريق كمية الحرارة المزودة Q_{II} عند درجة الحرارة المرتفعة T_{II} ، حيث يتم توليد بخار مادة التبريد مرة أخرى من المحلول والتي تم امتصاصها في الماص (يتم تبخر مادة التبريد بشكل جزئي من المحلول الغني التركيز في المولد نتيجة التزويد بكمية الحرارة Q_{II} عند درجة الحرارة T_{II}). في المكثف يتم تكاثف مادة التبريد بفتح عن ذلك طرح كمية حرارة التكاثف Q_K عند درجة حرارة التكاثف T_K وضغط التكاثف P_K إلى الوسط المحيط (ماء وهواء تبريد المكثف) أو لمستهلك الحرارة (مضخة حرارية). بعد خروج سائل مادة التبريد من المكثف يعبر ضمن الخائق حيث يتم تمدده بشكل إيزونتالبي وينخفض الضغط من ضغط التكثيف P_K إلى ضغط التبخير P_0 (ضغط المبخر). في المبخر يتم امتصاص كمية الحرارة Q_0 عند درجة حرارة التبخر T_0 (درجة التبريد المطلوبة في الدارة) المنبع الحراري للمضخة الحرارية، ويتم بذلك تبخر مادة التبريد ثانية وتُدفعها إلى الماص حيث يتم امتصاصها من قبل محلول مزيج التبريد الضعيف التركيز وبذلك تكون دارة التبريد (المضخة الحرارية) أيضاً قد اكتملت.

في المولد يتغير المحلول من محلول مزيج مادة التبريد الغني إلى مزيج مادة التبريد ذو التركيز الضعيف بعد تبخر جزء من مادة التبريد عبر التزويد بكمية الحرارة المولدة Q_{II} .

بعد تبخر جزء من مادة التبريد يعود المحلول الضعيف للتركيز من المولد إلى الماص عبر المبادل الحراري لمزيج التبريد والخالق. في المبادل الحراري للمحلول حيث يعطى قسم من الحرارة إلى المحلول الغني المتدفق عكسياً من المحلول الضعيف للتركيز وبالتالي يبرد المحلول الضعيف للتركيز ويسخن المحلول الغني (تصبح حرارته أعلى من حرارة نهاية عملية الامتصاص). بالنهاية يتم تمدد المحلول الضعيف للتركيز في صمام التمدد حيث ينخفض الضغط من الضغط P_K إلى الضغط P_0 (من ضغط المكثف إلى ضغط المبخر) ومن ثم يعود إلى الماص، وبهذا تكتمل دورة مزيج محلول التبريد.

بالنسبة للمبادل الحراري لمحلول مزيج التبريد له فائدة أساسية في الدارة وهي أنه يقوم بتبريد المحلول الفقير وتسخين المحلول الغني وهذا ما يؤدي إلى تقليل استطاعة التوليد الواجب تغذيتها من المنبع الحراري إلى المولد وبالتالي يؤدي إلى رفع قيمة الكفاءة الحرارية COP لألة التبريد - المضخة الحرارية الامتصاصية.

من جهة ثانية، عبر تبريد المحلول الفقير في المبادل الحراري، يتم خفض استطاعة الامتصاص الواجب طرحها من الماص إلى وسيط تبريد الماص والمكثف. هذه الفائدة تقل أهميتها في حال استخدام الآلة مضخة حرارية.

2.6. الأسس الترموديناميكية لبدأ التشغيل (دارة كارنو لألة المضخة الحرارية الامتصاصية):

تتميز دارة كارنو المثالية بكامل العكسية لكل العمليات الترموديناميكية، حيث تكون الكفاءة في الدارات العملية أقل منها في دارة كارنو النظرية.

في دارة كارنو تتم عملية تمدد مادة التبريد بين المكثف والمبخر بشكل إيزوثيرمي، كما أن عملية تمدد مزيج التبريد بين المولد والماص أيضاً تتم بشكل إيزوثيرمي، لذا يمكن نظرياً الاستغناء عن مضخة محلول مزيج التبريد بين الماص والمولد في الحسابات العملية للدارة يتم إهمال قيمة الاستطاعة التي تحتاجها مضخة

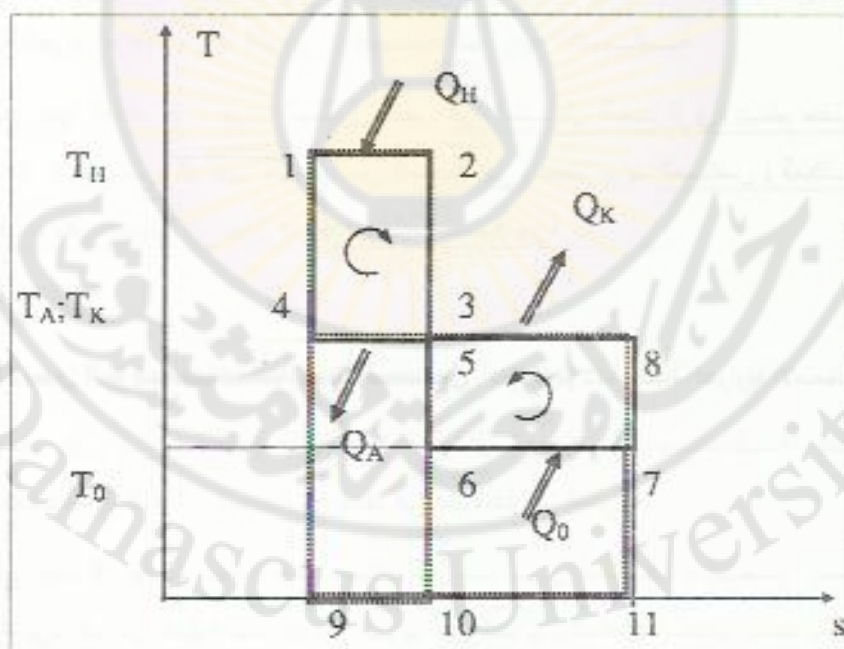
محلول مزيج التبريد مقابل الاستطاعات الأخرى في الدارة، حيث إن استطاعة المضخة لا تتجاوز قيمة 1% من استطاعة المولد.

تحت هذه الشروط يظهر الشكل (2-6) مخطط S-T لآلة المضخة الحرارية الامتصاصية.

هذا المخطط يتألف من دورتي عمل:

1- دورة تجري مع عقارب الساعة التي تظهر من خلال النقاط 1-2-3-4 والتي تصف قسم توليد بخار مادة التبريد.

2- دورة تجري عكس عقارب الساعة التي تظهر من خلال النقاط 5-6-7-8 التي تصف قسماً من المواد التي يراد تبريدها (طاقة التبريد) وطرح حرارة تكثيف مادة التبريد في المكثف.



الشكل (2-6) مخطط T,S لآلة التبريد الامتصاصية ذات المرحلة الواحدة في الدورة المثالية

حيث أن:

T_0 درجة حرارة التبخير .

T_K درجة حرارة التكثيف (النكاثف).

T_A درجة حرارة الامتصاص.

T_H درجة حرارة توليد بخار مادة التبريد في المولد.

المسار من النقطة 1 حتى النقطة 2 يصف توليد مادة التبريد من محلول مادة التبريد عند التزويد بكمية الحرارة المشغلة Q_H ، عندها نفترض أن درجة حرارة مادة المحلول T_H تبقى ثابتة. من النقطة 3 وحتى 4 يتم امتصاص مادة التبريد في الماص عند طرح حرارة الامتصاص Q_A .

يظهر الخط من 2 وحتى 3 التمدد الإيزوثيرمي والخط من 4 وحتى 1 الانضغاط الإيزوثيرمي. نصف المساحة 9-10-2-1 حرارة التسخين المزودة ونصف المساحة 9-11-8-4 كمية الحرارة المستفاد منها من المضخة الحرارية إلى نظام التسخين $Q_A + Q_K$. من جهة أخرى نصف المساحة 11-10-6-7 كمية الحرارة المسحوبة من المنبع الحراري أو المواد المراد تبريدها Q_0 .

في الحالة المثالية يجب أن تكون المساحتان 3-2-1-4 والمساحة 8-7-6-5 متساويتين.

نفترض أن كمية الحرارة المسحوبة من المنبع الحراري عند درجة حرارة الوسط $(T_0 = T_K)$ يكون لدينا:

$$E_{QH} = E_{QA} + E_{QK} \dots\dots (6-2-1)$$

حيث:

E_{QH} الطاقة الواجب تزويدها لآلة التبريد الامتصاصية (Fixergie) ونقدر بـ (kJ).

E_{QA} الطاقة المسلمة من الماص ونقدر بـ (kJ).

E_{QK} الطاقة المسلمة من المكثف ونقدر بـ (kJ).

إن الطاقة E_{Q_0} غير ممثلة في المعادلة (6-2-1) لأن كمية الحرارة المسحوبة عند درجة حرارة الوسط ($T_0 = T_U$) تظهر بشكل (طاقة لا يمكن الاستفادة منها) Energy صافية.

من معادلة Exergie الإكسرجي (الطاقة التي يمكن الاستفادة منها)

$$E_Q = \left(1 - \frac{T_U}{T}\right) Q \dots (6-2-2)$$

بالتعويض في المعادلة (6-2-1) تصبح معادلة التوازن الطاقوي للدائرة كالتالي:

$$\left(1 - \frac{T_U}{T_H}\right) Q_H = \left(1 - \frac{T_U}{T_A}\right) Q_A + \left(1 - \frac{T_U}{T_K}\right) Q_K \dots (6-2-3)$$

T_U درجة حرارة الوسط وتقدر بـ (K)

T_H درجة حرارة المولد وتقدر بـ (K)

T_A درجة حرارة الماص تقدر بـ (K)

T_K درجة حرارة المكثف وتقدر بـ (K)

بافتراض أن درجة حرارة الماص T_A ودرجة حرارة المكثف T_K متساوية ($T_K = T_A = T$)، عندها تعطى نسبة الحرارة ϕ_c لدورة كارنو المثالية (في حال عمل الآلة الامتصاصية مضخة حرارية) بالعلاقة التالية:

$$\phi_c = \frac{Q_H + Q_K}{Q_H} = \frac{1 - \frac{T_U}{T_H}}{1 - \frac{T_U}{T}} = \frac{1 - \frac{T_U}{T_H}}{\frac{1}{T_H} - \frac{1}{T}} = \frac{T_H - T_U}{T_H} \cdot \frac{T}{T - T_U} = \eta_c \cdot \epsilon_c \dots (6-2-4)$$

حيث إن:

η_c عدد كارنو لمجموعة التشغيل.

ϵ_c معامل الاستطاعة للمضخة الحرارية المشغلة.

وفي حال عمل الآلة كآلة تبريد عندها تعطى نسبة الحرارة بالعلاقة:

$$\varphi_c = \frac{Q_0}{Q_H}$$

6-2-1- مخطط الضغط ودرجة الحرارة $\log p, \frac{1}{T}$ لآلة التبريد - المضخة الحرارية الامتصاصية:

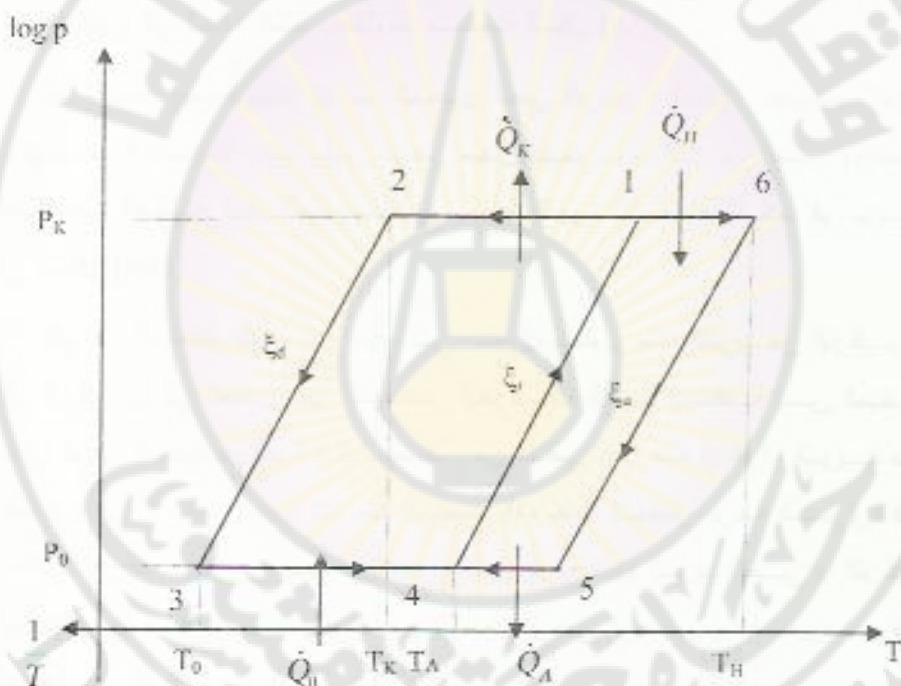
هذا المخطط يعرض العلاقة بين $\log p$ و $\frac{1}{T}$ مع قيم تركيز معينة معطاة وهذه العلاقة تكون في الحالة المثالية خطوطاً مستقيمة للشكل (2-6).

في الحالة العملية يملك كل من المحلول الغني التركيز والمحلول الضعيف التركيز درجات حرارة مختلفة وبهذا يكون عرض مجال التبخر دوماً أكبر من الصفر وبإهمال الضياعات الحاصلة أثناء العمليات يكون مخطط الدورة الامتصاصية كما هو موضح في الشكل (3-6).

في هذا المخطط تعمل الدارة كما يلي: يتحول محلول مادة التبريد من التركيز β إلى التركيز γ في الماص عبر امتصاص أبخرة مادة التبريد المتدفقة من المبخر. بنفس الوقت يتم صرف حرارة الإمتصاص من الماص عبر ماء أو هواء التبريد من النقطة 5 إلى 4 وهذه العملية تتم عند الضغط P_0 ، حيث تنخفض درجة الحرارة في الماص من القيمة T_3 إلى القيمة T_4 . إن محلول مزيج مادة التبريد الغني ذا التركيز المنخفض β الواجب تزويده للمولد من النقطة 4 وحتى النقطة 1 يرافقه زيادة في الضغط من P_0 إلى P_K .

عبر تزويد المولد بالإستطاعة الحرارية (Q_H) عند ضغط التكثيف P_K يتم توليد بخار مادة التبريد من مزيج محلول التبريد عند درجة الحرارة T_H وفي نهاية العملية، يغادر المحلول الضعيف التركيز β المولد عند درجة الحرارة الأعظمية في الدارة T_6 ، ويعود المحلول الضعيف التركيز من النقطة 6 إلى النقطة 5 عبر صمام الاختناق إلى الماص.

من جهة ثانية يسري بخار مادة التبريد المولد من المولد إلى المكثف عند الضغط P_K (من النقطة 1 إلى النقطة 2)، وعند ذلك يبرد البخار وينكثف ويتمدد في صمام الاختناق من النقطة 2 إلى النقطة 3، وفي المبخر يتم امتصاص الحرارة من الوسط المحيط عند ضغط المبخر P_0 حيث يتم تبخير مادة التبريد مرة ثانية عند درجة الحرارة وجريان البخار إلى الماص من النقطة 3 إلى النقطة 4 حيث يتم امتصاصه من قبل المحلول الضعيف التركيز.



الشكل (3-6): مخطط $\log p$ و $\frac{1}{T}$ لآلة التبريد الامتصاصية وحيدة المرحلة

6-2-2-2- الكمية النوعية لدوران محلول مزيج التبريد:

يمكن تغيير تركيز محلول مادة التبريد ξ لمادة التبريد بين الصفر (بدون مسالة التبريد في المحلول) والواحد (مادة التبريد صافية). على سبيل المثال في محلول مزيج التبريد الأمونياك - ماء:

$$\xi = 0 \quad 100\% \text{ ماء} \quad \text{و} \quad 0\% \text{ أمونياك}$$

$$\xi = 1 \quad 0\% \text{ ماء} \quad \text{و} \quad 100\% \text{ أمونياك}$$

في آلة المضخة الحرارية - التبريد الامتصاصية يتم العمل عند التركيز والكميات التالية مع المواصفات التالية:

ξ_1 : تركيز المحلول الغني (يضخ من الماص إلى المولد).

ξ_2 : تركيز المحلول الضعيف التركيز (يعود من المولد إلى الماص).

$\xi_3 - \xi_4 = \Delta \xi$: فرق التركيز بين المحلولين الضعيف التركيز والغني (عرض مجال التبريد).

ξ_5 : تركيز بخار مادة التبريد التي يتم تبخيرها من محلول مزيج التبريد في المولد خاصة في الآلات التي تعمل على الأمونياك باعتبارها مادة تبريد.

تحت كمية المحلول ϕ في المولد مع تركيز ξ_5 وذلك عبر التزويد الحراري يتم تبخير قسم من مادة التبريد من المحلول فيصبح تركيز المحلول ضعيفاً (ξ_6). وبفرض أنه تم تبخير 1 كجم من مادة التبريد من المحلول فإن كمية مادة التبريد الباقية في المحلول ξ_6 ($1 - \phi$) عندها نجد معادلة توازن الكتلة لمادة التبريد بعين الاعتبار فإننا نستطيع كتابة المعادلة:

$$f \cdot \xi_r - 1 \cdot \xi_6 + (f-1) \cdot \xi_5 \dots (6-2-2-1)$$

نحسب كمية الجارية النوعية للمحلول من المعادلة:

$$f = \frac{1 \cdot \xi_6 - \xi_5}{\xi_r - \xi_5} \dots (6-2-2-2)$$

هذه الكمية يتم ضخها من الماص إلى المولد وتتم عودة الكمية ($f-1$) من المولد إلى الماص.

للمحافظة على استطاعة قليلة لتشغيل مضخة المحلول يجب أن تكون كمية محلول مزيج التبريد النوعية صغيرة قدر الإمكان (إنه من المرغوب أن يكون عرض مجال التبخير ΔT من محلول مزيج التبريد أكبر ما يمكن، كما أنه من المرغوب به أن يكون تركيز المحلول الغني بـ C_2 كبيراً).

3-2-6- مخطط الانتالبي والتركيز:

كما يبين الشكل (4-6) العلاقة بين الانتالبي للمحلول وتركيز بروميد الليثيوم في المحلول عند درجات حرارة مختلفة، ويمكن رياضياً تغيير قيمة انتالبي المحلول بدلالة تركيز بروميد الليثيوم في المحلول ودرجة حرارة المحلول من كثيرة الحدود الآتية:

$$h = \sum_0^4 A_n X^n + T \sum_0^4 B_n X^n + T^2 \sum_0^4 C_n X^n$$

حيث تعطى انتالبي المحلول بالكيلوجول لكل كيلوجرام عندما تكون درجة حرارة المحلول T بالدرجة المئوية وفي مدى من 15°C إلى 165°C ، وتستخدم المعادلة السابقة عندما يكون تركيز بروميد في المحلول في مدى من 40 % إلى 70 % بالوزن.

وتعطى قيم المعاملات A, B, C كما يلي:

$A_0 = -2024.33$	$B_0 = 18.2829$	$C_0 = -3.7008214 \text{ E-}2$
$A_1 = 163.309$	$B_1 = -1.1691757$	$C_1 = 2.8877666 \text{ E-}3$
$A_2 = -4.88161$	$B_2 = 3.248041 \text{ E-}2$	$C_2 = -8.1313015 \text{ E-}5$
$A_3 = 6.302948 \text{ E-}2$	$B_3 = -4.0341844 \text{ E-}4$	$C_3 = 9.9116628 \text{ E-}7$
$A_4 = -2.913705 \text{ E-}4$	$B_4 = 1.852069 \text{ E-}6$	$C_4 = -4.4441207 \text{ E-}9$

كما يمكن حساب درجة حرارة الماء المشبع T_s (درجة مئوية) داخل المكثف أو المبخر بدلالة الضغط (kpa) من المعادلة الآتية:

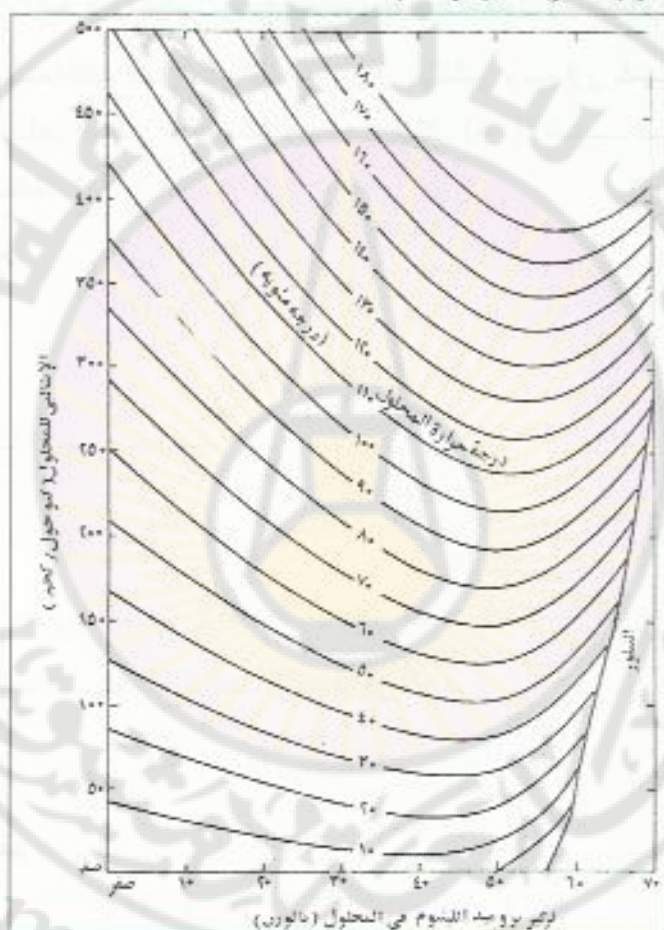
$$T_s = \frac{273}{D + [D^2 - 4E(C - \log P)]^{0.5}}$$

حيث C ثابت مقداره 7.05 و D ثابت مقداره -1596.49 و E ثابت مقداره -104095.5 وتستخدم المعادلة السابقة لدرجات حرارة في مدى من 15°C إلى 110°C

كما يمكن أيضاً استنتاج الضغط P (كيلوباسكال) بدلالة درجة حرارة الماء المشبع T_s (درجة مئوية) من المعادلة الآتية:

$$\text{Log } p = C + D / (T_s + 273) + E / (T_s + 273)^2$$

حيث C, D, E ثابتة عرفت قيمتها سابقاً.



الشكل (4-6) مخطط بين العلاقة بين الاتساع للمحلول وتركيز بروميد الليثيوم في محلول بروميد الليثيوم والماء عند قيم مختلفة

3.6. معادلات توازن الطاقة والكتل لألة المضخة الحرارية. التبريد الامتصاصية:

إن حساب آلة المضخة الحرارية - التبريد الامتصاصية ذات المرحلة الواحدة يمكن أن ينفذ بشكل طاقي مع مراعاة توازن الطاقة والكتلة لعناصر الآلة الأساسية (المولد، الماص، المبادل الحراري لمحلول مزيج التبريد ومضخة المحلول والمكثف والمبخر).

إن هذه المعادلات تطبق على كل من توازن الإنتالبي وتوازن كميات التدفقات داخل الدارة. بأخذ عناصر الدارة الموجودة في الشكل (6-1) أساساً نستطيع كتابة المعادلات التالية:

6-3-1- المبخر:

$$\dot{Q}_0 + \dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_7 \cdot h_7 \dots (6-3-1)$$

$$\dot{m}_8 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6 - \dot{m}_7$$

لدى هذه المعادلة يصلح استخدام:

$$q_0 = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{m}_7} = h_7 - h_6 \dots (6-3-2)$$

$\dot{Q}_0$ التدفق الحراري الساخن الواجب تزويده في المبخر (استطاعة التبريد)

لذلك تعطى الحرارة النوعية الواجب تزويدها في المبخر:

$$q_0 = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{m}_7} = h_7 - h_6 \dots (6-3-3)$$

6-3-2- المكثف:

$$\dot{m}_8 \cdot h_8 - \dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{Q}_K \dots (6-3-4)$$

الحرارة النوعية الواجب صرفها من المكثف:

$$q_K = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{m}_7} = h_8 - h_5 \dots (6-3-5)$$

$\dot{Q}_K$ التدفق الحراري الواجب صرفها من المكثف (استطاعة التكاليف)

6-3-3-3: (وعاء الامتصاص):

$$\dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_7 \cdot h_7 = \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{Q}_A \dots\dots (6-3-6)$$

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_7 = \dot{m}_4 \dots\dots (6-3-7)$$

حيث

$\dot{m}$ كمية التدفق وتقدر بـ kg/s

h انتالبية المواد وتقدر بـ J/kg

$\dot{Q}_A$ كمية الإستطاعة المطروحة من الماص وتقدر بـ W

من أجل كمية حرارة الماص النوعية وبمراعاة المعادلتين (6-3-6) و (6-3-7) يمكن أن تكتب بالشكل التالي:

$$q_A = \frac{\dot{Q}_A}{\dot{m}_7} = (h_7 - h_3) + f \cdot (h_3 - h_4) \dots\dots (6-3-8)$$

حيث إن f هي نسبة المحلول - كمية تدفق المحلول الغني/كمية تدفق مادة التبريد في الدارة.

$$f = \frac{\dot{m}_8}{\dot{m}_7} \dots\dots (6-3-9)$$

6-3-4: المولد:

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{Q}_H = \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_8 \cdot h_8 \dots\dots (6-3-10)$$

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_4 = \dot{m}_2 + \dot{m}_8$$

حيث إن:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_7$$

$\dot{Q}_{II}$ التدفق الحراري الساخن الواجب تزويده في المولد (الاستطاعة اللازمة في المولد)

لذلك تعطى حرارة التسخين النوعية بالعلاقة التالية:

$$q_{II} = \frac{\dot{Q}_{II}}{\dot{m}_1} = (h_8 - h_2) + f \cdot (h_2 - h_1) \dots (6-3-11)$$

5-3-6- المبادل الحراري:

مبادل حراري خاص بمحلول مزيج التبريد (مبادل حراري معاكس)

$$\dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_4 \cdot h_4 = \dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_1 \cdot h_1 \dots (6-3-12)$$

الحرارة النوعية المتبادلة في المبادل الحراري الخاص بمزيج التبريد،

$$q_{WT} = f \cdot (h_4 - h_1) - (f - 1) \cdot (h_2 - h_3) \dots (6-3-12)$$

6-3-6- مضخة تدوير المحلول:

إن مضخة تدوير المحلول ترفع ضغط المحلول الغني من ضغط المصاص $p_0 = p_A$

وحتى ضغط المولد $p_H = p_K$.

تقدر قدرة المضخة النوعية بالمعادلة التالية:

$$w = (p_K - p_0) v = (p_K - p_0) \frac{f}{\rho} \dots (6-3-13)$$

حيث لدينا:

ρ كثافة المحلول الغني $[kg/m^3]$

v الحجم النوعي للمحلول الغني $[m^3/kg]$

تكون قيمة w غالباً مهمة مقابل كميات الحرارة الأخرى.

4.6. توازن الاستطاعات لآلة التبريد الامتصاصية

اعتماداً على الشكل (6-1) نستطيع كتابة معادلة توازن الاستطاعة لآلة التبريد الامتصاصية كما يلي:

$$Q_0 + Q_H + Q_P - Q_K + Q_a \dots (6-4)$$

حيث أن:

Q_0 كمية الحرارة الواجب تزويدها من المولد المراد تبريدها إلى المبخر (فترة المبخر).

Q_H كمية الحرارة الواجب تزويدها إلى المولد.

Q_P كمية الطاقة التي نحتاجها لضخ المحلول (على الأغلب تهمل مقابل طاقة المولد).

Q_K كمية الحرارة الواجب طرحها (صرفها) من المكثف.

Q_a كمية الحرارة الواجب طرحها (صرفها) من الماص.

إن كمية الحرارة المستفادة لآلة التبريد الامتصاصية أثناء تشغيلها مضخة حرارية هي مجموع $Q_K + Q_a$.

5-6- معامل الاستطاعة:

إن فعالية الآلة الحرارية تحدد عبر النسبة الحرارية ϵ_{th} حيث يعرف هذا المعامل على أنه نسبة بين الحرارة المستفادة والحرارة المولدة المستهلكة.

الحرارة المستفادة من المضخة الحرارية هي كمية الحرارة $Q_K + Q_a$ المقدمة من الماص والمكثف إلى نظام التسخين أو التدفئة.

وبإهمال طاقة التوليد لمضخة مزيج مادة التبريد ينتج :

$$\epsilon_{th} = (Q_K + Q_a) / Q_H \dots (6-5)$$

أما في حال استخدام الآلة الامتصاصية آلة تبريد، فإن الاستطاعة المستفاد منها هي استطاعة التبريد وبالتالي تعطى فعالية الآلة الحرارية كنسبة بين كميتي الحرارة Q_0 إلى Q_H حسب العلاقة التالية:

$$\epsilon_{a,b} = Q_0 / Q_{11} \dots (6-5-2)$$

بمراعاة قانون حفظ الطاقة فإن معامل استطاعة المضخة الحرارية الامتصاصية هو أكبر بواحد من معامل استطاعة آلة التبريد الامتصاصية التي تعمل بنفس شروط عمل المضخة الحرارية، وهذا يعني:

$$\epsilon_{rb} = \epsilon_{a,b} + 1 \dots (6-5-3)$$

6.6 الدارات الثنائية للآلات الامتصاصية :

6-6-1- مبدأ عمل آلة المضخة الحرارية الامتصاصية ثنائية المراحل والدارة الترموديناميكية:

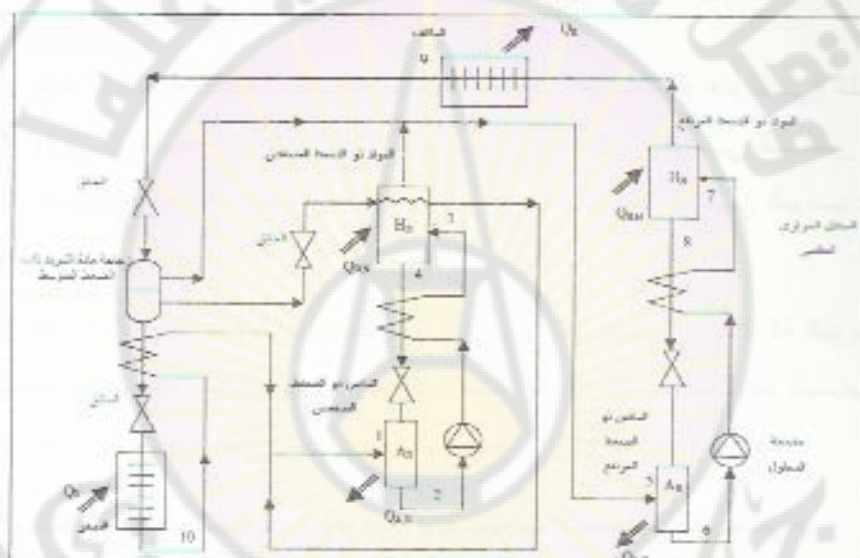
إن المعيار المحدد لعملية امتصاص الحرارة والبرودة هو العرض الموجب لمجال التبخر ($\Delta E > 0$). حيث إن القيم الصغيرة لعرض المجال ΔE تعني أنه يجب ضخ كمية كبيرة من مزيج محلول التبريد من الماص إلى المولد وهذا يعني من جهة أخرى صرف استطاعة أكبر لمضخة محلول مزيج التبريد، وبالتالي مستخفض الفعالية الحرارية لآلة التبريد الامتصاصية، وعندما يكون تغيير البارامترات t_1 , t_2 أو t_3 ليس ممكناً فإنه من المفضل أن تعمل الدارة بمرحلتين أو عدة مراحل.

تبنى آلة التبريد الامتصاصية متعددة المراحل في أغلب الأحيان بتوصيلات متسلسلة لقسم من مركبات الآلة (مضاعفة عدد من مكونات الآلة).

في دارة التبريد الامتصاصية بمرحلتين يكون كل من الماص - المولد - المبادل الحراري ومضخة المحلول الموافقة لمستويات الضغط موجودة بشكل مضاعف، بينما يوجد في الدارة مكثف واحد ومبخر واحد الشكل (5-6).

دارة آلة التبريد الامتصاصية ذات مرحلتين تعمل كما يلي: يستخلص الماص ذو الضغط المنخفض بخار مادة التبريد من المبخر أثناء حصول الماص ذو الضغط المرتفع على بخار مادة التبريد الخاص به من المولد ذي الضغط المنخفض. تنقسم ضغوط العملية إلى ثلاث مستويات:

- ضغط منخفض P_N (مبخر - الماص ذو الضغط المنخفض P_N)
 - ضغط متوسط P_m (المولد ذو الضغط المنخفض G_N - والماص ذو الضغط المرتفع H_m)
 - ضغط مرتفع P_H (المولد ذو الضغط المرتفع G_H والمكثف).
- يجب أن يختار الضغط المتوسط P_m بحيث يكون مجموع استطاعة التسخين لكلا المولدين أصغر وبالتالي تصبح نسبة الحرارة أعظمية.



الشكل (5-6) يوضح آلة التبريد الامتصاصية ذات المرحلتين

يعطى معامل الحرارة لآلة المضخة الحرارية الامتصاصية ذات المرحلتين بهذه الحالة على الشكل التالي:

$$\epsilon_{th} = (Q_0 + Q_1) / (Q_{H,H} + Q_{H,N}) \dots (6-6-1)$$

كما يعطى معامل التبريد لآلة التبريد الامتصاصية ذات المرحلتين بهذه الحالة على الشكل التالي:

$$\epsilon_{th} = \frac{Q_0}{Q_{H,H} + Q_{H,N}} \dots (6-6-2)$$

إن استطاعات التسخين المولد ذا الضغط المرتفع والمنخفض $Q_{H,H} + Q_{H,N}$ توافق كل منهما تقريباً استطاعة التسخين لآلة امتصاصية بمرحلة واحدة وذات نفس استطاعة التبريد.

وبهذا يكون معامل التبريد للآلة هو نصف قيمته لآلة وحيدة الطور، ولكن الفائدة هنا تكمن في أنه يمكن للمرء أن يستخدم طاقة تسخين ذات درجة حرارة منخفضة بشكل أساسي لتشغيل الآلة. وهذه النتيجة هامة جداً عند استخدام الطاقة الشمسية الحرارية لتشغيل آلة التبريد الامتصاصية.

إن هدف استخدام زوجة مادة التبريد ذات الضغط المتوسط (الوعاء البيئي) للشكل (6-6-1) هو أن يصبح بالإمكان إغناء محلول مزيج مادة التبريد في الماص ذي الضغط المنخفض P_N ، هذا يحدث خلال إعادة إنتاج نيار مادة التبريد في المولد ذي الضغط المنخفض.

إن حساب آلة التبريد الامتصاصية ذات المرحلتين هو مشابه لحساب آلة التبريد الامتصاصية ذات المرحلة الواحدة مع مراعاة مضاعفة المركبات: المولد، الماص، المبادل الحراري لمحلول مزيج التبريد ومضخة محلول مزيج التبريد والخلاطات.

6-6-2 مخطط الضغط - الحرارة $(\log p \text{ و } \frac{1}{T})$ لآلة التبريد الامتصاصية ثنائية المراحل:

يظهر الشكل (6-6) مخطط الضغط - الحرارة $(\log p \text{ و } \frac{1}{T})$ لآلة التبريد الامتصاصية ثنائية المراحل وهذه الدارة الترموديناميكية تتم كما يلي:

تتم عملية الامتصاص في قسم الضغط المنخفض في الماص ذي الضغط المنخفض من 1 إلى 2 بعدها يرفع المحلول اللغني عبر مضخة المحلول الأولى من الضغط P_0 إلى الضغط P_m ويضخ إلى المولد ذي الضغط المنخفض.

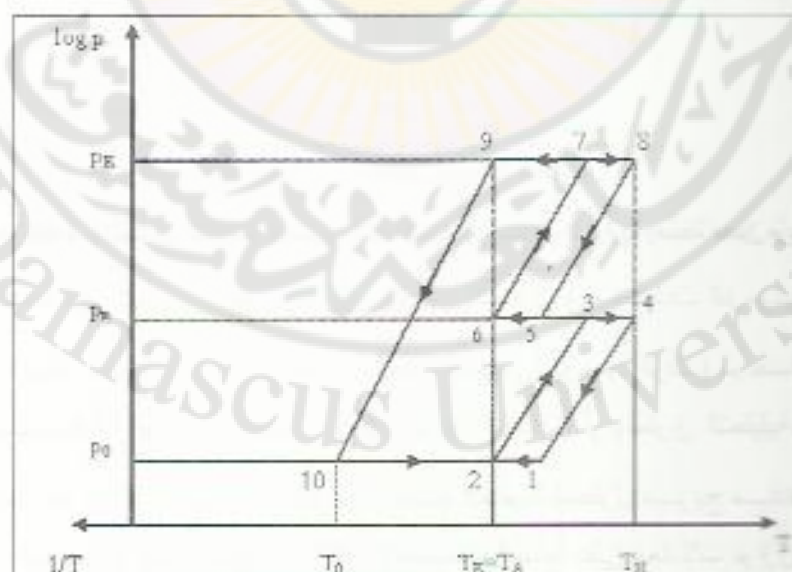
وخلال تزويد طاقة التسخين للمولد ذي الضغط المنخفض تولد مادة التبريد من محلول مزيج مادة التبريد من 3 إلى 4. يصل بخار مادة التبريد في الماص ذي الضغط

المرتفع من 5 إلى 6 بينما يعود المحلول الضعيف التركيز إلى الماص ذي الضغط المنخفض من 4 إلى 1.

ترفع مضخة المحلول الثانية للمحلول الغني من الماص ذي الضغط المرتفع إلى المولد ذي الضغط المرتفع وعندها من الضغط المتوسط إلى ضغط التكثيف (من 6 إلى 7).

الآن عبر تزويد المولد ذي الضغط المرتفع بالحرارة يتم توليد بخار مادة التبريد وجريتها إلى المكثف (من 7 إلى 9) في المكثف يتم تكاثف (تكثيف) بخار مادة التبريد عبر تصريف حرارة التكثيف إلى الوسط الخارجي أو إلى ماء التبريد. بعد ذلك يدخل سائل التبريد عبر صمام التمدد إلى المبخر ماراً بزجاجة مادة التبريد من 9 إلى 10 وبذلك تكون دورة مادة التبريد قد اكتملت.

بهذا التصميم يتم اختيار درجة حرارة المكثف بشكل مساوٍ لدرجة حرارة الماص لكلتا المرحلتين $(T_9 = T_6 = T_2 = T_8)$. حيث إن دورة ماء التبريد هي واحدة لكلتا المرحلتين، كما أن دورة ماء التوليد ذي الحرارة الأعظمية واحدة لكلتا المرحلتين $(T_8 = T_6 = T_2)$.



يوضح الشكل (6-6) العلاقة بين $\frac{1}{T}$ و $\log p$ لآلة التبريد الامتصاصية ذات المرحلتين

7-6- تصميم آلة المضخة الحرارية الامتصاصية:

مقدمة عامة:

لإجراء الحساب الحراري لآلة التبريد الامتصاصية ستقوم بعرض موجز للأساسيات النظرية اللازمة.

لذلك يتم إجراء الحساب بتحديد كمية الحرارة المستخدمة (المستهلكة أو الواجب تصريفها) في كل جهاز. بعدها يمكن أن يتم حساب مساحات التبادل الحراري اللازمة من التدفقات الحرارية المحسوبة والمعطاة.

بالإضافة إلى المخططات النوعية الحرارية فإنه يجب اعتبار المحددات التالية:

- حرارة الانحلال المتعلقة بتركيب المحلول ودرجة الحرارة.
- السعة الحرارية النوعية لمحلول الامتصاص والمتعلقة بالتركيب ودرجة الحرارة وفي مجال الحساب بمعرفة السعة الحرارية النوعية للمحلول ومادة التبريد يمكن تحديد السعة الحرارية للخليط بناءً على قواعد المزج. (حساب القيم الوسطية لمزيج ما).
- كثافة المحلول باعتبارها علاقة بالتركيب ودرجة الحرارة.
- السعة الحرارية النوعية وكثافة بخار مادة التبريد.
- اللزوجة والموصلية الحرارية للمحلول ومادة التبريد.

7-6-1- معادلات التوازن الطاقية لعناصر الآلة الأساسية (المبادلات الحرارية ومضخة محلول مزيج التبريد):

تؤخذ القيم المذكورة أعلاه عند الحساب من الجداول والمخططات الترموديناميكية، بالنسبة لمحلول مزيج مادة التبريد الجديد (اسيتون/ بروميد الزنك) ثم حساب القيم الترموديناميكية والفيزيائية الخاصة به عن طريق القياسات أو بالطرق التحليلية.

بعد معرفة القيم الفيزيائية والترموديناميكية الخاصة لمحلول مزيج مادة التبريد ومادة التبريد يتم حساب مكونات الآلة الامتصاصية بناءً على معادلات توازن الطاقة والكتلة لكل مركب (بشكل مشابه لما ورد في الفقرة السابقة).

6-1-1-7-1- المعادلة الطاقةية للمكثف:

تقتر حرارة التكثيف الواجب صرفها من المكثف بالعلاقة التالية:

$$q_k = C_{p,d}(T_H - T_k) + r + C_{p,l}(T_k - T_n) \dots (6-7-1-1)$$

حيث إن:

$C_{p,d}$ السعة الحرارية النوعية لبخار مادة التبريد [kJ/kgK]

$C_{p,l}$ السعة الحرارية النوعية لمادة التبريد السائلة [kJ/kgK]

T_H درجة حرارة توليد البخار في المولد [K]

T_k درجة الحرارة التكثيف [K]

T_n درجة حرارة التبريد التحتي (تحت خط الإنشباع السائل) [K]

r حرارة التكثيف النوعية لوسيط التبريد وتقدر بـ [kJ/kg]

T_n حرارة التبخير النوعية لوسيط التبريد [kJ/kg]

يرافق التعبير $C_{p,d}(T_H - T_k)$ التسخين الفوقي (فوق خط البخار المشبع) و $C_{p,l}(T_k - T_n)$ التبريد التحتي لمادة التبريد.

6-1-1-7-2- المعادلة الطاقةية للمبخر:

بغض النظر أنه لا يوجد إعادة تبريد للسائل تعطي معادلة طاقة التبريد النوعية كما يلي:

$$q_0 = r_0 + C_{p,l}(T_n - T_0) \dots (6-7-1-2)$$

حيث T_0 درجة حرارة التبخير لوسيط التبريد في المبخر.

6-1-1-7-3- المعادلة الطاقةية للمض:

في المض تحري العملية كالتالي:

لأن تكثف مادة التبريد الداخلة بشكل بخار عند الضغط p_0 عندها تعود من درجة حرارة التسخين الفوقي عند ضغط التبخير الموافقة لدرجة حرارة

التبخير $T_0 = T_s$ (درجة حرارة الاشباع)، بعدها تسخن مادة التبريد السائلة حتى درجة حرارة المحلول المتوسطة T_{Am} وبالنهيائية يتم انحلال مادة التبريد المكتنفة في المحلول. وبذلك تحصل على حرارة المحلول. لدى حساب كمية الحرارة الواجب صرفها من الماص تؤخذ القيم الوسطية لكل من حرارة الانحلال وحرارة النوعية وكميات المحلول بعين الاعتبار.

يقدر التركيز المتوسط في الماص بـ:

$$\xi_m = \frac{\xi_r + \xi_n}{2} \dots\dots (6-7-1-3-1)$$

تتألف كميات الحرارة الكلية الواجب صرفها من الماص من الأقسام التالية:

1. إن المحلول الضعيف التركيز الداخل في الماص بدرجة حرارة T_{Ac} . يفترض أن يسخن إلى درجة الحرارة البدائية T_{Aa} لعملية الامتصاص (طالما $T_{Ac} < T_{Aa}$)، ولكن هذه الحالة نادرة الحدوث وكمية الحرارة هذه تقدر كما يلي:

$$q_{A1} = -(f-1)C_s(T_{Aa} - T_{Ac}) \dots\dots (6-7-1-3-2)$$

(إشارة الناقص تدل على أنه يجب تزويد هذه الحرارة للمحلول الضعيف التركيز)

2. بعدها يبرد المحلول خلال عملية الامتصاص من T_{Aa} إلى درجة حرارة الامتصاص النهائية T_{Af} .

إن كمية المحلول المتوسطة الواجب تبريدها تعطى بالعلاقة التالية:

$$f_m = (f + f - 1)/2 = f - 1/2 \dots\dots (6-7-1-3-3)$$

كمية حرارة التبريد تقدر كما يلي:

$$q_{A2} = f_m * C_m(T_{Aa} - T_{Af}) = \frac{2\xi_n - \xi_r - \xi_f}{2(\xi_r - \xi_f)} * C_m(T_{Aa} - T_{Af}) \dots\dots (6-7-1-3-4)$$

3. حرارة الانحلال والتبريد لبخار مادة التبريد:

$$q_{A3} = r_0 + 1 - C_n(T_{Am} - T_0) \dots\dots (6-7-1-3-5)$$

4. التبريد التحتي للمحلول من درجة حرارة نهاية الإمتصاص T_{AE} إلى درجة حرارة المحلول أثناء خروجها من الماص T_{AM} . تقدر كمية الحرارة الواجب صرفها كما يلي:

$$q_{A4} = f * C_p (T_{AE} - T_{AM}) \dots (6-7-1-3-6)$$

بالنهاية تقدر حرارة الماص الكلية الواجب صرفها (مجموع كميات الحرارة من 1 إلى 4) بالعلاقة التالية:

$$q_A = q_{A1} + q_{A2} + q_{A3} + q_{A4} \dots (6-7-1-3-7)$$

$$q_A = -(f-1)C_s(T_{AA} - T_{AE}) + \frac{2\xi_f - \xi_p - \xi_r}{2(\xi_f - \xi_p)} * C_m(T_{AA} - T_{AE}) + f_0 + (f-1) * C_m(T_{AM} - T_0) + f * C_p(T_{AE} - T_{AM}) \dots (6-7-1-3-8)$$

حيث:

T_{AE} درجة حرارة المحلول بنهاية عملية الإمتصاص [K]

T_{AA} درجة الحرارة البدائية لعملية الإمتصاص [K]

T_{AM} درجة حرارة الدخول للمحلول الضعيف للتركيز في الماص [K]

T_{AE} درجة حرارة الخروج للمحلول الغني من الماص [K]

f كمية النوعية للمحلول الغني [kg/kg]

C_p السعة الحرارية النوعية للمحلول الغني [kJ/kgK]

4-6-7-4- المعادلة الطاقية للمبادل الحراري لمحلول مزيج التبريد:

عند استخدام المبادل الحراري الخاص بمزيج التبريد يبرد السائل الضعيف التركيز من درجة الحرارة T_{HE} إلى درجة الحرارة T_{AE} ويسخن المحلول الغني من درجة حرارة T_{AE} إلى درجة الحرارة T_{HE} . لدى عملية التبريد يسخن المحلول الغني بالمقدار التالي:

$$q_{wt} = f * C_p (T_{HE} - T_{AE}) - (f-1) * C_s (T_{HE} - T_{AE}) \dots (6-7-1-4-1)$$

من المعادلة (6-7-1-4-1) يمكن تحديد درجة حرارة الدخول للمحلول الغني في

المولد كما يلي:

$$T_{He} = \frac{(f-1) * C_a(T_{HE} - T_{AL}) + f * C_r * T_{AL}}{f * C_r} = T_{AE} + \frac{C_a}{C_r} * \frac{(f-1) * (T_{HE} - T_{AE})}{f} \dots (6-7-1-4-2)$$

لدى التبادل الحراري الكامل في الماص $(T_{AE} = T_{AL})$ وبافتراض أن $C_r > C_a$

$$T_{He} = T_{AE} + \frac{(f-1) * (T_{HE} - T_{AE})}{f} \dots (6-7-1-4-3)$$

في التطبيق العملي تقدر فروق درجات الحرارة بين المحلول الضعيف التركيز الداخل

في الماص T_{AE} والمحلول الغني الخارج من الماص T_{AL} تقريباً من 5-8K وهذا يعني:

$$T_{AE} = T_{AL} + (5 \text{ to } 8) \text{ K} \dots (6-7-1-4-4)$$

هذه القيمة يجب أن تؤخذ بالحسبان عند التصميم.

6-7-1-5- المعادلة الطاقة للمولد:

عند حساب المولد يتم تحديد قيم استطاعات ومساحات التسخين كما يلي:

تتألف حرارة التوليد الضرورية من الأجزاء التالية:

- الحرارة المزودة لرفع درجة حرارة المحلول الغني من الدرجة T_{HE} إلى T_{HA} وهذه الحرارة تقدر بـ:

$$q_{HI} = f * C_r (T_{HA} - T_{HE}) \dots (6-7-1-5-1)$$

كمية المحلول الوسطية $f_m = (f+f_1)/2$ يجب أن تسخن من درجة الحرارة T_{HA} إلى درجة الحرارة T_{HE}

$$q_{H2} = f_m * C_m (T_{HE} - T_{HA}) \dots (6-7-1-5-2)$$

- الحرارة اللازمة لتبخير مادة التبريد من المحلول المغلي:

$$q_{H3} = (C_{pd} - C_B) * (T_{H3} - T_k) + r + L \dots (6-7-1-5-3)$$

T_{Hm} درجة حرارة المحلول المتوسطة في المولد عند ضغط التكثيف p_k وتقدر بـ K

T_{Hm} درجة الحرارة النهائية للمحلول في المولد عند ضغط التكثيف p_k

(بنهاية عملية التوليد لأبخرة مادة التبريد) وتقدر بـ K

T_k درجة حرارة المكثف عند ضغط التكثيف

I كمية حرارة الانحلال وهي الحرارة اللازمة لفصل بخار مادة التبريد من مادة

الامتصاص وتقدر بـ kJ/kg

r حرارة التكثيف لمادة التبريد وتقدر بـ kJ/kg

يتم افتراض أن البخار المولد يترك المولد بدرجة حرارة T_{Hm} وبالنهية يقدر المعدل

الكلّي لكمية حرارة التسخين المزودة للمولد (اللازم تزويدها للمولد) بالعلاقة التالية:

$$\begin{aligned} q_{Hm} &= q_{H1} + q_{H2} + q_{H3} \\ &= fC_p(T_{H1A} - T_{H1e}) + f_m C_m(T_{H1e} - T_{H1A}) + (C_{pd} - C_{pf})(T_{H1m} - T_k) + r + I \end{aligned} \quad \dots\dots(6-7-1-5-3)$$

6-1-7-6- المعادلة الطاقية لمضخة محلول مزيج التبريد:

إن مضخة المحلول ترفع ضغط المحلول الغني من ضغط المأص $p_A - p_V$ وحتى

ضغط المولد $p_H = p_k$.

تقدر قدرة المضخة النوعية بالمعادلة التالية:

$$w = (p_k - p_0)v = (p_k - p_0) \frac{f}{\rho} \quad \dots\dots(6-7-1-6)$$

حيث أيضاً:

ρ كثافة المحلول الغني $[kg/m^3]$

v الحجم النوعي للمحلول الغني $[m^3/kg]$

تكون قيمة w غالباً مهملة مقابل كميات الحرارة الأخرى.

7-1-7-6- معادلة التوازن الطاقية:

تعطى معادلة توازن الحرارة لألة التبريد الإمتصاصية (ARM) من مجموع كامل كميات الحرارة كما يلي:

$$q_{II} = q_0 + w = q_k + q_A \dots\dots(6-7-1-7)$$

8-1-7-6- الفعالية الحرارية للألة الإمتصاصية:

تعطى نسبة الحرارة لألة التبريد الإمتصاصية فكرة عن قدرة التسخين اللازمة عند استطاعة تبريد محددة:

$$\epsilon_0 = \frac{q_0}{q_{II}}$$

$$\epsilon_0 = \frac{r_0 - C_0(T_0 - T_0)}{fC_r(T_{HA} - T_{HE}) + f_m C_m(T_{HE} - T_{HA}) + (C_{pd} - C_0)(T_{lim} - T_k) + r + 1} \dots\dots(6-7-1-8)$$

2-7-6- حساب مساحات التبادل الحراري اللازمة لمبادلات آلة التبريد الإمتصاصية اعتماداً على الاستطاعة المطلوب تبادلها عبر المبادل:

عند حساب المبادل الحراري تؤخذ النفاط الأساسية التالية بالحسبان:

كلما كان الجريان مضطرباً وكلما كان معدل دوران المبادل أكبر كلما كان ضياع الضغط أكبر.

- إن ضياع الضغط المرتفع يعني أنه يلزم الكثير من طاقة الضخ لمضخة المبادل، لذا من المفروض المحافظة على جعل قيمة ضياع الضغط أصغرية قدر الإمكان.

1-2-7-6- حساب معامل الانتقال الحراري الكلي:

تستخدم المعادلة التالية لتحديد معامل الانتقال الحراري:

$$k = \frac{1}{\frac{A_1}{A_i} \left(\frac{1}{\alpha_1} + R_i \right) + \frac{\delta}{\lambda} * \frac{A_1}{A_m} + \frac{1}{\alpha_2} + R_2} \dots\dots(6-7-2-1-1)$$

6-2-2-7-2- حساب معامل النقل الحراري α_1 :

$$\alpha_1 = \frac{Nu * \lambda_w}{d_i} \dots (6-7-2-2-1)$$

$$Nu = 0,037 * (Re^{0,75} - 180) * Pr^{0,42} \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{0,667} \right] \dots (6-7-2-2-2)$$

$$Re = \frac{w * d_i}{\nu} \dots (6-7-2-2-3)$$

$$Pr = \frac{\nu * \rho * C}{\lambda_w} = \frac{\eta * C}{\lambda_w} \dots (6-7-2-2-4)$$

حيث:

α_1 معامل النقل الحراري من الوسيط الحراري الأول إلى جدار الأنابيب $[W/m^2K]$

α_2 معامل النقل الحراري من جهة سائل التبريد $[W/m^2K]$ (من جدار الأنابيب إلى الوسيط الحراري الثاني مثلاً سائل التبريد).

l الطول الوصفي للأنبوب $[m]$

d قطر الأنبوب الداخلي $[m]$

ν لزوجة السائل الحركية $[m^2/s]$

ρ كثافة السائل $[kg/m^3]$

w سرعة جريان السائل في الأنابيب $[m/s]$

Re عدد رينولد

A مساحات التبادل الحراري $[m^2]$

Nu عدد نوسلت

λ قابلية التوصيل الحراري للسائل $[W/(mK)]$

Pr عدد براندل

C السعة الحرارية النوعية عند ضغط ثابت $[kJ/(kgK)]$

تصلح المعادلة (6-2-2-7-2) من أجل الأنابيب الناعمة التي تقع في مجال

رينولد من 3000 وحتى 10000 (الجريان المضطرب) $Re = 30000$ حتى 1000000.

3-2-7-6- حساب معامل النقل الحراري α_2 :

لحساب α_2 معامل النقل الحراري من جهة سائل التبريد يوجد عدة معادلات أو فرضيات مرتبطة بالنقل الحراري في حالتي التكثيف أو تبخير مادة التبريد.

(a) حساب α_2 عند التكثيف:

لحساب معامل النقل الحراري المتوسط وبافتراض أن سرعة الأبخرة المنكففة صغيرة ($\theta < 5 \text{ m/s}$) يمكننا استخدام المعادلات التالية:

$$\alpha_2 = C \left(\frac{\lambda^3 \rho_n (\rho_n - \rho_a) r g}{\eta_n \Delta T} \right)^{0.25} \dots (6-7-2-3-1)$$

حيث:

- $C = 0.943$ (للجريان العمودي مثال على ذلك الجريان على ضلع الأنبوب الأفقي).

- $C = 0.725$ من أجل الجريان على الأنابيب المتوضعة بشكل أفقي.

- $\Delta T = T_s - T_{\text{sat}}$ الفرق بين درجة حرارة التكثيف المشبعة ودرجة حرارة جدار الأنابيب.

- l الطول المميز (يوافق هذا الطول ارتفاع الأنبوب من أجل مساحات التكثيف العمودي وتوافق قطر الأنبوب من أجل الأنبوب ذي الوضع الأفقي) ويقدر بـ المتر.

- r إنتالبية التبخير لمادة التبريد (بأخذ إنتالبية التسخين الفوقي بعين الاعتبار) ويقدر بـ $[\text{J/kg}]$.

- ρ_n الكثافة النوعية لمادة التبريد في الحالة السائلة ويقدر بـ $[\text{kg/m}^3]$

- ρ_a الكثافة النوعية لمادة التبريد في الحالة البخارية ويقدر بـ $[\text{kg/m}^3]$

- $g = 9.8$ التسارع الجاذبية الأرضية ويقدر بـ m/s^2

تعتمد هذه القيم للسائل المكثف ويمكن أن تجمع في معامل واحد.

هناك إمكانية أخرى لتحديد α_2 عند الأنابيب الأفقية حيث يحسب α_2 من تدفق الكميات المكتفة كما يلي:

$$\alpha_2 = 0,954 \left(\frac{\lambda^3 \rho^3 g}{\eta} \right)^{1/3} \left(\frac{\dot{m}}{L} \right)^{1/3} \dots (6-7-2-3-2)$$

حيث:

$\dot{m}$: دسمة الجريان لمادة التبريد.

L : طول الأنابيب الأفقية ويقدر بـ المتر.

(b) حساب α_2 عند التبخر:

يتعلق معامل النقل الحراري لدى التبخر بفرق درجة الحرارة المولدة بشكل خاص من كثافة التدفق الحراري، من أجل شدة النقل الحراري تكون عمليات تشكيل الفقاعات مهمة. لهذا فإنه يجب أن يؤخذ بالحسبان بعض المعاملات المؤثرة لتحديد معامل النقل الحراري التي هي على سبيل المثال:

- المعطيات الهندسية للمبادل الحراري (التبخر على الأنبوب - قطر الأنبوب والزعقة إن وجدت.....).

- محددات العمل (ضغط التبخير ودرجة الحرارة للتبخير - كثافة التدفق الحراري

- كثافة التدفق الكتلي - سرعة الجريان).

- مواصفات المواد.

- طبيعة مواد الجدار (خشونة المساحات السطحية، طريقة توضع المسائل وجريانه على سطح الأنبوب).

بما أن هذه العوامل المؤثرة تكون مختلفة من أجل كل حالة عمل فإنه ينصح باستخدام قيم تجريبية لمعادلة بسيطة من أجل الاستعمالات العملية هذه المعادلة هي:

$$\alpha_2 = \phi q^m p^n R^l \dots (6-7-2-3-3)$$

مثلاً بالقيمة: NH_3 ثابت يعلق بمادة التبريد يعطى من أجل Φ للأنبوب الأفقي

$$\Phi_{\text{NH}_3} = 2,59$$

هذا الثابت يجب استنتاجه من أجل كل مادة تبريد من القيم التجريبية.

$\dot{q}$ كثافة السالة الحرارية (التحميل النوعي الحراري لسطح المبادل) ويقدر بـ W/m^2

p ضغط التبخير ويقدر بـ bar

R خشونة الأنبوب ويقدر بـ μm

n, m, l ثوابت، حيث تأخذ القيم التالية في حالة الأنبوب الأفقي كالتالي:

$$n = 0,7, m = 0,13, l = 0,133$$

نراعى أحجام التأثير في المعاملات المعطاة أعلاه ϕ و n, l حيث إن قيم هذه العوامل تجريبية وتختلف من مادة تبريد لأخرى.

4-2-7-6- حساب مساحة التبادل الحراري للمبادل:

تحتسب مساحات التبادل الحراري اللازمة لنقل الحرارة من الاستطاعة المنقولة:

$$Q = Ak\Delta T_m \Rightarrow A = \frac{Q}{k\Delta T_m} \dots\dots (4-7-2-4)$$

حيث إن:

A مساحات التبادل الحراري اللازمة للمبادل الحراري المحسوب $[\text{m}^2]$

Q الاستطاعة المنقولة $[\text{W}]$

ΔT_m فرق درجة الحرارة اللغاريتمي المتوسط في المبادل الحراري $[\text{K}]$

k معامل الانتقال الحراري الكلي لمادة المبادل الحراري $[\text{W/m}^2\text{K}]$

إن فرق درجة الحرارة اللغاريتمي المتوسط في المبادل الحراري يحسب من المعادلة التالية:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{\text{groß}} - \Delta T_{\text{klein}}}{\ln \frac{\Delta T_{\text{groß}}}{\Delta T_{\text{klein}}}}$$

حيث:

$\Delta T_{\text{سم}}$: هو فرق درجة الحرارة الأعظمي بين كل من وسيطي الجريان في المبادل الحراري (لدى المدخل والمخرج من المبادل الحراري) مقدرة بـ K .

$\Delta T_{\text{مت}}$: فرق درجة الحرارة الأصغري بين كل من وسيطي الجريان للمبادل الحراري (لدى المدخل والمخرج من المبادل الحراري) مقدرة بـ K .

8-6- الدارة الإمتصاصية العاملة على ماء - بروميد الليثيوم:

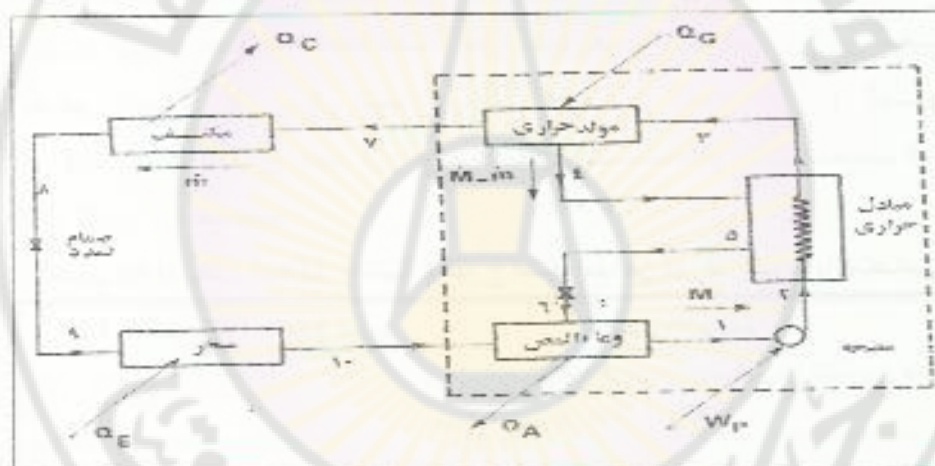
عملياً تنحصر استخدامات دورات التبريد بالإمتصاص في استخدام محلول الماء وبروميد الليثيوم ومحلول الأمونيا والماء نظراً لتفوق هذين المحلولين في تحقيق الخواص المطلوبة على باقي المحاليل المذكورة في الجدول (6-1). الجدول (6-1) يشتمل على نماذج بعض أزواج مواد العمل المستخدمة، أو التي استخدمت في آلات التبريد الإمتصاصية.

الجدول (6-1) بعض المحاليل الثنائية المقترح استخدامها في دورات التبريد بالإمتصاص

مادة الامتصاص	مادة التبريد	مجال الاستخدام
H_2O	NH_3	من أجل استطاعة التبريد الصغيرة والكبيرة جداً (المجمعة مع $NH_3/H_2O/H_2$).
$CuCl_2$ $LiNO_3 (+NH_3)$	NH_3 NH_3	مجربة مع أنظمة الطاقة الشمسية باعتبارها مصدراً حرارياً
$LiBr (+H_2O)$	H_2O	وحدات محكمة الإغلاق لإنتاج الماء للتكييف لاستطاعات تبريد كبيرة.
H_2SO_4	H_2O	استخدمت مع بداية التطوير
$LiBr/ZnBr_2 (+CH_3OH)$	CH_3OH	$H_2O/LiBr$ من أجل أغراض التكييف هزجت بدلاً من خليط
$CH_3(OC_2H_5)_2OCH_3$ $C_6H_5(COOC_2H_5)_2$ $CH_3COOC_2H_5$	R21 R22	Tetraethyleneglydolfurfyl Dibutylphthalat Isobutylazetat Ethyltetrahydrofurfyl
$C_7H_7CHO(CH_2)_7$	R123a	تم اقتراحه في الولايات المتحدة
$C_3H_7(OH)_2$	CH_3NH_2	Methylamin/Glyzerin
C_6H_5-N	CF_3CH_2OH	تم اقتراحه في روسيا Trifluorethanol/Chinolin
		المضخات الحرارية في سويسرا

مائع التبريد	المادة الماصة	الرمز الكيميائي
ماء	بروميد الليثيوم	H ₂ O - LiBr
أمونيا	ماء	H ₂ O - NH ₃
أمونيا	ثيوسينات الصوديوم	NH ₃ - NaSCN
أمونيا	نترات الليثيوم	NH ₃ - LiNO ₃
أمونيا	كلوريد الكالسيوم	NH ₃ - CaCl ₂

يوضح الشكل (7-6) رسماً تخطيطياً للدورة الأساسية للتبريد بالامتصاص الدورة.



الشكل (7-6) الدورة الأساسية للتبريد بالامتصاص

تعمل دورة التبريد بالامتصاص المستخدمة لمحلول بروميد الليثيوم والماء تبعاً للدورة الأساسية الموضحة في الشكل (7-6) وعند تحقيق شروط الاستقرار فإن الإيزان الحراري للمبخر يستلزم الآتي:

$$m = Q_E / (h_{10} - h_9)$$

حيث: Q_E هي الحمل الحراري للمبخر و m معدل التدفق لمائع التبريد في المبخر.

أما h فهي الانتالبي وبالمثل فإن الإيزان الحراري للمكثف يستلزم:

$$Q_C = m (h_7 - h_8)$$

حيث: Q_c هي معدل الحرارة المطرودة من المكثف، وبأخذ الإتزان الحراري للمولد الحراري نحصل على المعادلة الآتية:

$$Q_G = M' (h_4 - h_3) + m' (h_7 - h_4)$$

حيث: Q_G هي معدل الحرارة المضافة للمولد الحراري و M' هي معدل تدفق المحلول خلال المضخة وبأخذ إتزان الكتلة لبروميد الليثيوم خلال المولد الحراري نحصل على العلاقة الآتية:

$$X_3 = (M' - m') X_4 + m' X_7$$

OR

$$M'/m' = (X_4 - X_7) / (X_4 - X_3)$$

حيث: X هي تركيز بروميد الليثيوم في المحلول، وبأخذ الاتزان الحراري للوعاء الماص نحصل على العلاقة الآتية:

$$Q_A = M' (h_6 - h_1) + m' (h_{10} - h_6)$$

حيث: Q_A هي معدل الحرارة المطلوب سحبها من الوعاء الماص، ويقدر العمل اللازم للمضخة كما يلي:

$$W_P = (m' / \rho_1) (P_2 - P_1)$$

حيث: P_2 هي الضغط العالي للدورة، أي ضغط المولد الحراري والمكثف و P_1 هي الضغط المنخفض للدورة أي ضغط المبخر والوعاء الماص و ρ_1 هي كثافة المحلول عند خط السحب للمضخة.

ويلاحظ عملياً أن قيمة العمل اللازم للمضخة يمكن إهمالها بالمقارنة بكمية الحرارة المطلوب إضافتها في المولد الحراري.

كما يلاحظ أيضاً أن قيمة X_7 تكون عادة مساوية للصفر، حيث إن بخار الماء المتولد في المولد الحراري لا يحمل معه أي مقدار من بروميد الليثيوم، ويفضل عملياً تبريد الوعاء الماص بالماء للحصول على أقل درجة حرارة ممكنة عند خط السحب للمضخة الأمر الذي يضمن عدم وجود بخار ماء في خط السحب، ويساعد أيضاً على تصميم المبخر لدرجة حرارة أقل منها في حالة ما إذا تم تبريد الوعاء الماص بالهواء،

وفي العادة يستخدم ماء تبريد الوعاء الماص في تبريد المكثف وإعطاء هذه الحرارة للمستهلك الحراري ثم يعود مرة أخرى إلى الوعاء الماص.

ومن أهم الاحتياطات التي ينصح بأخذها في الاعتبار عند تصميم دورات التبريد والمضخات الحرارية بالإمتصاص التي تستخدم محلول بروميد الليثيوم والماء الآتي:

- 1- التأكد من عدم إمكانية تبلور المحلول عند نقطة 6 في الدورة.
- 2- التأكد من تبريد الوعاء الماص بالدرجة الكافية لمنع وجود بخار الماء عند خط السحب للمضخة.

ويبين الشكل (6-8) العلاقة بين درجة حرارة المحلول عند الإلتزان الحراري (أي درجة الحرارة التي يبدأ عندها تبخر الماء من المحلول) مع تركيز بروميد الليثيوم في المحلول عند قيم مختلفة للضغط.

كما يبين الشكل (6-9) العلاقة بين الانتالبي للمحلول وتركيز بروميد الليثيوم في المحلول عند درجات حرارة مختلفة، ويمكن رياضياً تقدير قيمة انتالبي المحلول بدلالة تركيز بروميد الليثيوم في المحلول ودرجة حرارة المحلول من كثيرة الحدود الآتية:

$$h = \sum_{n=0}^4 A_n X^n + T \sum_{n=0}^4 B_n X^n + T^2 \sum_{n=0}^4 C_n X^n$$

حيث تعطى انتالبي المحلول بالكيلوجول لكل كيلوجرام عندما تكون درجة حرارة المحلول T بالدرجة المئوية وفي مدى من 15° C إلى 165° C، وتستخدم المعادلة السابقة عندما يكون تركيز بروميد في المحلول في مدى من 40 % إلى 70 % بالوزن.

وتعطى قيم المعاملات A, B, C كما يلي:

A0 = -2024.33	B0 = 18.2829	C0 = -3.7008214 E-2
A1 = 163.309	B1 = -1.1691757	C1 = 2.8877666 E-3
A2 = -4.88161	B2 = 3.248041 E-2	C2 = -8.1313015 E-5
A3 = 6.302948 E-2	B3 = 4.0341844 E-4	C3 = 9.9116628 E-7
A4 = -2.913705 E-4	B4 = 1.852069 E-6	C4 = -4.4441207 E-9

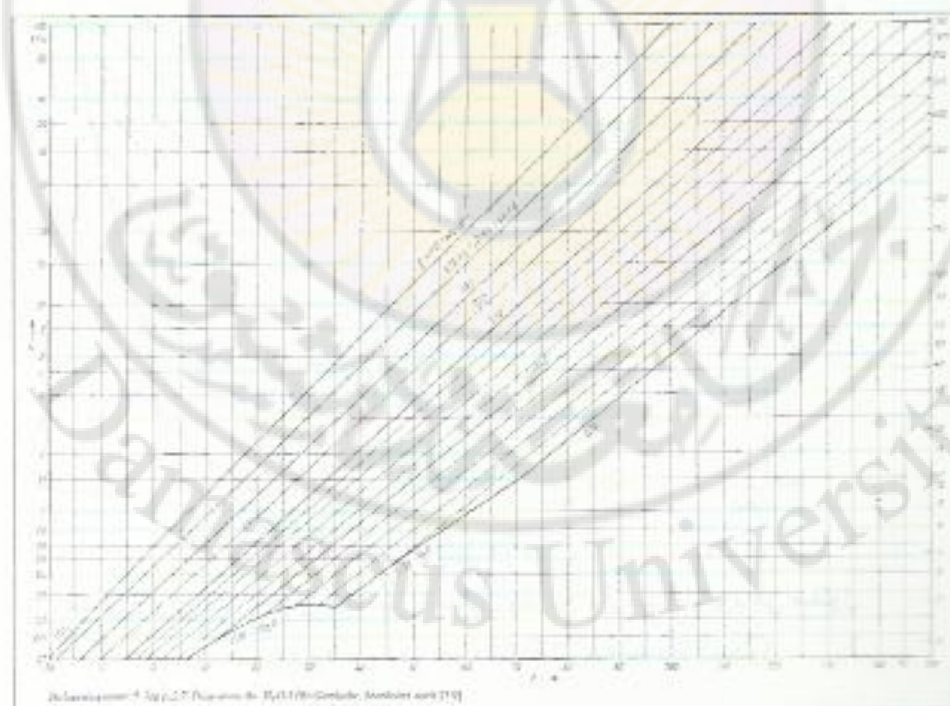
كما يمكن حساب درجة حرارة الماء المشبع T_s (درجة مئوية) داخل المكثف أو المبخر بدلالة الضغط (kpa) من المعادلة الآتية:

$$T_s = \frac{2E}{D + [D^2 - 4E(C - \log P)]^{1.5}} - 273$$

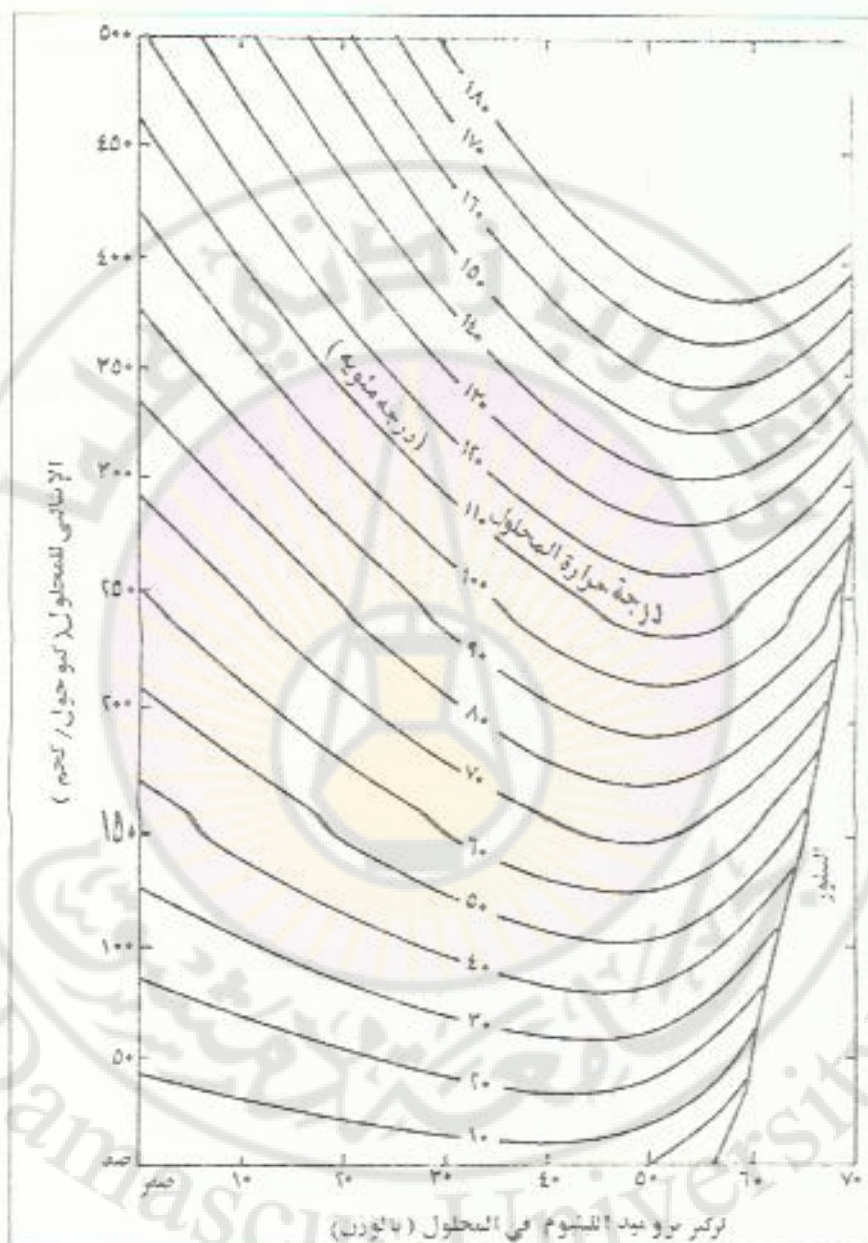
حيث C ثابت مقداره 7.05 و D ثابت مقداره -1596.49 و E ثابت مقداره 104095.5 وتستخدم المعادلة السابقة لدرجات حرارة في مدى من 15°C إلى 110°C كما يمكن أيضاً استنتاج الضغط P (كيلوباسكال) بدلالة درجة حرارة الماء المشبع T_s (درجة مئوية) من المعادلة الآتية:

$$\log p = C + D / (T_s + 273) + E / (T_s + 273)^2$$

حيث C , D , E ثوابت عرفت قيمتها سابقاً. الشكل (8-6) علاقة درجة حرارة محلول بروميد الليثيوم والماء مع الضغط لقيم مختلفة من التركيز



الشكل (8-6) علاقة درجة حرارة محلول بروميد الليثيوم والماء مع الضغط لقيم مختلفة من التركيز



الشكل (6-9) العلاقة بين الإنشائي للمحلول وتركيز بروميد الليثيوم في محلول بروميد الليثيوم والماء عند قيم مختلفة لدرجة حرارة المحلول

أمثلة محلولة:

المثال الأول:

استخدم الخرائط والمعادلات الخاصة بخواص محلول بروميد الليثيوم مع الماء لحساب الآتي:

- 1- قيمة الانتالبي لمحلول بتركيز قدره 50 % عند درجة حرارة للمحلول قدرها 90°C .
- 2- ضغط المكثف عندما تكون درجة حرارة المكثف 40°C .
- باستخدام المخطط (6-9) عند $X = 50\%$ و $T = 90^{\circ}\text{C}$ نجد أن:
 $H = 190 \text{ KJ / KG}$ أيضاً وباستخدام معادلة الانتالبي نجد أن $H = 192 \text{ KJ / KG}$ أي نفس النتيجة السابقة تقريباً.
- باستخدام المخطط (6-8) عند درجة حرارة تشبع للماء النقي 40°C نجد أن الضغط حوالي 7.5 kpa وباستخدام معادلة درجة حرارة التطيع للماء النقي عند $T_s = 40^{\circ}\text{C}$ يتبين أن الضغط 7.3 Kpa .

المثال الثاني:

تعمل مكنة تبريد بالامتصاص باستخدام محلول بروميد الليثيوم والماء عند ظروف التشغيل الآتية:

- حمل التبريد 1000 كيلووات .
- درجة حرارة المبخر 5°C .
- درجة حرارة المحلول عند الخروج من وعاء المص 38°C .
- درجة حرارة المحلول عند الخروج من المبادل الحراري 82.4°C .
- درجة حرارة المحلول عند الخروج من المولد الحراري 103.8°C .
- درجة حرارة المحلول المركز في بروميد الليثيوم عند الخروج من المبادل الحراري 55°C .
- درجة حرارة بخار الماء عند الدخول إلى المكثف 96.1°C .
- درجة حرارة الاتزان للوعاء الماص 42°C .

افرض ظروف التشبع عند الخروج من المكثف والمبخر وخروج المحلول المركز من المولد الحراري احسب الاتي:

- 1- معدل الحرارة المطلوب سحبها من كل من المكثف والوعاء الماص.
- 2- معامل الأداء لدورة التبريد.
- 3- معامل الأداء للدورة المثالية للتبريد بالامتصاص.
- 4- الارتفاع في درجة حرارة ماء التبريد في الوعاء الماص ثم في المكثف إذا كان معدل التدفق لماء التبريد في كل منهما حوالي $350 \text{ m}^3/\text{h}$.

الحل:

تبدأ بالمبخر، باستخدام جداول البخار يمكن معرفة قيمة ضغط المبخر عند درجة حرارة تبخير قدرها 5°C وبفرض أن مائع التبريد الخارج من المكثف يكون في حالة السائل المشبع، وأن يكون مائع التبريد الخارج من المبخر في حالة البخار المشبع، فإنه يمكن الحصول على ضغط المبخر وضغط المكثف والخواص للنقط 8 و 9 و 10 باستخدام جداول خواص بخار الماء المشبع كما هو موضح في الجدول (2-6) وبمعرفة ضغط المبخر وضغط المكثف يمكن معرفة قيمة الضغوط عند باقي نقط الدورة.

وبقدر معدل التدفق لمائع التبريد خلال المبخر كما يلي:

$$\dot{m} = Q_E / (h_{10} - h_9) = 1000 / (2510 - 188.4) = 0.431 \text{ kg/s}$$

حيث: Q_E هي معدل الحرارة المسحوبة بالمبخر (حمل التبريد)، ويتم تحديد الخواص عند النقطة 7 بمعرفة الضغط ودرجة الحرارة باستخدام جداول خواص بخار الماء المحمص التي تعطى $h_7 = 2681 \text{ kJ/kg}$.

ننتقل الآن إلى الوعاء الماص حيث تم تحديد الضغط، وبمعرفة أن درجة حرارة الاتزان للوعاء الماص هي 42°C ينتج من استخدام المخطط (2-8-6) أن $X_1 = 58.5\%$ أيضاً حيث إن المحلول يخرج من المولد الحراري عند درجة حرارة الاتزان T_4 التي تساوي 103.8°C فإنه باستخدام المخطط (2-8-6) يمكن تحديد تركيز بروميد الليثيوم

عند نقطة 4 نجد أن $X_4 = 65.5\%$ وعليه يمكن تحديد تركيز المحلول عند جميع نقاط دورة التبريد كما هو موضح بالجدول (2-6).

الجدول (2-6) الخواص عند الحالات المختلفة لدورة التبريد بالامتصاص لهذا المثال

الحالة	P [Kpa]	T [C°]	X [%]	[KJ/KG] h	ملاحظات
1	0.87	38	58.5	100.00	درجة الإتران للمحلول = 42° C
2	9.58	38	58.5	100.00	
3	9.58	82.4	58.5	190.00	
4	9.58	103.8	65.5	260.00	
5	9.58	55.0	65.5	170.00	
6	0.87	55.0	65.5	170.00	
7	9.58	96.1	0	2681.00	
8	9.58	45.0	0	188.40	
9	0.87	5.0	0	188.40	
10	0.87	5.0	0	2510.00	

حيث: x تركيز بروميد الليثيوم في المحلول.

وباستخدام المخطط (9-6) يمكن الآن إيجاد قيمة الانتالبي للنقط من 1 إلى 6، ويوضح الجدول (2-6) ملخصاً للخواص عند النقاط من 1 إلى 10 لدورة التبريد بالامتصاص.

بالنظر إلى إتران كتلة بروميد الليثيوم خلال المولد الحراري نجد أن:

$$M' X_3 = (M' - m') X_4 + m' X_7$$

$$M' / m' = (X_4 - X_7) / (X_4 - X_3) = (65.5 - 0) / (65.5 - 58.5) = 9.36$$

وعليه ينتج أن:

$$M' = 9.36 \times 0.431 = 4.034 \text{ kg / s}$$

وبأخذ الإتران الحراري للمكثف نجد أن:

$$Q_c = m' (h_7 - h_8)$$

$$= 0.431 (2681 - 188.4) = 1074 \text{ kw.}$$

وبأخذ الإتران الحراري للمولد الحراري نجد أن:

$$\begin{aligned} QG &= M' (h_4 - h_3) + m' (h_7 - h_4) \\ &= 4.034 (260 - 190) + 0.431 (2681 - 260) \\ &= 1326 \text{ kw.} \end{aligned}$$

وبأخذ الإتران الحراري للوعاء الماص نجد أن:

$$\begin{aligned} QA &= M' (h_6 - h_1) + m' (h_{10} - h_6) \\ &= 4.034 (170 - 100) + 0.431 (2510 - 170) \\ &= 1291 \text{ kw.} \end{aligned}$$

ويكون معامل الأداء للدورة كما يلي:

$$COP = QE / QG = 1000 / 1326 = 0.754$$

ويقدر معامل الأداء للدورة المثالية للتبريد بالامتصاص كما يلي:

$$(COP)_{ideal} = (T_E / T_G) ((T_G - T_O) / (T_O - T_E))$$

وبفرض أن درجة حرارة الجو المحيط T_O حوالي 30°C ينتج أن:

$$(COP)_{ideal} = [(5 + 273) / (103.8 + 273)] [(103.8 - 30) / (30 - 5)] = 2.18$$

ويقدر الارتفاع في درجة حرارة ماء التبريد خلال مروره في الوعاء الماص كما

يلي:

$$\begin{aligned} (\Delta t)_{cw, A} &= (QA / (m'_{cw} C)) \\ &= ((1291 \times 3600) / (350 \times 1000 \times 4.2)) = 3.16^\circ \text{C} \end{aligned}$$

حيث إن قيمة الحرارة النوعية لماء التبريد حوالي $4.2 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot ^\circ \text{C}$ وبالمثل يقدر

الارتفاع في درجة حرارة ماء التبريد للمكثف كما يلي:

$$\Delta t_{cw, C} = (1074 \times 3600) / (350 \times 1000 \times 4.2) = 2.63^\circ \text{C}$$

9-6- دورة التبريد بالامتصاص باستخدام محلول الأمونيا والماء:

مما يحد من استخدام محلول بروميد الليثيوم والماء في دارات التبريد الامتصاصية هو أن الماء يتجمد عند درجة حرارة صفر مئوية الذي يؤدي إلى عدم إمكانية خفض درجة حرارة المبخر إلى أقل من 2°C عادة، وكان لابد من بديل لمحلول بروميد الليثيوم والماء يسمح بالعمل عند درجات حرارة للمبخر أقل من صفر مئوي، وقد استعمل لهذا الغرض محلول الأمونيا والماء، وكما بينا سابقاً في عرض الخواص والشروط الواجب توافرها في المحلول المستخدم في دورة التبريد بالامتصاص فإن محلول الأمونيا والماء يحقق كل الشروط ماعدا شرط الأمان، حيث الأمونيا سامة لهذا السب يحظر استخدام دورات التبريد بالامتصاص المستخدمة لمحلول الأمونيا والماء في الأماكن المغلقة.

يوضح الشكل (6-10) رسماً تخطيطياً لدورة تبريد بالامتصاص باستخدام محلول الأمونيا والماء، ويلاحظ أن بخار الأمونيا المتولد نتيجة إضافة الحرارة في المولد الحراري يحمل معه نسبة من بخار الماء، بالإضافة إلى بعض قطرات محلول الأمونيا والماء في طور السائلة.

كما يوضع فوق المولد الحراري فاصل لفطرات الماء والأمونيا، وأما بخار الماء المحلول مع بخار الأمونيا فيتم تكثيفه في مكثف مرجع بتبريد البخار الناتج من المولد الحراري إلى درجة حرارة أعلى قليلاً من درجة حرارة غليان الأمونيا وأقل من درجة غليان الماء عن ضغط المكثف، وفي العادة يسمح المكثف المرجع بخروج بخار الماء والأمونيا كتحصيل مقدار حوالي 4°C ، ويفضل عادة استخدام مبادل حراري بين مائل الأمونيا العائد من المكثف وبين بخار الأمونيا الخارج من المبخر، وذلك لتحسين التأثير التبريدي للمبخر وبالتالي تحسين معامل الأداء للدورة.

ويستقر المترن الحراري للمبخر الآتي:

$$m = QE / (h_{10} - h_9)$$

حيث: QE هي حمل التبريد و m' هي معدل تدفق مائع التبريد (الأمونيا) خلال المبخر .

كذلك يستلزم الإيزان الحراري للمكثف الآتي:

$$QC = m' (h_7 - h_8)$$

وبأخذ الإيزان الحراري للمولد الحراري والمكثف المرجع معا نصل إلى الآتي:

$$QG - QD = M' (h_4 - h_3) + m' (h_7 - h_4)$$

وتقدر عملياً كمية الحرارة المسحوبة من المكثف المرجع QD بحوالي 15% من قيمة الحرارة المضافة إلى المولد الحراري QG و عليه يتضح أن:

$$QG = 1/0.85 [M' (h_4 - h_3) + m' (h_7 - h_4)]$$

وبأخذ الاتزان الحراري للوعاء العاص تقدر قيمة الحرارة المطلوب سحبها من الوعاء العاص QA كما يلي:

$$QA = M' (h_6 - h_1) + m' (h_{10A} - h_6)$$

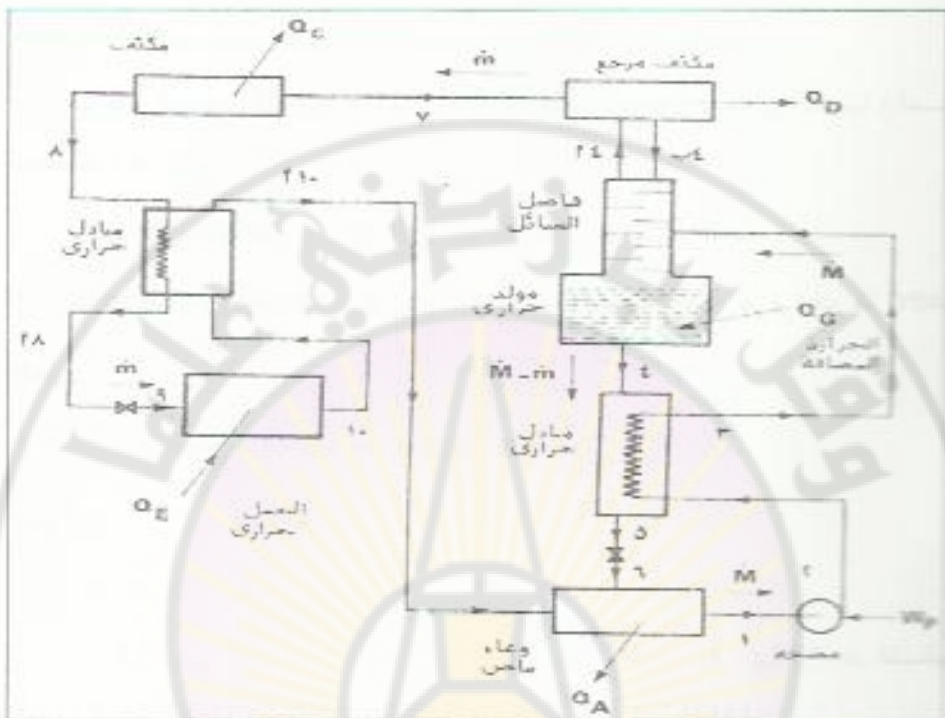
ويستلزم ايزان الكتلة للأمونيا خلال الوعاء العاص الآتي:

$$m' X_{10} + (M' - m') X_6 = M' X_1$$

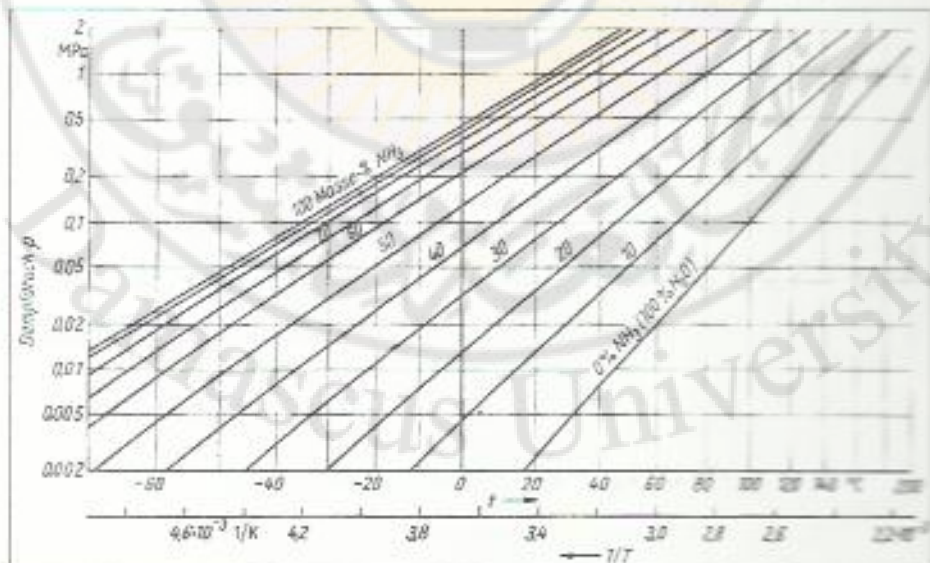
$$M' / m' = (X_7 - X_4) / (X_1 - X_4)$$

حيث X هي تركيز الأمونيا في محلول الأمونيا والماء و M' هي معدل ضخ محلول الأمونيا والماء بالمضخة.

ويوضح المخطط (11-6) خواص محلول الأمونيا والماء، والمثال الآتي يوضح كيفية استخدام المخطط (11-6).



شكل (10-6) رسم تخطيطي لدورة تبريد بالامتصاص باستخدام محلول الأمونيا والماء



المخطط (11-6) يوضح منحنيات ضغط البخار لخليط الأمونياك والماء

المثال الثالث:

استخدم المخطط الموجود بالشكل (12-6) لتحديد الخواص لمحلول الأمونيا والماء عند الظروف الآتية:

- 1- ضغط قدره 700 kpa وتركيز قدره 0.4 kg / kg عند حالة التشبع.
- 2- ضغط قدره 1300 kpa وتركيز قدره 0.46 kg / kg عند درجة حرارة قدرها 40°C .

الحل:

1- باستخدام المخطط (12-6) عند $P = 700 \text{ kpa}$ و $x = 0.4 \text{ kg / kg}$

نجد أن:

- درجة حرارة المحلول عند التشبع 68°C .

- تركيز بخار الأمونيا في بخار محلول الأمونيا والماء $= 0.975 \text{ kg / kg}$, انتالبي

البخار (أمونيا وماء) الموجود عند هذه الحالة $= 1440 \text{ kJ / kg}$.

- انتالبي محلول الأمونيا والماء (طور السائلة) $= 60 \text{ kJ / kg}$.

2- باستخدام المخطط (12-9-6) عند $p = 1300 \text{ kpa}$ و $x = 0.46 \text{ kg / kg}$ و $T = 40^\circ\text{C}$ نجد

أن:

درجة حرارة التشبع عند هذه الحالة $= 80^\circ\text{C}$.

وعليه فإن المحلول يقع في حالة التبريد التحتي، ولا يمكن أن يوجد أي بخار للأمونيا أو الماء عند هذه الحالة.

ويعطى المخطط (12-6) أيضاً:

انتالبي محلول الأمونيا والماء $= -70 \text{ kJ / kg}$.

المثال الرابع:

دورة تبريد بالامتصاص باستخدام محلول الأمونيا والماء تعمل عند الظروف الآتية:

- حمل تبريد قدره 1000 kw.
 - درجة حرارة المبخر 5°C .
 - درجة حرارة المكثف 38°C .
 - بخار الأمونيا يخرج من المكثف المرجع عند درجة للتشبع ويحوي 0.5% بالوزن بخار ماء.
 - مقدار التبريد التحتي لمائع التبريد (سائل الأمونيا) في المبادل الحراري حوالي 5°C .
 - محلول الأمونيا والماء يخرج من الوعاء الماص عند درجة حرارة قدرها 40°C وفي حالة التشبع.
 - درجة حرارة الأمونيا والماء المشبع الخارج من المولد الحراري قدرها 100°C .
 - المحلول المركز للأمونيا والماء يدخل إلى المولد الحراري عند حالة التشبع.
- احسب:
- معدل الحرارة المضافة أو المسحوبة من كل جزء من مكونات الدورة.
 - معامل الأداء للدورة.
 - تحقق من الاتزان الحراري الكلي للدورة.

الحل:

يستخدم المخطط (6-11)، (6-12) لتعيين خواص محلول الأمونيا والماء عند النقاط المختلفة للشكل (6-10) و عليه يمكن تحديد ضغط كل من المكثف والمبخر بمعرفة درجة حرارة المكثف والمبخر، كما يمكن أيضا تحديد قيم الإنثالبي للنقاط 8 و 9 و 10 و نت بفرض خروج بخار محلول الأمونيا والماء من المبخر عند حالة التشبع وبالنظر إلى الاتزان الحراري للمبخر يتبين الآتي:

$$m = Q_E (h_{10} - h_9) = 1000 (1270 - 180) = 0.917 \text{ kg / s.}$$

الجدول (6-3) الخواص عند الحالات المختلفة لدورة التبريد بالامتصاص باستخدام محلول الأمونيا والماء للمثال الرابع

الحالة	P [Kpa]	T [C°]	X [%]	h [kJ / kg]
1	500	40	49	-80
2	1600		49	-80
3	1600		49	140
4	1600	100	40	210
5	1600		40	-49
6	500		40	
7	1600		99.5	1320
8	1600	38	99.5	200
8A	1600	33	99.5	180
9	500	5	99.5	180
10	500	5	99.5	1270
10A	500		99.5	1290

ومن الإيزان الحراري للمبادل الحراري يتبين أن:

$$H_{10A} = h_{10} + (h_8 - h_{8A}) = 1270 + (200 - 180) = 1290 \text{ kJ / kg}$$

ويتم تحديد الإنتالبي للنقطة 7 من الشكل (10-6) بدلالة الضغط وتركيز محلول الأمونيا والماء في المكثف.

ويستلزم الاتزان الحراري للمكثف الآتي:

$$Q_C = m_r (h_7 - h_8) = 0.917 (1320 - 200) = 1027 \text{ kJ / kg}$$

وباستخدام المخطط (12-6) يمكن تحديد x للنقطة 1 بدلالة الضغط ودرجة الحرارة عند النقطة 1، ويمكن أيضاً تحديد الإنتالبي للمحلول عند النقطة 1.

كذلك يمكن تحديد تركيز محلول الأمونيا والماء الخارج من المولد الحراري عند نقطة 4 بدلالة درجة حرارة التشبع للمحلول وضغطه (الجدول 3-6)، ويستلزم اتزان كتلة الأمونيا خلال المولد الحراري والمكثف المرجع الآتي:

$$M' X_3 = m' X_7 + (M' - m') X_4$$

$$M' / m' = (X_7 - X_4) / (X_3 - X_4) = (99.5 - 40) / (49 - 40) = 6.61$$

وعليه نجد أن:

$$M' = 6.61 \times 0.917 = 6.061 \text{ kg / s}$$

وبتحديد التركيز للمحلول والضغط العالي والمنخفض للدورة يمكن تحديد قيمة الإنتالبي عند النقط 1 و 2 و 3 و 4 باستخدام الشكل (12-6) والنتائج معطاة في الجدول (10-6)، ومن الاتزان الحراري للمنظومة التي تحوي المولد الحراري والمكثف المرجع يتبين الآتي:

$$\begin{aligned} Q_G - Q_D &= (M' - m') (h_4 - h_3) + m' (h_7 - h_3) \\ &= (6.061 - 0.917) (210 - 140) + 0.917 (1320 - 140) \\ &= 1442 \text{ kw} \end{aligned}$$

وبفرض أن قيمة Q_D تقدر بحوالي 15 % من قيمة Q_G ينتج أن:

$$QG = 1442 / 0.85 = 1696 \text{ kw}$$

وتقدر قيمة الحرارة المطرودة من المكثف المرجع QD كما يلي:

$$QD = 0.15 QG = 0.15 \times 1696 = 254 \text{ kw}$$

ومن الإتزان الحراري للمبادل الحراري الناقل لمحلول الأمونيا والماء نستنتج

العلاقة الآتية:

$$\begin{aligned} (M' - m') (h_4 - h_5) &= M' (h_3 - h_2) \\ H_5 - h_4 - (M' / (M' - m')) (h_3 - h_2) \\ &= 210 - (6.061 / (6.061 - 0.917)) (140 + 80) = -49 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$

وبأخذ الإتزان الحراري للوعاء الماص نصل إلى مقدار الحرارة اللازم طردها من

الوعاء الماص، وهي:

$$\begin{aligned} QA &= M' (h_5 - h_1) + m' (h_{10A} - h_5) \\ &= 6.061 (-49 + 80) + 0.917 (1290 + 49) \\ &= 1416 \text{ kw} \end{aligned}$$

ويقدر معامل الأداء للدورة كما يلي:

$$COP = QE / QG = 1000 / 1696 = 0.59$$

نلاحظ الآن أن قيمة معامل الأداء عند استخدام محلول الأمونيا والماء أقل منه عند

استخدام محلول بروميد الليثيوم والماء عند نفس شروط التشغيل، وبأخذ الاتزان

الحراري الكلي للدورة ينتج أن الحرارة المضافة للدورة تقدر كما يلي:

$$QG + QE = 1696 + 1000 = 2696 \text{ kw}$$

وتقدر الحرارة المطرودة من الدورة كما يلي:

$$QC + QA + QD = 1027 + 1416 + 254 = 2697 \text{ kw}$$

وعليه يتحقق الاتزان الحراري الكلي للدورة.



الفصل السابع

تطبيقات المضخة الحرارية

مقدمة:

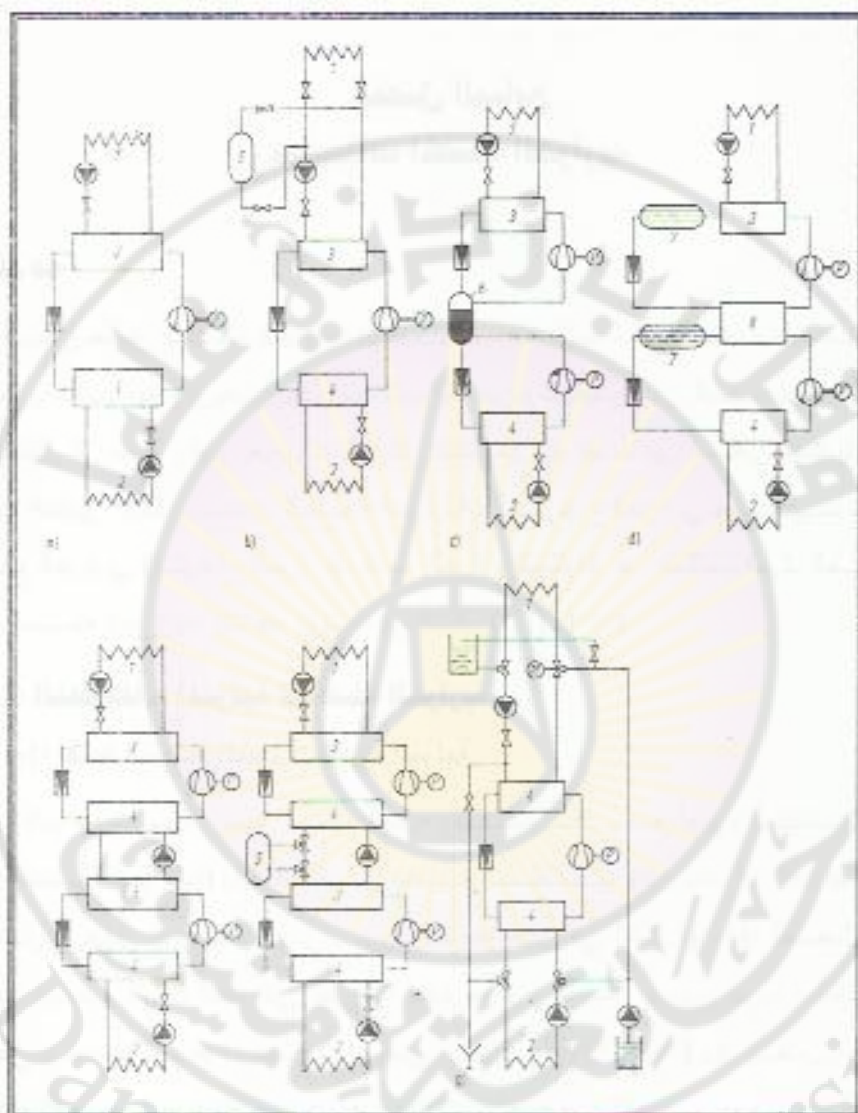
يمكن تطبيق المضخة الحرارية في مجالات تدفئة الأبنية بجميع استخداماتها المنزلية، التجارية، السياحية والرياضية وفي مجالات التسخين والتجفيف في الصناعات الغذائية والأماكن الرياضية والزراعية. وعلاوة على ذلك يمكن الربط ما بين التسخين والتبريد معاً وهذا التطبيق الأمثل لاستخدام المضخة الحرارية والاسترجاع الحراري حيث يتم تبريد المنبع الحراري (استرجاع الحرارة) وتؤخذ الحرارة المطلوبة عبر المكثف المولد الحراري في المضخة الحرارية، كما هو موضح في الشكل (1-7)، (2-7).

1-7- التطبيقات المنزلية للمضخة الحرارية:

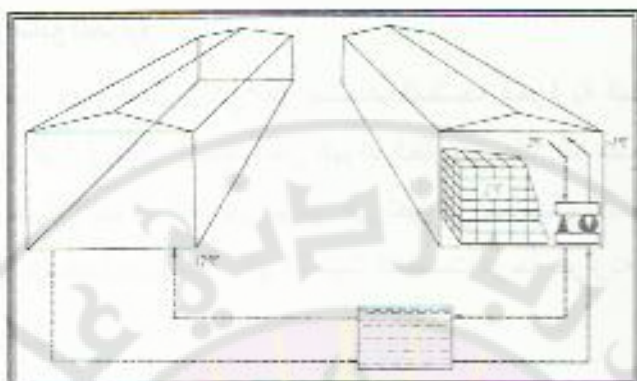
1-1-7- أهمية استخدام المضخة الحرارية المنزلية:

كما هو معروف ومطبق بالحياة العملية ومستخدَم بشكل واسع أجهزة المكيفات المنزلية (آلة المضخة الحرارية) ذات القطعتين بجميع استطاعتها (0.5 ton red → 8 ton red) باعتبارها جهاز تدفئة شتاءً وتبريد صيفاً كما هو مبين في الشكل (2-4)، الفصل (2)، حيث يستخدم الهواء الخارجي على أنه منبع حراري وبشكل مجاني تقريباً ويمكن أن تحقق درجة حرارة هواء تصل شتاءً حتى 32°C ($32^{\circ}\text{C} - 40$) وقد يحصل معامل الأداء للمضخة الحرارية حتى 2.5 في الآلات الانضغاطية كما هو موضح بالشكل (3-7) الأداء باعتباره تابعاً لدرجة حرارة المنبع الحراري (الهواء الخارجي).

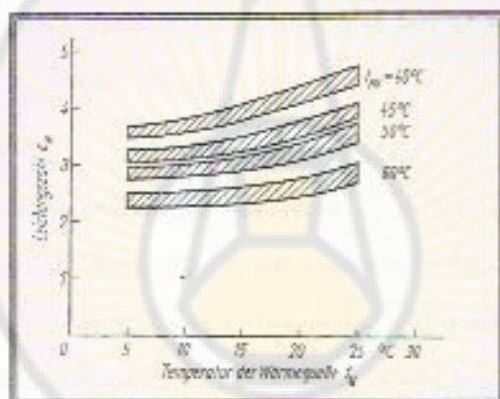
أما في الآلات الامتصاصية يمكن تحقيق التدفئة المنزلية بالماء الساخن واستخدام مضخة حرارية هواء - ماء نظام $90/70^{\circ}\text{C}$ ومعامل حرارة للألة الامتصاصية $\eta_{III} = 0.9$ كما هو موضح في الشكل (4-7) معامل الحرارة على أنه تابع لدرجة حرارة المنبع الحراري.



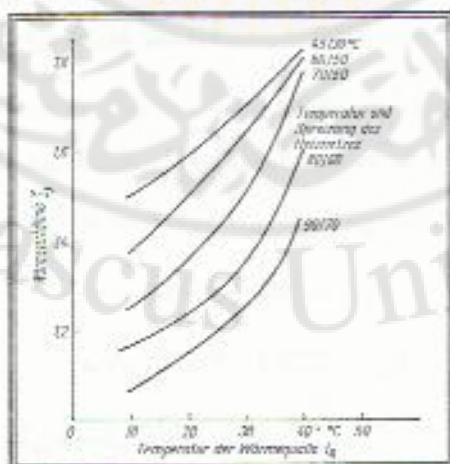
الشكل (1-7) إمكانيات عديدة لاستخدام المضخة الحرارية لتبريد وتسخين بأن واحد
 a- تبريد وتسخين بأن واحد b- تبريد وتسخين مع خزان حراري c- مضخة حرارية ثنائية
 المراحل للتبريد والتسخين d- كاسكاد مع مبخر ومكثف بأن واحد e- كاسكاد مع دائرة مياه
 f- كاسكاد مع دائرة مياه وخزان حراري g- تبريد - تسخين بالتناوب
 1- المستهلك الحراري (شبكة تدفئة) 2- الحيز المبرد 3- مكثف 4- مبخر 5- خزان حراري
 6- وعاء بيني 7- مجمع السائل 8- مبخر - مكثف



الشكل (2-7) الربط مابين وحدة تبريد للخرن المواد الغذائية (آلة تبريد) وتدفئة صالة بيع



الشكل (3-7) معامل الاداء للمضخات الحرارية الانضغاطية باعتباره تابعاً لدرجة حرارة المنبع الحراري



الشكل (4-7) معامل الحرارة للدارات الانصصائية باعتباره تابعاً لدرجة حرارة المنبع الحراري

7-1-2- مصادر منابع الحرارة:

كما مر معنا في الفصل الثاني عند استخدام المضخة الحرارية المنزلية (هواء - ماء - هواء - هواء) يمكن الاستفادة من الهواء الخارجي على أنه منبع حراري، ولكن تنذب درجة حرارة الهواء الخارجي يؤدي إلى تغير في معامل الأداء، ولكن بكل الأحوال يمكن الاستفادة من حرارة الهواء مهما انخفضت درجة حرارته شتاءً.

مياه - بئر - نهر:

تتغير درجة حرارة مياه البئر والأنهار باستمرار التي تتراوح ما بين 12°C - 8 وهي مصدر حراري جيد لاستخدام المضخة الحرارية المنزلية ماء - هواء أو ماء - ماء راجع الأشكال (في الفصل الثاني).

7-1-3- تخزين الحرارة:

يتم ربط مكثف المضخة الحرارية المنزلية بخزان حراري (مجمع حراري) مع شبكة التدفئة اللازمة للشقة السكنية المراد تدفئتها وأسطوانة الماء الساخن الصحي. اللازم للأشخاص. يزود الخزان الحراري (مجمع الحرارة) بوسيط حراري مساعد من أجل الأيام الباردة جداً أو الساعات التي لا يمكن للمضخة الحرارية تأمين درجة الحرارة اللازمة للتدفئة راجع الأشكال (من 1-7 وحتى 6-7).

7-1-4- حساب كمية الحرارة اللازمة للتدفئة:

كمية الحرارة المقدمة من المضخة الحرارية المنزلية هي استطاعة المكثف أو كمية الحرارة التي يطرحها المكثف Q_H والمتعلقة بدرجة حرارة التكاليف t_c وحرارة التبخير t_0 التابعة لدرجة حرارة المنبع الحراري t_{source} في حال المنبع الحراري ماء.

$$t_{s,w} = 281 - 303 \text{ K} \text{ ماء}$$

$$t_{s,l} = 277.3 - 293 \text{ K} \text{ هواء}$$

وبالتالي t_c, t_0 تؤثر على معامل الأداء.

الجدول (1-7) يعطي المجال الحراري لعمليات الانتقال الحراري لدارة المضخة الحرارية المنزلية

وسيط التسخين		القيمة المؤثرة	أجزاء الدارة
هواء	ماء		
277-293K	281-303K	درجة حرارة المنبع t_s	1- المنبع الحراري
-	5-10	فرق درجات الحرارة للوعاءين Δt_{m0}	2- المبادل الحراري
10-15K	6-10K	Δt_{m0}	3- المبني
0.9-1K	0.9-1.1K	معامل الجودة f_k	4- المضغط
9-15K	8-15K	Δt_{mk}	5- المكثف
-	0.2-1K	Δt_s	6- الخزان الحراري
5-22K	7-37K	درجة الحرارة الوسطية للمشح t_m	7- جهاز تنفئة

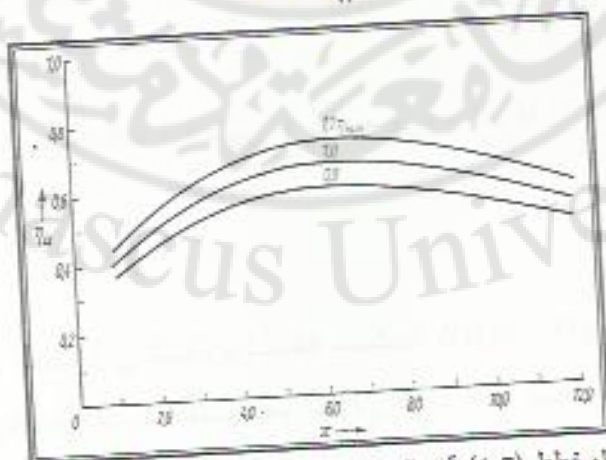
$$f_k = \frac{\eta_{is}}{\eta_{is,m} \pi^2}$$

$$\eta_{is,m} = 0.004 \pi^3 + 0.01458 \pi^2 + 0.13717 \pi + 0.2794$$

وتؤخذ قيمة η_{is} من المخطط (1-7).

كما يمكن حساب معامل أداء المضخة الحرارية باعتباره وحدة تنفئة بالعلاقة التالية:

$$\varepsilon_{HP,H} = \frac{Q_c}{W}$$



المخطط (1-7) قيم المعامل η_{is} كتابع لنسبة الانضغاط π

$$Q_H = \dot{m}_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta t_w$$

كما يجب ربط خزان حراري مع مكثف المضخة الحرارية كما هو مبين في الشكل (5-7) بحسب حجم خزان إلى اللازم كما يلي:

$$Q_H = \dot{V}_w \cdot \rho_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta t_w$$

$$Q_H = V_{sp} \cdot \rho_w \cdot i \cdot C_{pw} \cdot \Delta t_w$$

$$V_{sp} = \frac{Q_H}{\rho_w \cdot i \cdot C_{pw} \cdot \Delta t_w}$$

حيث إن:

Q_H كمية الحرارة اللازمة للتدفئة

$\dot{m}_w$ تدفق الماء الكتلي kg/s

$\dot{V}_w$ تدفق الماء الحجمي m^3/s

C_{pw} السعة الحرارية للماء J/kg.K

ρ_w كثافة الماء kg/m^3

i معامل الحمولة

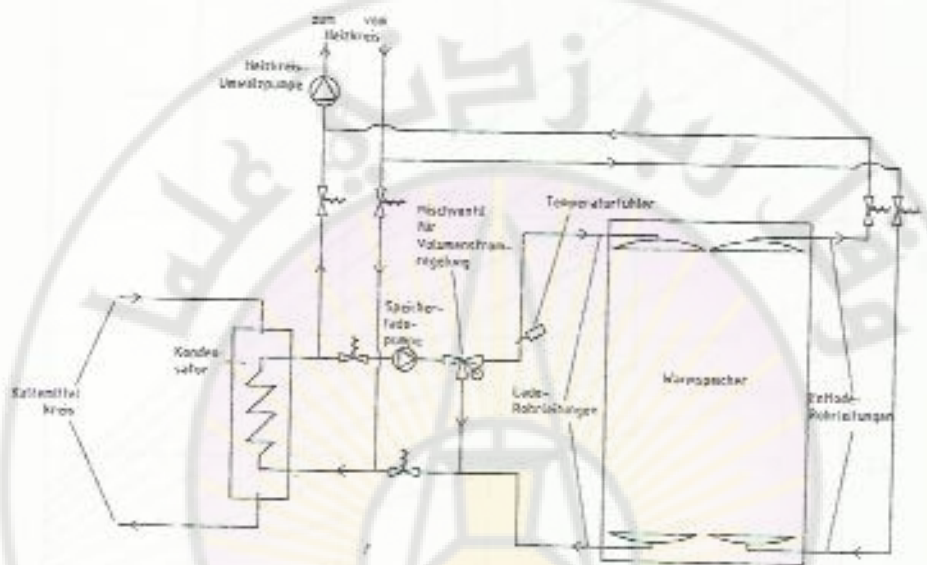
$\Delta t_w = t_c - t_r$ فرق درجة الحرارة مابين t_c درجة حرارة الغرفة و t_r درجة حرارة وسيط التدفئة.

مثال:

ليكن الحمل الحراري اللازم لشقة سكنية $Q_N = 30 \text{ KW}$ و $\Delta t_w = t_c - t_r = 20 \text{ K}$ و $c_w = 4186 \text{ J/kg K}$ و $i = 2 \text{ l/h}$ يحدد حجم الخزان الحراري اللازم ربطه مع المضخة الحرارية.

$$V_{sp} = \frac{30 \text{ KW}}{2 \times 1 \times 4186 \times 20} \times 3600$$

$$V_{sp} = 645 \text{ dm}^3$$



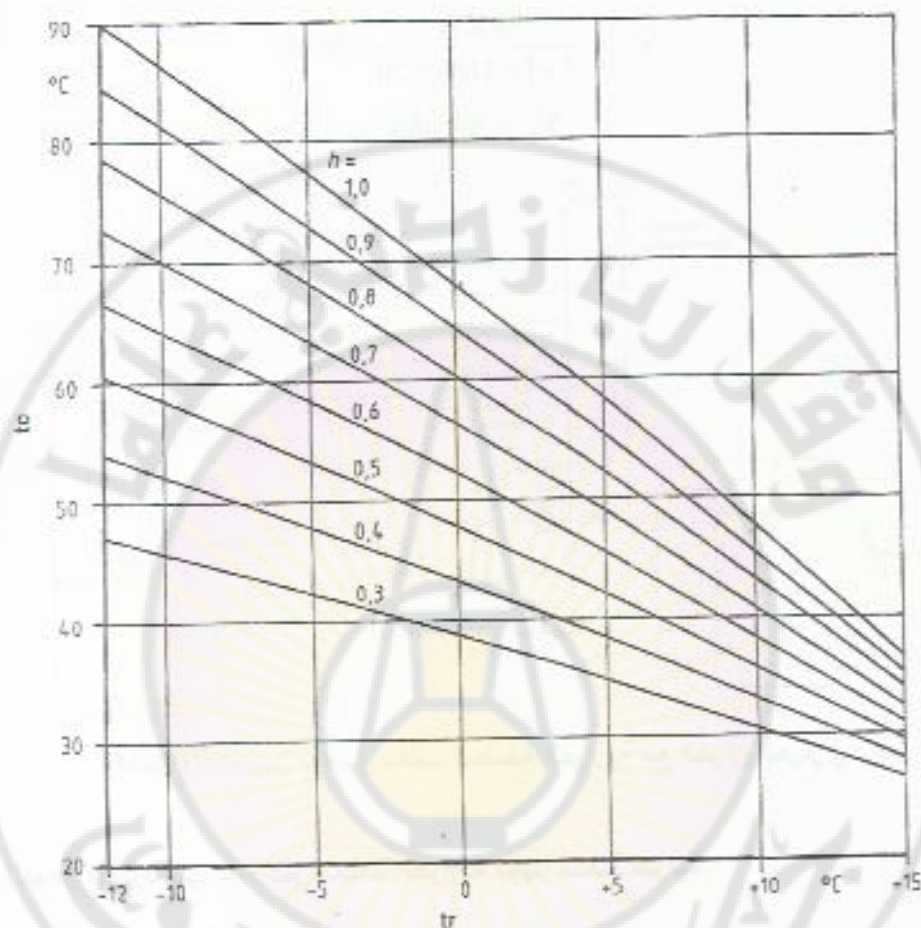
الشكل (5-7) يبين توصيل مكثف المضخة الحرارية مع الخزان الحراري

العوامل المؤثرة على إدارة عمل المضخة الحرارية كجهاز تدفئة منزلية:

- درجة الحرارة الخارجية t_a :

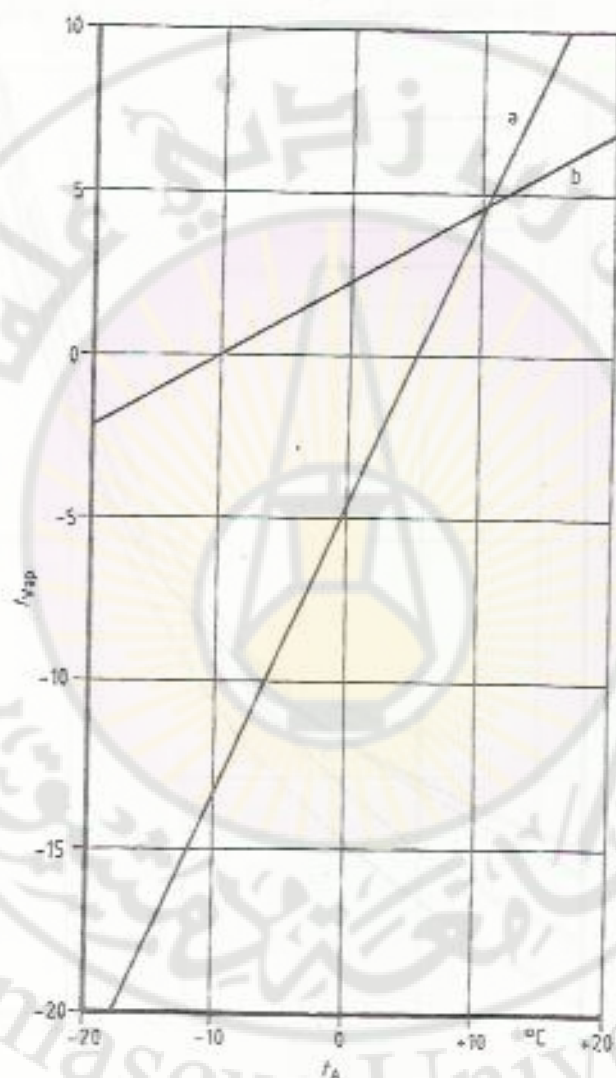
1- درجة حرارة وسيط التدخين (هواء - ماء) t_v تتغير باعتباره تابعاً لدرجة الحرارة الخارجية والشكل (6-7) يوضح هذا التابع عند معاملات سطح تدفئة متعددة. حيث يعرف معامل سطح التدفئة بأنه النسبة ما بين سطح التدفئة المطلوب النظري Λ_1 و سطح التدفئة الحقيقي Λ_2 .

$$h = \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2}$$



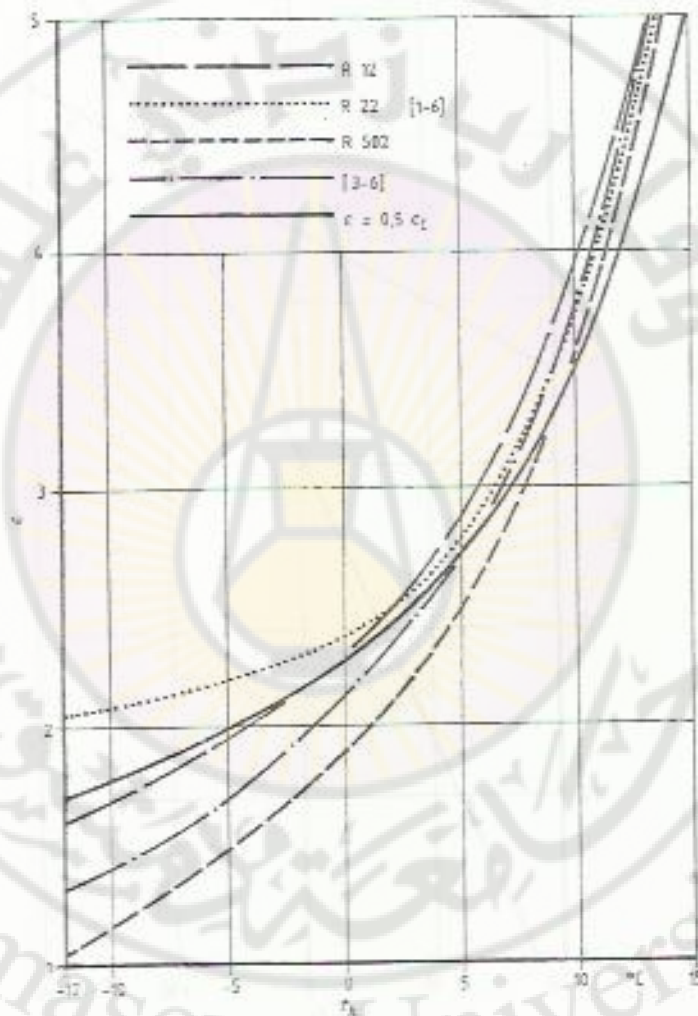
الشكل (6-7) تغير درجة حرارة وسيط التسخين كتابع
لدرجة الحرارة الخارجية عند معاملات سطح تدفئة متعددة

2- درجة حرارة تبخر وسيط التبريد t_{vap} تتغير كالتابع لـ t_A كما هو مبين في الشكل (7-7).



الشكل (7-7) تغير درجة حرارة التبخر كتابع لدرجة الحرارة الخارجية
 a- مضخة حرارية هواء - ماء b- مضخة حرارية ماء - ماء

3- معامل الأداء ϵ_{HP} كنابع لـ t_a ووسيط التبريد المستخدم في الدارة والشكل (8-7) يبين تغير ϵ_{HP} لعدة وسائط تبريد عند تغير درجة الحرارة الخارجية لمضخة حرارية هواء - ماء وعند معامل سطوح التدفئة 1.1.



الشكل (8-7) تغير معامل الأداء كنابع لدرجة الحرارة الخارجية

كما أن معامل الأداء للمضخة الحرارية ϵ_{HP} ومعامل التدفئة يتعلّقان بمصدر الطاقة لمحرك المضخة الحرارية.

- مضخة حرارية تعمل بوساطة محرك احتراق داخلي:

بحسب معامل الأداء وفقاً للعلاقات التالية:

$$\varepsilon_{HP} = 0.74 \frac{T_o}{T_k - T_o} \left(0.0032 t_o + 0.765 \frac{T_o}{T_k} \right) + 0.9$$

مضخة حرارية تعمل بوساطة محرك كهربائي:

$$\varepsilon_{HP} = 0.5 \frac{T_k}{T_k - T_o}$$

وبحسب منسوباً لدارة التبريد بالعلاقة التبريدية التالية:

$$\varepsilon_{HP} = \frac{0.5}{0.97} \frac{T_k}{T_k - T_o}$$

ويعطى معامل الجودة للمضخة الحرارية كما يلي:

$$\eta_G = \frac{\varepsilon_{HP}}{\varepsilon_c}$$

حيث: ε_c أن هو معامل الأداء لدورة كارنو النظرية.

$$\varepsilon_c = \frac{T_k}{T_k - T_o}$$

تتراوح قيمة $\eta_G = 0.425 - 0.515$

كما تحدد درجة تبخر وسيط التبريد حسب المضخة الحرارية ودرجة الحرارة الخارجية.

أجريت دراسة حسابية تجريبية لمضخة حرارية ماء ومضخة حرارية ماء - ماء تعمل إما كهربائي أو محرك احتراق داخلي لتدفئه شقه سكنية الحمل الحراري النظري $Q=25$ KW واستهلاك الطاقة السنوي الصافي 41250 KWh/y عند درجات حرارة خارجية تصميمية متغيرة ومعامل سطح تدفئة متغير. تمت هذه التجارب في مدينة Düsseldorf الألمانية عام 1982، اخترت من هذه الدراسة بعض النماذج التالية:

مضخة حرارية هواء - ماء:

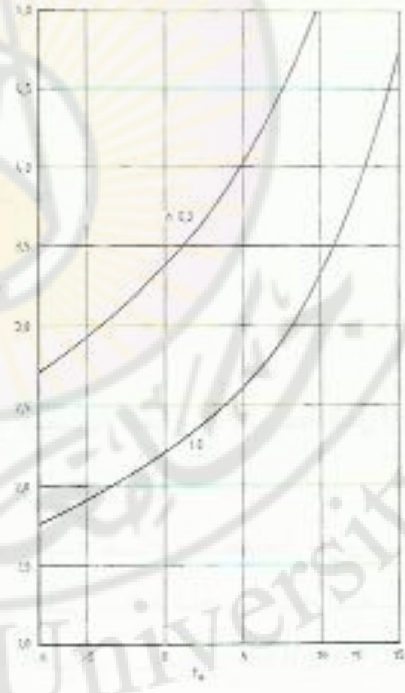
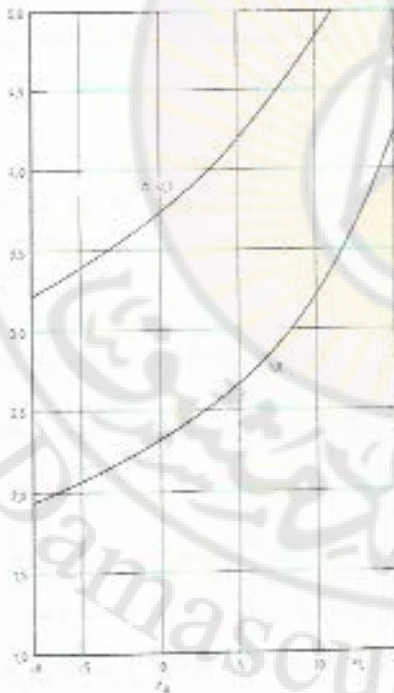
$$t_{vap} = t_a - t_A - \Delta t_{vap}$$

مضخة حرارية ماء - ماء:

$$t_{vap} = t_a = 1 + (t_A + 18)0.25 - \Delta t_{vap}$$

حيث إن: Δt_{vap} درجة الحرارة على طرفي المبخر الهوائي Δt_{vap} درجة الحرارة على طرفي المبخر المائي.

يوضح الشكل (9-7) تغير مسامل الأداء - معامل التدفئة تحتاج لدرجة حرارة الجارية لمضخة حرارية هواء - ماء تعمل بمحرك كهربائي والشكل (10-7) لمضخة حرارية ماء - ماء.



الشكل (9-7) تغير معامل الأداء كتابع لدرجة

الحرارة الخارجية لمضخة حرارية

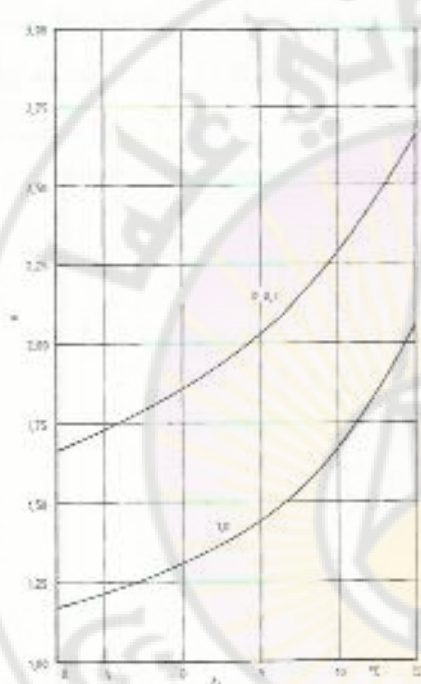
ماء - ماء تعمل بمحرك كهربائي

الشكل (10-7) تغير معامل الأداء كتابع لدرجة

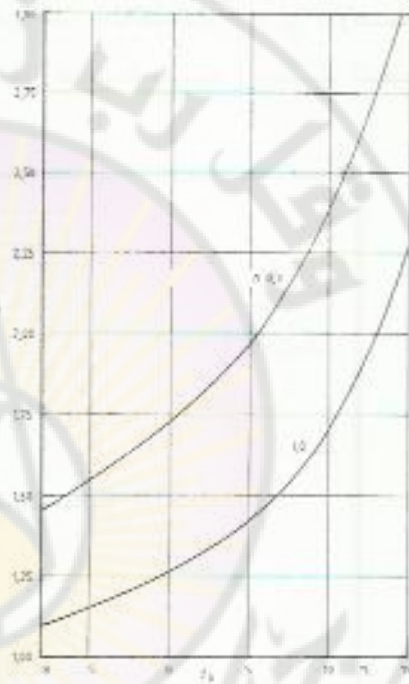
الحرارة الخارجية لمضخة حرارية

هواء - ماء تعمل بمحرك كهربائي

كما يوضح الشكل (11-7) تغير معامل الأداء - معامل التدفئة على أنه تابع لدرجة الحرارة الخارجية لمضخة حرارية هواء - ماء تعمل بمحرك احتراق داخلي والشكل (12-7) لمضخة حرارية ماء - ماء.



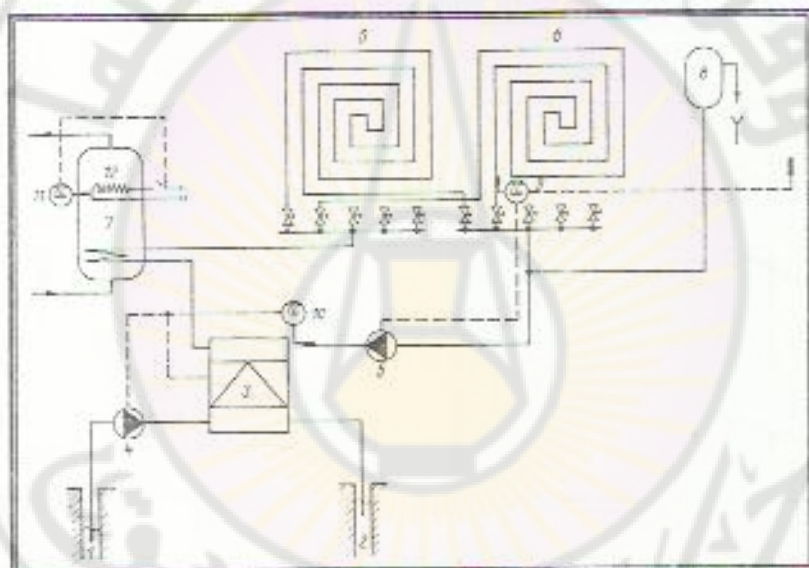
الشكل (12-7) تغير معامل التدفئة كنابع لدرجة الحرارة الخارجية لمضخة حرارية ماء - ماء تعمل بمحرك احتراق داخلي



الشكل (11-7) تغير معامل التدفئة كنابع لدرجة الحرارة الخارجية لمضخة حرارية هواء - ماء تعمل بمحرك احتراق داخلي

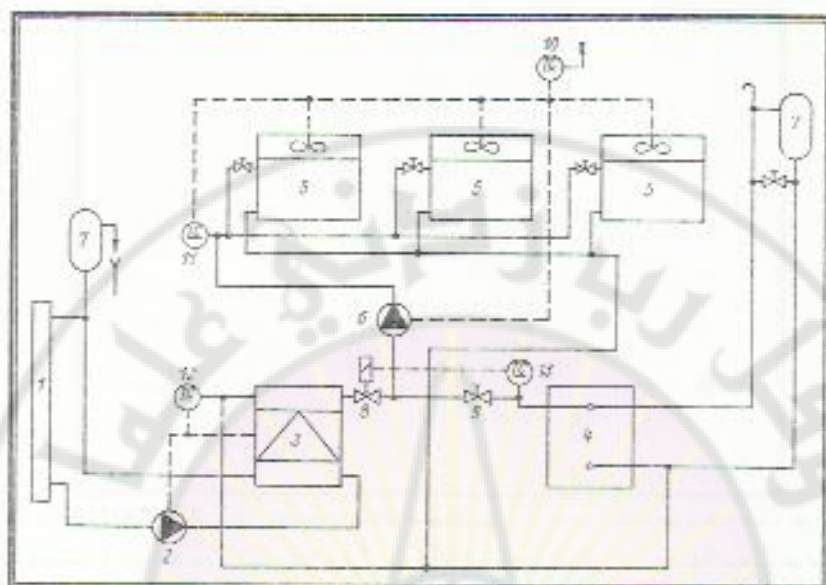
5-1-7- التطبيقات المنزلية:

تدفئة شقق سكنية بواسطة مضخة حرارية ماء - ماء الشكل (13-7) المنيع الحراري مياه ينز يتم ضخ الماء الساخن اللازم للتدفئة من المكثف المصدر الحراري. تزود هذه المحطة بأسطوانة تحضير الماء الساخن اللازم للاستخدام المنزلي بالإضافة إلى حساسات حرارية للتحكم بدرجة الحرارة وتدفق المياه، حيث إن نظام التدفئة المستخدم تدفئة أرضية.



الشكل (13-7) تدفئة شقق سكنية بواسطة بالمضخة حرارية ماء - ماء مع تدفئة أرضية وأسطوانة تحضير الماء الساخن 1- سحب مياه البئر اللازمة 2- إرجاع الماء بعد المبخار 3- مضخة حرارية ماء - ماء 4- مضخة سحب مياه المنيع الحراري 5- مضخة تدوير مياه التدفئة 6- شبكة تدفئة أرضية 7- أسطوانة تحضير الماء الساخن 8- خزان تمدد مفتوح 9 و 10 و 11 منظمات درجة الحرارة 12- وشيعة تسخين كهربائية مساعدة

إن الشكل (14-7) يبين إمكانية الاستفادة من للطاقت الضائعة أو الطاقة الشمسية من خلال التقاط هذه الطاقة عبر مجمع الطاقة (مثلاً لاقط شمسي) أو مبادل حراري في حال الاستفادة من حرارة مياه الصرف الصحي بهذا النظام تستخدم التدفئة للهواء الساخن.

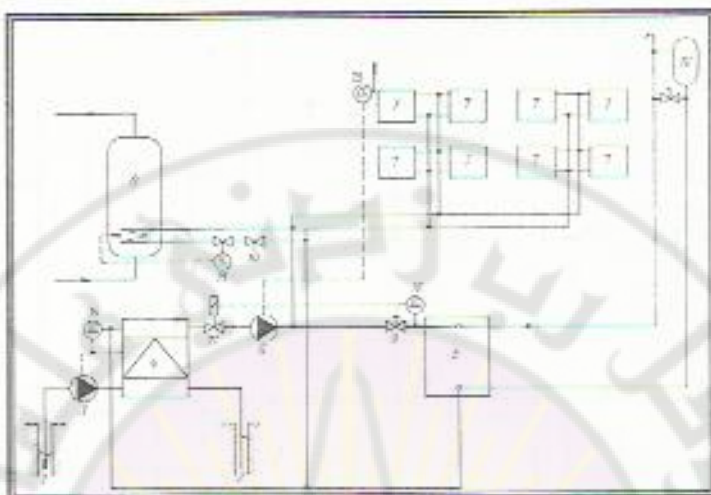


الشكل (7-14) نظام تدفئة شقق سكنية بوساطة مضخة حرارية ماء - ماء مع مجمع طاقة ومرجل تدفئة مساعد 1 - منبع حراري (لاقط شمسي) 2 - مضخة ماء المنبع الحراري 3 - مضخة حرارية ماء - ماء 4 - مرجل تدفئة تقليدي 5 - أجهزة تدفئة بالهواء الساخن (فلن كويل) 6 - مضخة تدوير مياه التدفئة 7 - خزان تمدد مفتوح 8 - صمام كهربائيسي 9 - صمام قطع يدوي 10 - 11 - 12 - 13 - منظمات درجة الحرارة

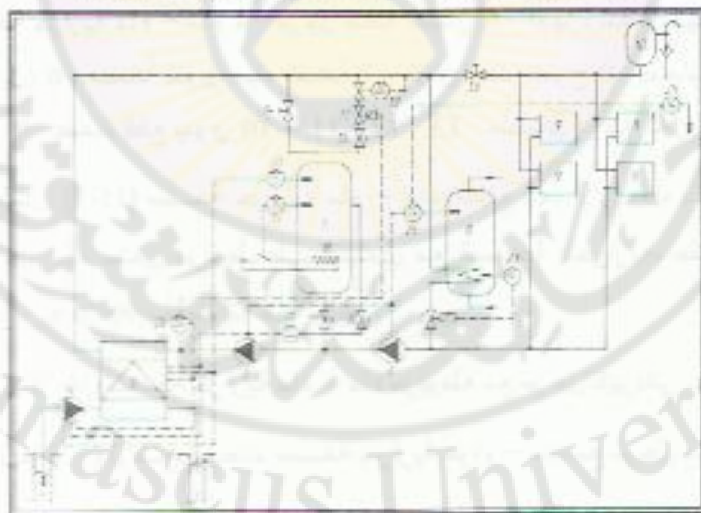
أما الشكل (7-15) مضخة حرارية ماء - ماء المنبع الحراري مياه بئر ومزود النظام بمرجل ماء ساخن مربوط على التسلسل مع المضخة الحرارية. نظام التدفئة مشعات حرارية 70/90 وأسطوانة ماء ساخن.

والشكل (7-16) مضخة حرارية ماء - ماء مربوطة مع مرجل كهربائي على التوازي. والشكل (7-17) يوضح استخدام مضخة حرارية هواء - ماء مع مرجل ماء ساخن.

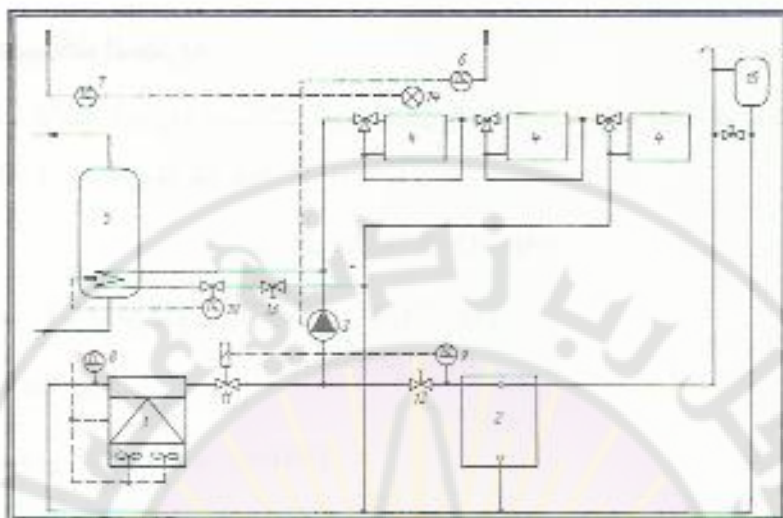
والشكل (7-18) نظام تدفئة بوساطة الطاقة الشمسية والمضخة الحرارية ماء - ماء. المنبع الحراري مياه بئر ومزود النظام بسخان كهربائي على أنه وسيط مساعد في الأيام الباردة. مواصفات النظام موضحة على الشكل.



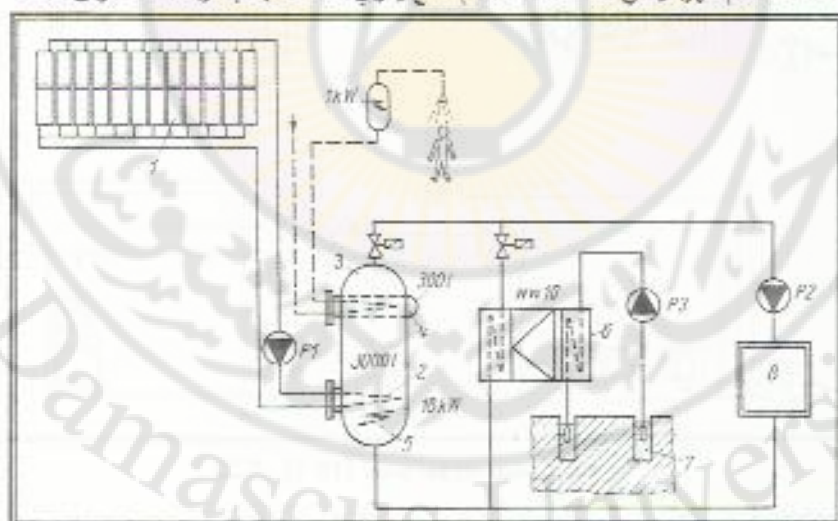
الشكل (7-15) نظام تدفئة شقق سكنية بواسطة مضخة حرارية ماء - ماء مع وحدة مياه بئر مرجل
تدفئة مساعد 1- سحب مياه البئر اللازمة 2- إرجاع الماء بعد المبخر 3- مضخة سحب مياه المنبع
الحراري 4- مضخة حرارية ماء - ماء 5- مرجل تدفئة 6- مضخة تدوير مياه التدفئة 7- أجهزة
تدفئة 8- أسطوانة تحضير الماء الساخن 9- صمام قطع يدوي 10- صمام كهربائيسي
11- خزانات تمدد 12- 13-14-15-16- منظمات درجة الحرارة



الشكل (7-16) نظام تدفئة شقق سكنية بواسطة مضخة حرارية ماء - ماء مع وحدة مياه بئر ومرجل
تدفئة كهربائي مساعد 1- سحب مياه البئر اللازمة 2- إرجاع الماء بعد المبخر 3- مضخة حرارية ماء
- ماء 4- مضخة سحب مياه المنبع الحراري 5 و 6- مضخة تدوير مياه التدفئة 7- مرجل تدفئة
كهربائي 8- أسطوانة تحضير الماء الساخن 9- أجهزة تدفئة 10- خزانات تمدد 11- 12-13-14-15-
صمام قطع يدوي 16-17- صمام كهربائيسي 18- مقاومة تسخين 19-20- منظم درجة حرارة



الشكل (7-17) نظام تدفئة شقق سكنية بواسطة مضخة حرارية هواء - ماء ومرجل تدفئة
 1- مضخة حرارية هواء - ماء 2- مرجل تدفئة كهربائي 3- مضخة تدوير مياه التدفئة
 4- أجهزة تدفئة 5- اسطوانة تحضير الماء الساخن 6- 7- 8- 9- 10- منظم درجة حرارة
 11- صمام كهربائيسي 12- صمام قطع يدوي 14- لمبة إشارة 15- خزان تمدد



الشكل (7-18) مخطط توضيحي لنظام تدفئة شقق سكنية بواسطة مضخة حرارية ماء - ماء ومرجل
 تدفئة 1- لواقط شمسية 2- حساس حراري 3- خزان حراري للتدفئة 4- مبادل حراري
 5- وشيعة تسخين كهربائية 6- مضخة حرارية ماء - ماء 7- بئر 8- الحيز المدفأ
 9- p_{11} - مضخات تدوير الماء الساخن p_2 - مضخة سحب مياه البئر

2-7- التطبيقات التجارية:

تكيف الأبنية التجارية وصلالات البيع الشكل (19-7) حيث يلزم كمية هواء تغذية $6500 \text{ m}^3/\text{h}$ عند شروط خارجية $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

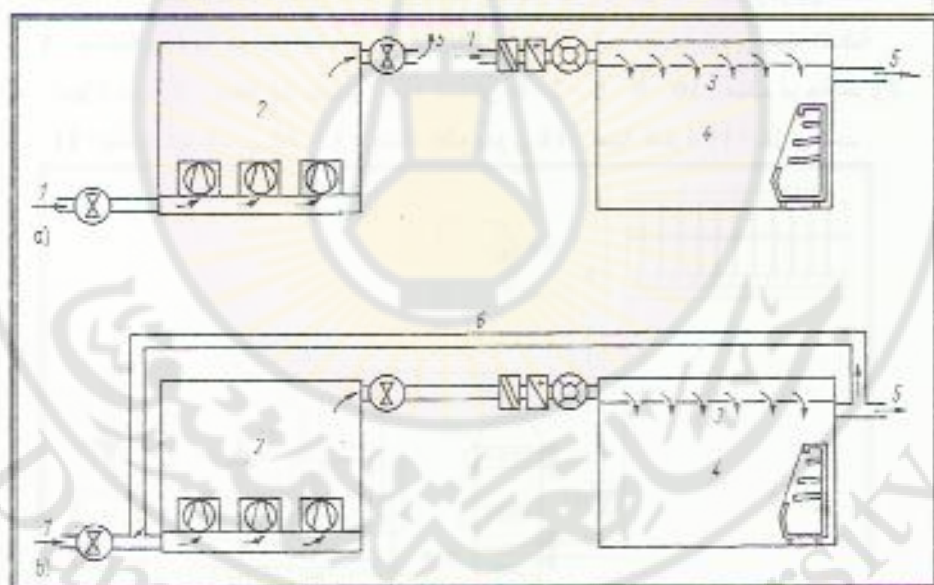
تسخين الهواء $\Delta t = 11-13\text{K}$

الاستفادة من الهواء الراجع يتراوح ما بين 24-37 KW.

أيام التفتة 200 يوم.

التوفير السنوي الكهربائي 150 kwh/a.

استرجاع رأس المال خلال عامين فقط.



الشكل (19-7) نظام تهوية صالات بيع

- a- بدون استرجاع حراري b- مع استرجاع حراري 1- هواء جديد 2- غرفة الآلات
(مضخات حرارية) 3- هواء التغذية 4- صالة بيع 5- هواء مطرود- راجع

- تدفئة المسابح المغلقة و المكشوفة مثال الشكل (20-7).

مواصفات المحطة كما يلي:

- حجم الصالة (المسبح) 3600 m^3

- مساحة المسبح $10 \times 25 \text{ m}^2$

- مساحة الفراغات الأخرى في الصالة $8 \times 10 \text{ m}^2$

- درجة حرارة الهواء المطلوبة 29°C

- رطوبة نسبية 60 %

- درجة حرارة ماء المسبح 27°C

- الاستطاعة العظمى اللازمة للمسبح 330 Kw

- تدفق هواء $V_2 = 20000 \text{ m}^3/\text{h}$

- الدنيا للمسبح 240 Kw

$V = 14500 \text{ m}^3/\text{h}$

التوفير من جراء استخدام المضخة الحرارية في حال أيام عمل المسبح 300 يوم في السنة.

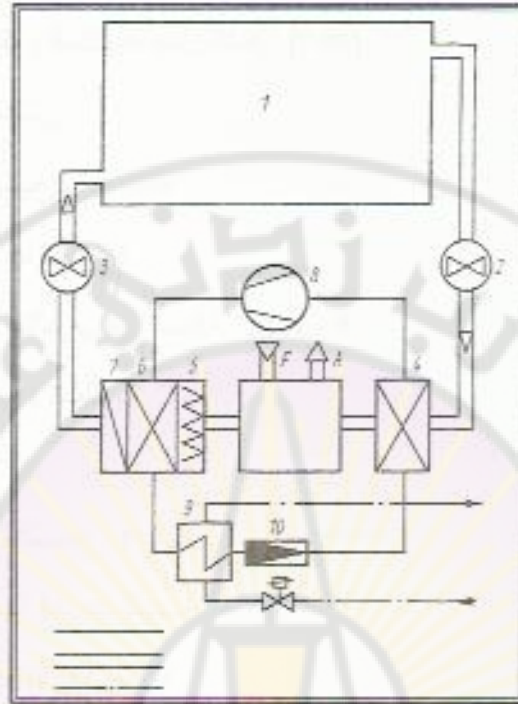
عدد ساعات العمل اليومي 10 h

1- تدفئة تقليدية يلزم تسخين كمية هواء 54000 t

وكمية بخاء ماء 425 t

2- مضخة حرارية يتم توفير 180 Mwh استطاعة كهربائية خلال سنة لكمية حرارة

مأخوذة من المضخة الحرارية باستطاعة 760 Mwh/a



الشكل (20-7) نظام تهوية صالة مسبح مغلق

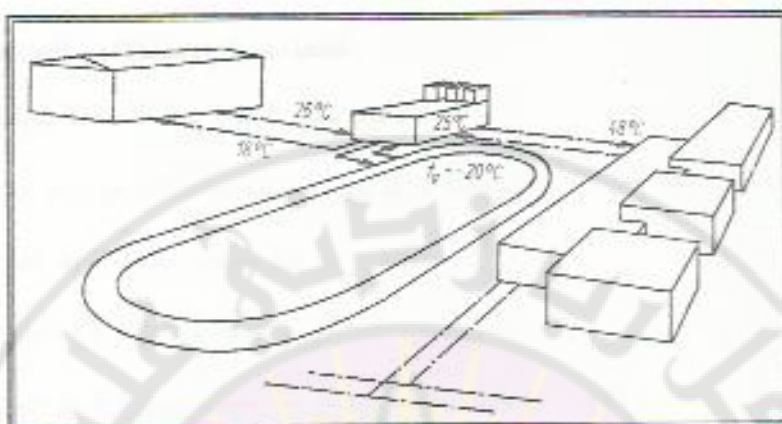
- 1- صالة المسبح 2- مروحة سحب 3- مروحة دفع تغذية 4- مبخر (تبريد الهواء)
- 5- فلتر 6- مكثف 7- وشيعة تسخين لاحق 8- ضاغط 9- مكثف حزمة اثايبب من أجل
- الفائض الحراري 10- صمام تمدد 8 هواء مطرود F هواء جديد

كما يمكن استخدام المضخة الحرارية في صالات التزلج على الجليد لهدف التبريد والتسخين بأن واحد والشكل (21-7، 22-7) يوضح محطة التبريد والتسخين تبريد غرف خزن مواد غذائية وتبريد أرضية صالة التزلج بالإضافة إلى تدفئة المباني التابعة للصالة وغرف التبريد.

مواصفات الصالة:

الأبعاد الهندسية $70\text{ m} \times 30\text{ m}$

صالات رياضية عدد 2 أبعاد كل منها $25\text{ m} \times 45\text{ m}$

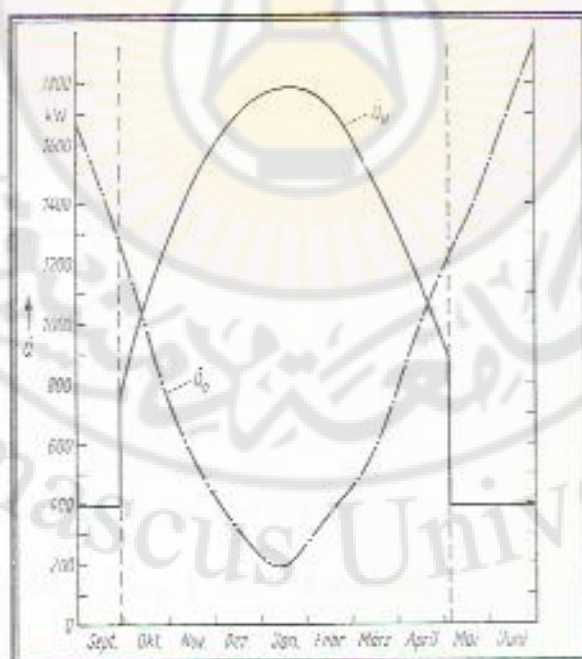


الشكل (7-21) وحدة مضخة حرارية تسخين وتبريد بآن واحد

لصالة رياضية في مدينة درسدن بألمانيا

الشكل (7-24) يعطي الاستطاعات التبريدية واستطاعة التدفئة (المكثفات) تتابع

لأشهر السنة.



الشكل (7-22) مخطط تغير استطاعة التبريد والتسخين اللازمة

Q_0 الحمل التبريدي اللازم Q_1 حمل التدفئة

التقويم الطاقى والاقتصادي لهذه المحطة:

المواصفات للمضخة الحرارية - التبريدية:

- مضخة حرارية ثنائية المراحل، وسيط تبريد الأمونيا:

درجة حرارة تبخر وسيط التبريد -20°C

درجة حرارة الودعاء البقي $+15^{\circ}\text{C}$

درجة حرارة تبخر وسيط التبريد في المبخر الثانوي $+15^{\circ}\text{C}$

درجة حرارة التكاثف لآلة التبريد فقط $+40^{\circ}\text{C}$

درجة حرارة التكاثف لآلة المضخة الحرارية $+50^{\circ}\text{C}$

- نظام التكثف:

درجة حرارة مياه التكثف خط ذاهب $+48^{\circ}\text{C}$

درجة حرارة مياه التكثف خط راجع $+25^{\circ}\text{C}$

شبكة تدفئة أرضية

- المنبع الحراري للمضخة الحرارية:

مياه تكاثف آلة تبريد $+25^{\circ}\text{C}$

يتم تبريدها حتى $+18^{\circ}\text{C}$

- الاستطاعة الحرارية:

حمل التكثف من المضخة الحرارية 1840 Kw

حمل التبريد للتبريد الدونى (-20°C) 2040 Kw

حمل التبريد للمبخر الثانوي (غرف التبريد) 1553 Kw

الاستطاعة الكهربائية (مضخة حرارية) 319

الاستطاعة الكهربائية لألة التبريد 788

معامل أداء آلة التبريد $\epsilon_c = 2.5$

معامل أداء المضخة الحرارية $\epsilon_{HP} = 5.8$

التقويم الطاقى والاقتصادى لهذه المحطة:

تبريد - تسخين حوالى 38% من التكاليف الإجمالية يتم توفيرها سنوياً وفقاً لـ 7/.

3-7- التطبيقات الصناعية للمضخات الحرارية:

أهم التطبيقات الصناعية للمضخة الحرارية:

a- عمليات فصل المواد (تقطير، تبخير).

b- تجفيف الرطوبة ونزعها.

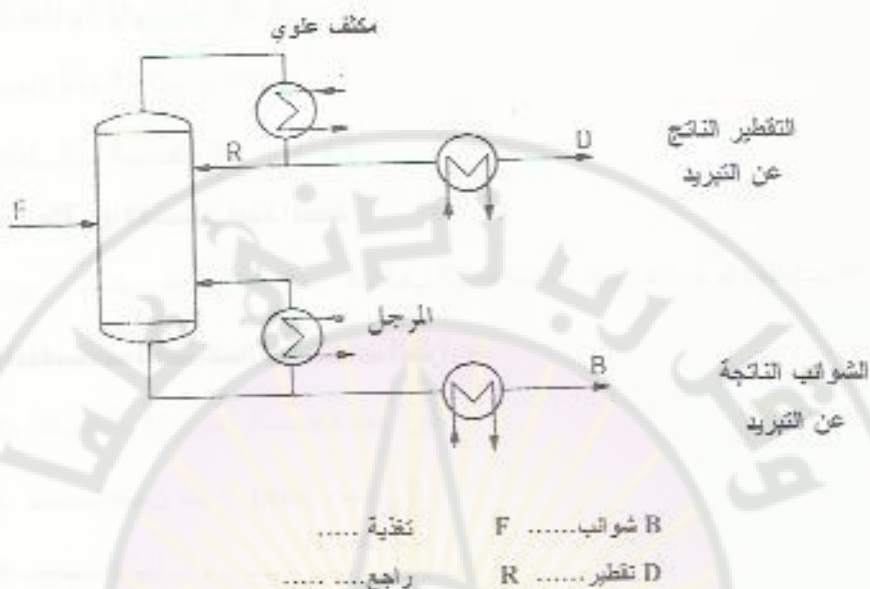
c- استرجاع الحرارة.

d- التكييف والتهوية.

3-7-1- عمليات فصل المواد والتقطير:

- تطبيقات المضخة الحرارية في التقطير:

يمكن التقليل من كمية الطاقة العالية المطلوبة في عمليات التقطير وذلك باستخدام نظام المضخة الحرارية لضخ الحرارة من المكثف إلى مرجل إعادة الغلي، ويتم إنجاز هذه العملية بواسطة الضغط لرفع مستوى الحرارة من درجة حرارة المكثف إلى درجة حرارة المرجل. إن المخطط التدفقي الموضوع من قبل العالم نيول يتألف من أسطوانة التقطير العمودية - مرجل إعادة غلي - مكثف لتكثيف البخار الخارج من أسطوانة التقطير انظر الشكل (7-23)، وفي جميع الحالات فإن الضغط ودرجة حرارة التكثيف يتم تحديدهم من درجة حرارة المرجل بينما وسيط التبريد يتم تحديده بالاعتماد على أعلى درجة حرارة تكثيف.



الشكل (7-23) يبين مخططاً لوحدة تقطير تقليدية

٥- دارات المضخة الحرارية المغلقة في وحدات التقطير:

إن التغيير الأبسط عن التصميم التقليدي المتضمن استخدام مضخة حرارية هي أن نستبدل تسخين الغاز في المرجل بالتبريد التكثيفي عند ضغط عال نسبياً، وأن نستبدل التبريد بتبريد تبخيري عند ضغط منخفض نسبياً.

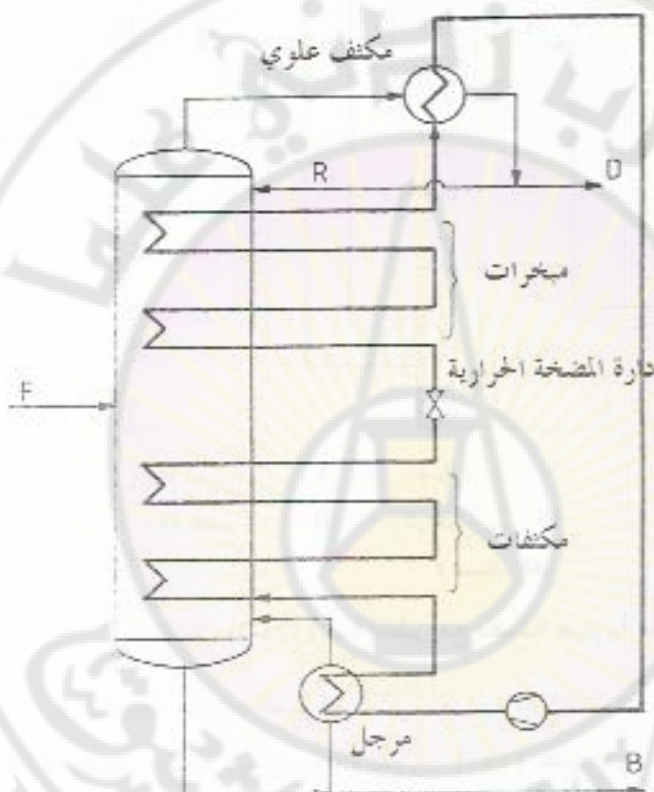
وهكذا فإن المرجل يصبح مكثفاً في نظام المضخة الحرارية اسطوانة التقطير العمودية تصبح مبخراً في نظام المضخة الحرارية، وهذا النموذج من نماذج أنظمة المضخة الحرارية مبين في الشكل (7-24)، واسطوانة التقطير العمودية نفسها لا تتغير في النظام التقليدي ولكن المبالغات الحرارية تصبح مختلفة قليلاً.

إن نسبة الحرارة المضخوخة إلى المرجل إلى عمل الضغط المطلوب تُعطى

بالعلاقة:

$$COP = \frac{Q_R}{W} = \eta_{th} \frac{T_3}{T_3 - T_1} \quad (1-3-7)$$

من أجل أي نظام ضخ حراري فإنه يوجد مجال محدد من الاقتصادية والذي يحدد قيمة ΔT .



الشكل (25-7) يبين عملية تقطير بمبادلة حرارية متوسطة

في البداية يكون استخدام مزيج سائل غير مثالي في المضخة الحرارية في تطبيقات التقطير تم معرفته من قبل العالم روجيه إيقال، حيث إن ترتيب هذا النظام تم توضيحه في الشكل (25-7) والذي يتضمن دورة ضخ حراري مضغطي مغلق مؤلف من ثلاثة مكثفات في الجزء السفلي من النظام وثلاثة مبخرات في المقطع الجزئي.

إن التقطير في مكثفات المضخة الحرارية ومبخرات المضخة الحرارية في المخطط يسبب تغيراً في نسبة الأبخرة إلى تدفق السائل.

وهكذا فإنه عند استخدام النسبة الأساسية بين البخار إلى تدفق السائل فإن عدد الصفائح يمكن أن يتم تقليله بشكل كبير، أما إذا تم استخدام نفس العدد من الصفائح فإن نسبة الرجوع تقل.

تم الأخذ بعين الاعتبار عدة عمليات تقطير مختلفة متضمنة للفصل بين الأمزجة الثنائية التالية:

✓ البنثان مع إيزوبنتان Pentane-iso-Pentane

✓ البوتان مع إيزوبوتان butane-iso-butane

✓ بروبان مع إيزوبروبان propane - normal butane

يتم الحصول على التوفير بالطاقة عند مقارنة التبريد والتسخين في المضخة الحرارية ذات المزيج السائل مع التبريد والتسخين في المضخة الحرارية ذات المكونات الصافية (دون مزج)، إن التوفير في الطاقة يمكن أن يصل إلى 35% في بعض الحالات.

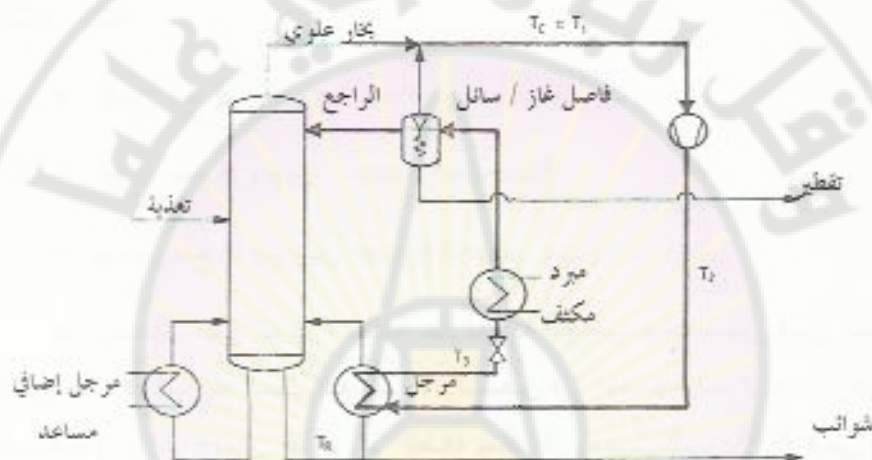
دورات المضخة الحرارية المفتوحة في وحدات التقطير:

إذا أيدى السائل الموجود في النظام خواص تبريدية، فإنه من الممكن أن نحسن عملية الضخ الحراري باستخدام هذا السائل سائلاً مبرداً في المضخة الحرارية، وبذلك فإنه يمكننا أن نقل قيمة ΔT_c أو ΔT_h في المعادلة (7-3-2)، وهكذا يمكننا زيادة النسبة Q_{th}/W وبذلك الوقت فإنه يتم اختصار مبادل حراري وبالتالي نقل التكلفة.

إن قيمة ΔT تبقى هامة لكن إن أخذت القيمة بالاعتبار بواسطة مبادل حراري أفضل من الفصل بين مبادلين حراريين.

أشكال مختلفة لاستخدام منتجات التقطير سوائاً لتبريد في المضخة الحرارية مبنية في الشكل (7-26). ومرة أخرى فإن النظام هو نفسه سواء كان في التصميم التقليدي أو في حالة المضخات الحرارية ذات الدورة المغلقة.

لكن الشكل (26-7) حيث يتم حذف مكثف لتغذية البخار العلوي أو السائل المشغل إلى الضاغط حيث يتم مرور لبخار من خلاله إلى المرجل والذي يعمل بنفس الوقت مكثفاً علوياً، ويتم خنق سائل التبريد المتكاثف لتتم إعادة الجزء الذي لا يزال سائلاً إلى النظام على أنه كمية راجعة أو يتم حجزه على أنه منتج متكاثف.



الشكل (26-7) يبين مضخة حرارية (لمكثف صفائحي)

الجدول التالي يبين مقارنة بين النظام التقليدي الصناعي للنقطير ونظام النقطير مع المضخة الحرارية:

		نظام تقطير تقليدي	نظام مع مضخة حرارية
الطاقة	الطاقة اللازمة للغليان	3120	
	استطاعة الضاغط التوربيني [kw]		310
	استطاعة المرجل [kw]		23
التكلفة المقدرة	كمية الطاقة الكلية [kw]	3120	333
	تكلفة البخار (sfr/h) (SFr 20/t = SFr 3.50/100 kw)	112	0.80
	تكلفة الطاقة الكهربائية (SFr 0.07/kwh)	-	21.70
	التكاليف الإجمالية للطاقة (SFr/h)	112	22.50
	التكاليف الإجمالية للطاقة (SFr/a)	900000	180000
	تكاليف استهلاك الطاقة (%)	100	20

إن نتائج دراسة العالم نيول قادت إلى الاستنتاجات التالية:

إن الضخ الحراري يتم تقليله بنسبة قليلة من الفعالية عندما تكون درجة حرارة المرجل أعلى من 150°C ، وإن النسبة تكون أكبر ما يمكن عند استخدام الماء المبرد في المكثف، وأقل ما يمكن عندما يقوم النظام التقليدي بإنتاج بخار ذي الضغط المنخفض الذي سيتم استخدامه في التطبيقات والعمليات الأخرى في المضخة الحرارية. نادراً ما تكون درجات حرارة المكثف بين 40°C - 120°C وذلك في حال استخدام نظام البخار ذي الصقيحة لكل من التسخين وإنتاج الطاقة.

إذا تم توليد البخار من التسخين فقط فإن البخار ذا الضغط المنخفض يكون تماماً مثل البخار ذي الضغط المرتفع، والمضخة الحرارية تكون في أوسع تطبيق لها.

إن معظم تطبيقات المضخة الحرارية تصبح أكثر اقتصادية في التصميم الجديد وبالتالي نسبة التطبيق صغيرة إذا تم إدخال مضخة حرارية صغيرة جداً في النظام.

تحقق العالمان ديلز وبيترسون من استخدام المضخات الحرارية في التقطير على أنه جزء من النظام المبين في مخططات التقطير، ولقد أشاروا إلى أن بنية المضخة الحرارية تكون أفضل وأكثر فائدة عندما يحدث في النظام الجزئي اختلاف في درجة الحرارة أقل مما هي في النظام في حالة الاختلاف الكبير في درجات الحرارة فإن فعالية المضخة الحرارية تصبح أقل.

شأن نظام المضخة الحرارية يتطلب توازناً محدداً من الحمل الحراري ليقلل من استخدام الحرارة الخارجية أو مصادر التبريد.

إن التوازن الحراري للنظام يكون حساساً جداً للأوضاع الحرارية لكل من المغذي والمنتج، على سبيل المثال إن الحاجة إلى بخار التغذية وإنتاج السائل يمكن أن يؤدي لحدوث ما يلي:

عندما تكون استطاعة مرجل التقطير كافية للتكاثف فإن الراجع الأماسي يُضاف إلى المنتج.

إن منبع التبريد الخارجي يكون ضرورياً من أجل الحصول على الاختلاف، في معظم الحالات يكون من الممكن أن نقلل من ضغط التشغيل في وحدة التقطير باستخدام مضخات حرارية.

إن مثل هذا يحدث عندما يتم تحديد درجة الحرارة العلوية للنظام من خلال درجات حرارة وسيط التبريد، إن تقليل الضغط يسبب زيادة معدل التطاير يمكن أن يؤدي أيضاً إلى تقليل الراجع، ونسبة الضغط تتغير أيضاً بنفس الوقت.

7-3-2- نزع الرطوبة:

يوضح الشكل (7-27) مخططاً توضيحياً لألة مضخة حرارية تستخدم في أحد المعامل لصناعة التصوير وملحقاتها في مدينة برلين. تبلغ درجة الحرارة المطلوبة للتجفيف $+40^{\circ}\text{C}$ عند نقطة الندى والمتطلبات الحرارية لهذه الآلة كالآتي:

تدفق هواء $60000 - 180000 \text{ m}^3/\text{h}$

درجة حرارة الهواء المطلوبة للتجفيف $+4 \dots +30$

نقطة الندى $+8$

الهواء النقي $0-100\%$

الرطوبة النسبية $\varphi = 30 - 100\%$

المضخة الحرارية هواء - هواء ذات ضواغط حلزونية من نوع S3-180.

المشع الحراري: الهواء الراجع من المصنع.

المستهلك الحراري: هواء رطب (فيلم التحميض).

وسيط التبريد: R134a.

الاستطاعة التبريدية: $Q_{0\max} = 2 * 616 \text{ Kw}$

استطاعة التدفئة للتسخين: $Q_{e\max} = 2 * 857 \text{ Kw}$ عند الشروط التالية:

درجة حرارة المبخر $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$

درجة حرارة التكاثف $t = +50^{\circ}\text{C}$

الاستطاعة الكهربائية للضاغط $W = 2 * 268 \text{ Kw}$

التكاليف الاستثمارية: 1.4 Mil M

التوفير في الطاقة السنوي: 0.6 Mil M

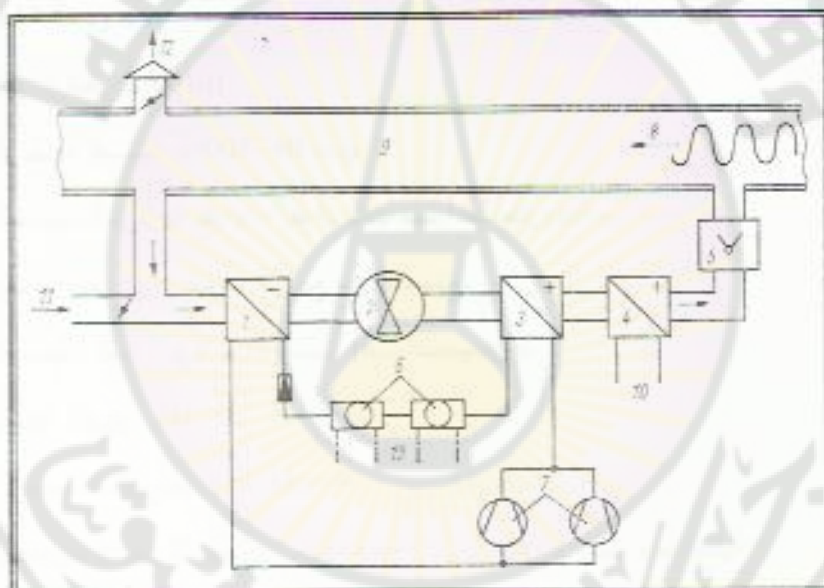
التوفير الكلي السنوي: 1.2 Mil M

تمت المقارنة مع وحدة تجفيف تقليدية بسخن الهواء بالطرق التقليدية (مرجل، حرق، وقود، ديزل).

في محطة المضخة الحرارية يتم تسخين الهواء $\Delta t_c = 23^\circ\text{C}$

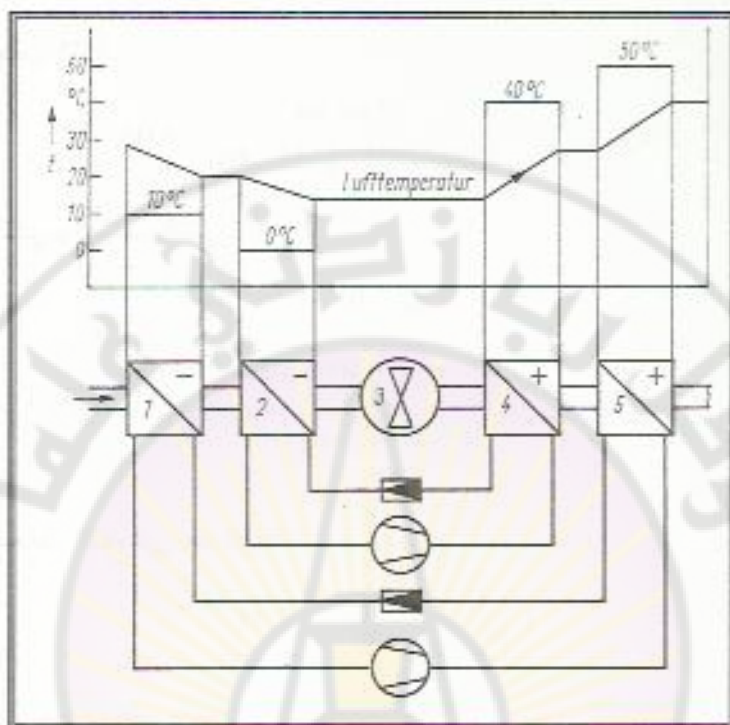
وفي المنبع الحراري يبرد $\Delta t_0 = 15$

والفرق في درجة حرارة الهواء ووسيط التبريد في المكثف تبلغ 33°C وبالمثل في المبخر.



الشكل (27-7) نظام تجفيف أفلام التصوير بالمضخة الحرارية

أما في حال تطبيق دائرة لورنس أو التقارب منها يرتفع الأداء الحراري للمحطة. لتحقيق ذلك يمكن ربط مبخرين ومكثف على التسلسل وبالتالي يرتفع معامل الأداء 5% كما هو مبين في الشكل (28-7).



الشكل (7-28) وحدة مضخة حرارية مع آلي تبريد لتجفيف الهواء

1- مبخر عند $t = +10$ 2- مبخر عند $t = 0$ 3- مروحة

4- مكثف عند $t = +40$ 5- مكثف عند $t = +50$

ويوضح ذلك في العلاقات التالية:

معامل الأداء لدارة كارنو:

عند $t_0 = 0$ و $t_c = 50$

$$e_c = \frac{T_c}{\Delta T} = \frac{50 + 273}{(273 + 50) - (273 + 0)} = 6.46$$

أما في حالة ربط مكثفيتين أو مبخرتين:

المبخر الأول والمكثف الأول $t_0 = +10$

$t_c = +50$

فيكون معامل الأداء:

$$\varepsilon_{c1} = \frac{T_c}{\Delta T} = \frac{273 + 50}{(273 + 50) - (273 + 10)} = 8.08$$

المبخر الثاني والمكثف الثاني:

$$t_0 = 0$$

$$t_c = +40$$

$$\varepsilon_{c2} = \frac{313}{40} = 7.82$$

فيكون للمعامل الإجمالي عند الربط:

$$\varepsilon_{c_{tot}} = \frac{2\varepsilon_1 * \varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}} = 7.95$$

بمقارنة ε_c مع $\varepsilon_{c_{tot}}$:

ينتج التوفير وتحسين معامل الأداء كما يلي:

$$\frac{\Delta \varepsilon_c}{\varepsilon_c} = \frac{7.95 - 6.46}{6.46} = 0.23$$

هذا يعني أن الاستهلاك الكهربائي للضاغط ينخفض 23%.

وبالتالي انخفاض في مساحة سطح التبادل الحراري للمكثف والميز أيضاً.

3-3-7- تجفيف الأخشاب بواسطة المضخة الحرارية واسترجاع الحرارة:

حيث يتم استخدامها عند درجات منخفضة (مرجع 9-4 مضخات حرارية).

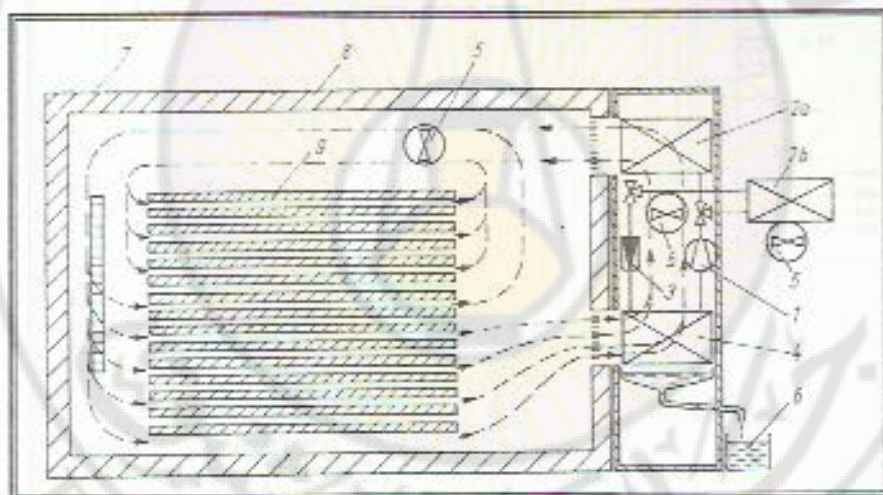
استهلاك الطاقة لتجفيف الأخشاب بواسطة المضخة الحرارية يعادل خمس ¹/₅

الطاقة التي تستهلكها محطات التجفيف التقليدية وعلاوة على ذلك استخدام الماء الناتج عن التجفيف كما هو موضح بالشكل (7-29).

أما في المجالات الزراعية يتم تجفيف الأعشاب كعلف الحيوان بالإضافة إلى تجفيف الخضار والفواكه بنفس الطريقة.

حيث تصل درجة الحرارة الوسطية للأخشاب عند التجفيف حتى 30°C عند استخدام المضخة الحرارية أما في المحطة التقليدية يصل حتى 60°C .

يعمل المبخر عمل مبرد ومجفف بأن واحد كما هو معروف في وحدات التبريد والخزن. لهذا المبدأ نجد أن تطبيق المضخة الحرارية في تجفيف المنتجات الزراعية يوفر حوالي 80% من الطاقة بالمقارنة مع الوحدات التقليدية وذلك نتيجة الاسترجاع الحراري عبر المبخر كما هو موضح في الشكل (29-7).



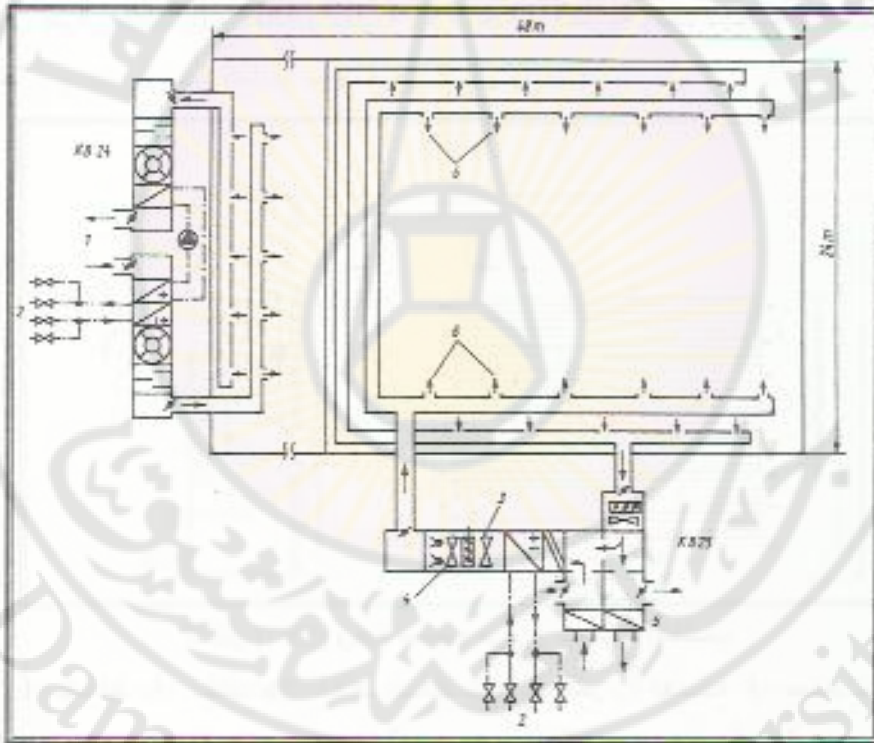
الشكل (29-7) وحدة مضخة حرارية لتجفيف الأخشاب

- 1- ضاغط 2a- مكثف 2b- مكثف مساعد لتصريف الحرارة الفائضة 3- صمام تمدد
- 4- مبخر 5- مروحة 6- مجمع مياه المسحوبة من الأخشاب 7- وشيعة تسخين كهربائية
- 8- غرفة تجفيف الأخشاب 9- ألواح الخشب

7-3-4- التكييف الصناعي:

صناعة الإلكترونيات والتجهيزات الدقيقة بالإضافة إلى صناعة العدسات والبصريات تحتاج إلى فروق حرارية دقيقة.

لذلك يتم تجهيز هذه الصناعات بوحدات ومحطات تكييف (تسخين - تبريد) من أجل رفع كفاءة هذه الصناعات الشكل (7-30) يبين محطة مضخة حرارية لغاية تكييف مبنى الاختبارات في مصنع التهوية والتبريد في مدينة درسدن بألمانيا (مرجع 7).



الشكل (7-30) محطة مضخة حرارية لتكييف مبنى الاختبارات

في مصنع التهوية والتبريد في مدينة درسدن بألمانيا

- 1- دخول وخروج الهواء 2- ماء بارد أو ساخن (صيفاً أو شتاءً) 3- مروحة 4- مروحة مع مرطبة مبادل حراري استرجاعي 6- فتحات تغذية الهواء المكيف

أبعاد المصنع:

طول 48 m عرض 24 m ارتفاع 8.4 m

مساحة المصنع 1180 m^2 حجم المكان المكيف 11380 m^3

استطاعة التبريد اللازمة 86 Kw استطاعة التسخين اللازمة 101 Kw

تدفق هواء التغذية $V_s = 18000 \text{ m}^3$

يجهز المبنى بوحدة معالجة هواء:

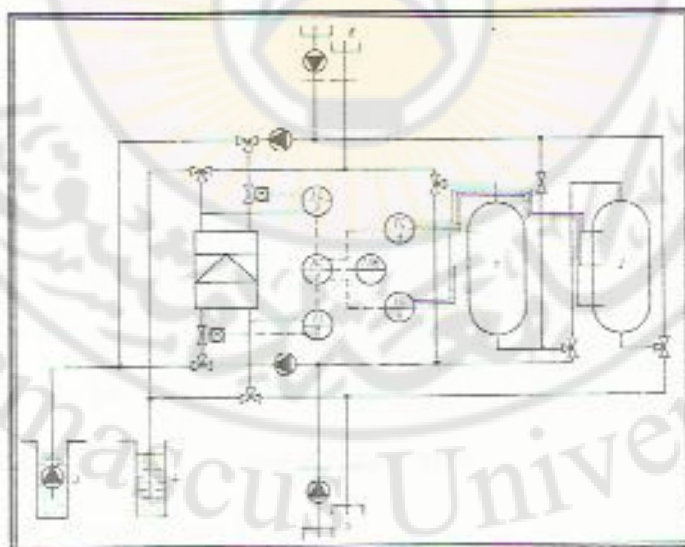
1- وحدة معالجة هواء: تدفق الهواء $18000 \text{ m}^3/\text{s}$.

2- وحدة معالجة هواء: تدفق الهواء $2500 \text{ m}^3/\text{s}$.

يتم تشغيل الودعتين حسب الحالة تسخين أو تبريد.

يمكن أن تستبدل هاتان الودعتان بمضخة حرارية واحدة كما هو مبين في الشكل

(31-7).



الشكل (31-7) محطة مضخة حرارية ماء - ماء لغرض التبريد والتسخين

1-2- خزان حراري 3- منبع حراري (بئر) 4- بئر لارجاع المياه بعد الاستفادة من حرارتها

5- مستهلك الماء البارد 6- مستهلك الماء الساخن

مواصفات محطة المضخة الحرارية المستخدمة كالآتي:

استطاعة تسخين 241 Kw

استطاعة تبريد 178 Kw

استطاعة تشغيل الضواغط 71 Kw

درجة حرارة خروج الماء البارد $+4^{\circ}\text{C}$

درجة حرارة خروج الماء الساخن $+45^{\circ}\text{C}$

معامل أداء المضخة الحرارية $\varepsilon_{HP} = 3.4$

معامل أداء محطة المضخة الحرارية $\varepsilon = 3.05$

عمل آلة التبريد (صيفاً):

استطاعة التبريد 249 Kw

استطاعة عمل الضاغط 56 Kw

درجة حرارة خروج الماء البارد $+4^{\circ}\text{C}$

معامل أداء آلة التبريد 4.4

وحدة مياه البئر:

عمق البئر 19 m

عمق مياه البئر 6 m

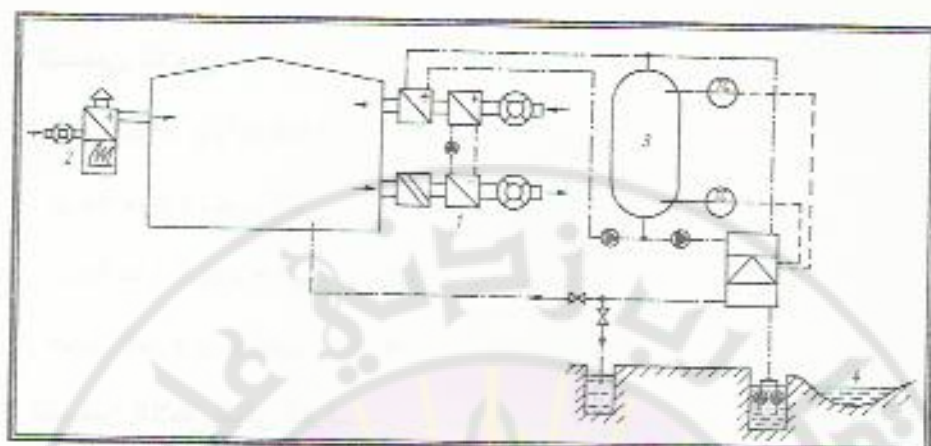
تدفق مياه البئر $30 - 50 \text{ m}^3/\text{h}$

وحدة التخزين: خزان عدد 2 جمع كل منها 54 m^3

سماعة العزل الحراري 80 mm

والشكل (7-32) يوضح استخدام المضخة الحرارية وحدة تهوية وتكييف في مصنع

محركات كهربائية (المراجع 7).



الشكل (32-7) نظام تدفئة بالهواء الساخن بواسطة مضخة حرارية ماء - ماء
والاستفادة من الهواء الراجع لمصنع محركات
1- مبادل ارجاعي، 2- وشيع تسخين مساعدة، 3- خزان حراري 52 m^3 ، 4- مياه نهر

نظام استرجاعي Rekuperation Zirkulations system R2-system

محطة التدفئة في المصنع تتألف من مضخة حرارية، وحدة استرجاع الحرارة،
وحدة مساعدة للتدفئة وخزان حراري.

المواصفات الحرارية والهندسية لمحطة التدفئة للمضخة الحرارية هي:

1- وحدة استرجاع الحرارة والتسخين الأولى:

تدفق كمية الهواء المطرود $V_n = 20570 \text{ m}^3/\text{h}$

درجة حرارة الهواء الراجع $t = 18/3.2 \text{ C}^\circ$

تدفق هواء التغذية $V_s = 27650 \text{ m}^3/\text{h}$

درجة حرارة الهواء الخارج -15 C° 3.9 C°

معامل الاسترجاع الحراري 0.45

الربح الحراري الأعظمي 102 Kw

2- التسخين اللاحق:

تدفق الهواء $1200 \text{ m}^3/\text{h}$

درجة حرارة دخول الهواء -3.9°C

درجة حرارة خروج الهواء $+20^\circ\text{C}$

الحمل الحراري للتسخين 96 Kw

3- التسخين اللاحق لباقي الغرف:

تدفق الهواء $15650 \text{ m}^3/\text{h}$

درجة حرارة دخول الهواء -3.9°C

درجة حرارة خروج الهواء $+20.9^\circ\text{C}$

حمل التسخين 127 Kw

4- مواصفات المضخة الحرارية:

وسيط التبريد: R22

حمل التسخين 223 Kw

حمل التبريد 160 Kw

استطاعة الضواغط 160 Kw

عمل الضواغط 71 Kw

درجة حرارة الماء المبرد من البئر $+3^\circ\text{C}$

درجة حرارة خروج الماء الساخن من المكثف $+48^\circ\text{C}$

معامل أداء المضخة الحرارية $\varepsilon_{HP} = 3.15$

5- وحدة مياه البئر:

تدفق المياه $28 \text{ m}^3/\text{h}$

درجة حرارة الماء $8 - 12^\circ \text{C}$

الخزان الحراري 52 m^3

6- التقييم الاقتصادي:

التوفير من جراء وحدة الاسترجاع الحراري 260000 M

التوفير السنوي في الطاقة 65000 M/a

مدة استرجاع رأس المال 5.5 a

4-7- التطبيقات الزراعية:

في وحدات التبريد والتخزين للمنتجات الزراعية والغذائية تستخدم آلات التبريد لهدف تبريد هذه المنتجات. من جراء عمل هذه الآلات تنتج كميات حرارة كبيرة من المكثفات. يمكن الاستفادة من هذه الحرارة في مجال التدفئة ومثالاً لذلك الشكل (33-7) يوضح الاستفادة من حرارة مكثفات آلات تبريد غرف مخازن التبريد ودمج هذه الحرارة مع حرارة مكثف مضخة حرارية ماء - ماء لإعطائها لشبكة تدفئة أرضية صالحة بيع تبلغ درجة حرارة مياه التدفئة 44°C وخروج 39°C ودرجة حرارة المنبع الحراري للمضخة الحرارية مياه البئر $10^\circ \text{C} +$.

نتيجة استخدام المضخة الحرارية وحرارة التبريد ينتج توفير حوالي 30% من التكاليف الإجمالية سنوياً ومواصفات وحدة التدفئة بالمضخة الحرارية كالآتي:

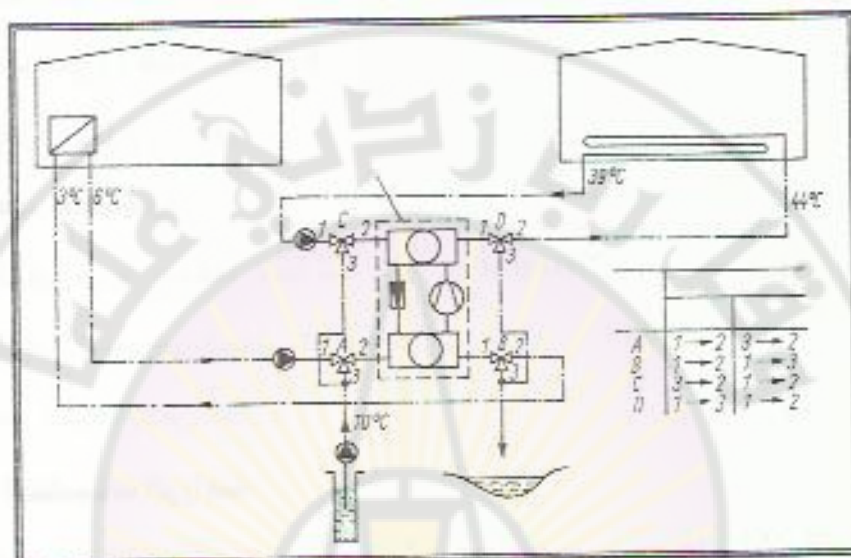
- مضخة حرارية ماء - ماء تعمل على وسيط تبريد R22.

- المنبع الحراري: مياه بئر بدرجة حرارة $10^\circ \text{C} +$

- المستهلك الحراري: شبكة تدفئة أرضية.

- حمل التدفئة المقدم من المضخة الحرارية 130 Kw

- حمل المنبع الحراري (مياه البئر) 121 Kw



الشكل (33-7) مضخة حرارية ماء - ماء تبريد

تسخين A-B-C-D تدفق المياه عبر صمام ثلاثي

الاستطاعة الكهربائية المقدمة:

- ضاغط المضخة الحرارية 36 Kw

- مضخة الماء 4 Kw

- معامل أداء المضخة الحرارية $\epsilon_{HP} = 3.3$

من أجل رفع معامل أداء المضخة الحرارية يمكن الاستفادة من حرارة آلات التبريد عن طريق مياه برج تبريد تلك الآلات هذه هي بمثابة المنبع الحراري للمضخة الحرارية المستخدمة لغرض التدفئة في شبكة التدفئة الأرضية لصالة بيع يوضح الشكل (34-7) غرف تبريد فراكه يستخدم التي تبريد لتحقيق درجة الحرارة اللازمة $0 \dots + 4^\circ C$ حرارة المكثفات تحلى لبرج التبريد ومن مجمع مياه تبريد إلى التبريد تؤخذ لمنبع حراري للمضخة الحرارية مواصفات هذه المحطة كما يلي:

المضخة الحرارية ماء - ماء تعمل على R22

المنبع الحراري مياه برج تبريد دخول $+18.7^{\circ}\text{C}$

خروج المياه من المبخر $+14.7^{\circ}\text{C}$

المستهلك الحراري:

دخول مياه التفتة إلى الشبكة 142

خروج مياه التفتة من الشبكة $+37^{\circ}\text{C}$

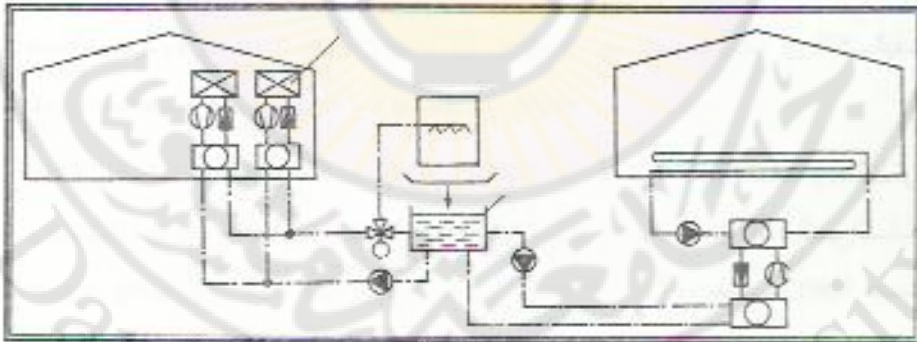
حامل التفتة 245 Kw

حمل التبريد 188 Kw

الاستطاعة الكهربائية 58.5

معامل الأداء $\epsilon = 4.2$

من جراء تطبيق هذه المحطة تم توفير 38% من التكاليف الإجمالية.



الشكل (7-34) وحدة مضخة حرارية لصالة بيع المنيع الحراري مياه تبريد مكثف آلة تبريد

وكتطبيق اخر للمضخات الحرارية كتبريد وتسخين بأن واحد في صناعة الحليب

(تبريد، بستر.. الخ) الشكل (7-35) يوضح محطة تبريد - وبسرة الحليب مواصفات المحطة كالآتي:

كمية الحليب $14\text{ m}^3/\text{d}$

تبريد من $4^{\circ}\text{C} - 32^{\circ}\text{C}$

كمية الماء المطلوب للبيطرة $14 - 17 \text{ m}^3/\text{d}$

درجة الحرارة المطلوبة $50 - 55^{\circ}\text{C}$

المضخة الحرارية:

استطاعة الضاغط 12 Kw

الاستطاعة الكهربائية اليومية 216 Kwh/d

الاستطاعة الكهربائية اللازمة للتسخين:

ماء $15.5 \text{ m}^3/\text{d}$

يلزم 397 Kwh/d من درجة حرارة $28 - 50^{\circ}\text{C}$

ويلزم 163 Kwh/d استطاعة كهربائية لتبريد 14 m^3 من $4^{\circ}\text{C} \rightarrow 10^{\circ}\text{C}$

إجمالي الاستطاعة الكهربائية 720 Kwh/d لتسخين 15.5 m^3 من $10 - 50^{\circ}\text{C}$

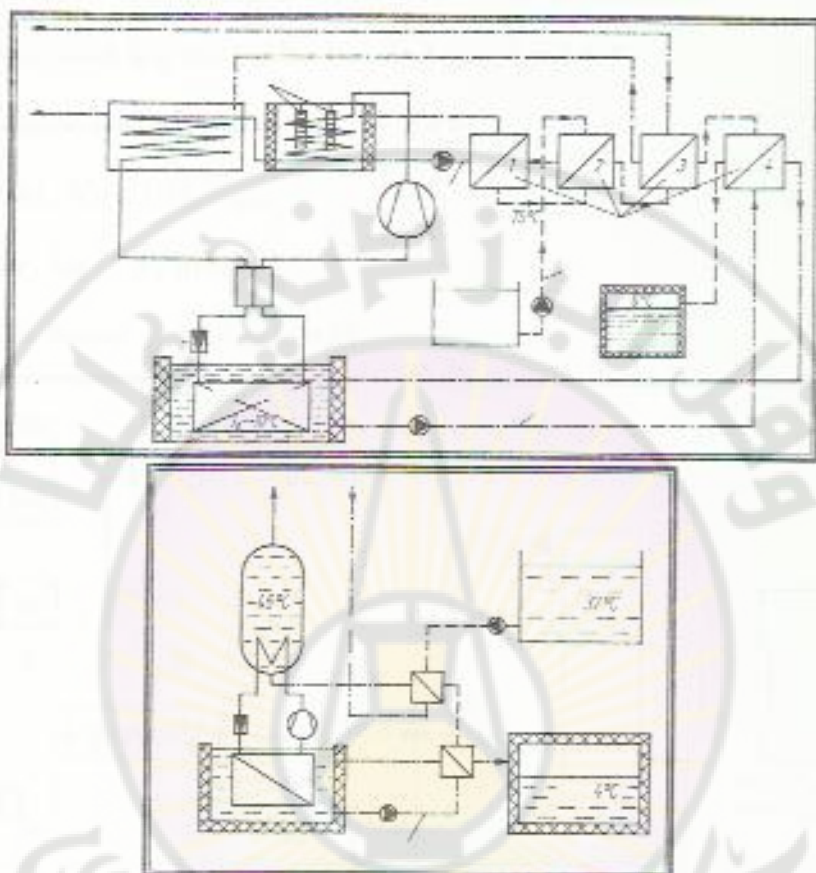
هذه المحطة وفرت 137 طن من الفحم اللازم سنوياً لهذه المهمة، كما أن التكاليف

الاستثمارية انخفضت 20% مقارنة مع المحطات التقليدية.

كما أن صفات التطبيقات العديدة كمثال الاستفادة من حرارة الحيوانات وحظائر البقر والماشية ومزارع الدواجن. تتم الاستفادة من الحرارة التي تنتجها هذه الحيوانات حيث تبلغ درجة حرارة هواء هذه الحظائر ما بين $(5 - 25^{\circ}\text{C})$ ورطوبة 80% عند درجة حرارة خارجية 0°C .

درجة الحرارة هذه منبع مناسب وجيد لمضخة حرارية هواء - هواء أو هواء - ماء.

على الرغم من أن هواء الحظائر يحمل كمية من بخار الأمونيا تتراوح نسبته ما بين 15-30 PPM وكمية غبار 6 mg/m^3 . هذا ما يلوث المبادل الحراري المستخدم في المضخة الحرارية، لهذا يجب أخذ هذه الاعتبارات عند تصميم المبادل الحراري.



الشكل (35-7) نظام آلة مضخة حرارية لبصرة الحليب وتحضير الماء الساخن

في صناعة الدواجن وتربية الفروج يلزم تدفئته في فصل الشتاء من أجل تربية الفروج وتسمينه.

حيث متطلبات التدفئة لتربية الفروج درجة حرارة تتراوح ما بين 32°C - 33°C في الأسبوع الأول ومن ثم تنخفض درجة الحرارة أسبوعياً ما بين 23°C - 25°C . وهكذا حتى تنخفض درجة حرارة التدفئة اللازمة في الأسبوع الأخير حتى 17°C - 22°C .

استخدمت محطة مضخة حرارية للتدفئة وتأمين درجات الحرارة المطلوبة لمدجنة سعتها 22000 طائر - فروج بواسطة شبكة تدفئة أرضية وتدفئة بالهواء الساخن كما هو مبين في الشكل (36-7) مواصفات المحطة كما يلي:

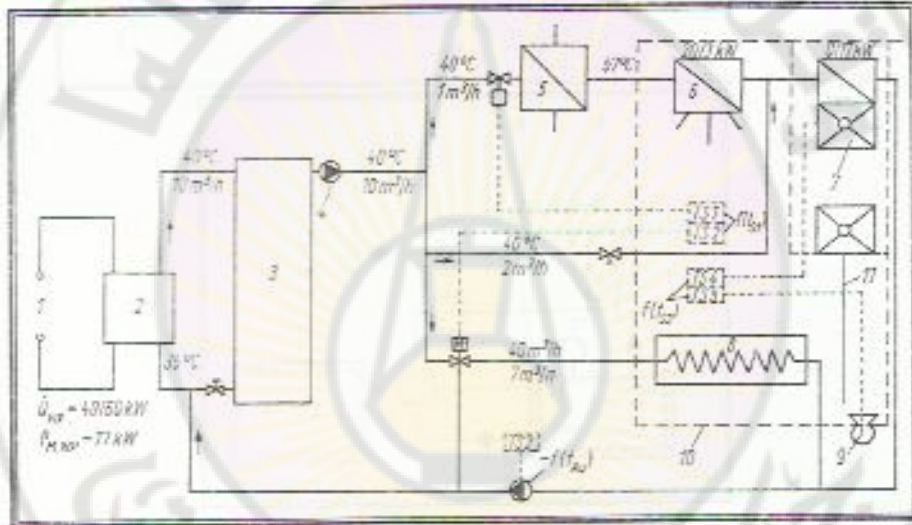
حمل التدفئة الذي يقدمه مكثف المضخة الحرارية 165 Kw

استطاعة ضواغط المضخة الحرارية 54 Kw

معامل الأداء $\epsilon_{HP} = 3.05$

تدفق الهواء $20000 \text{ m}^3/\text{h}$

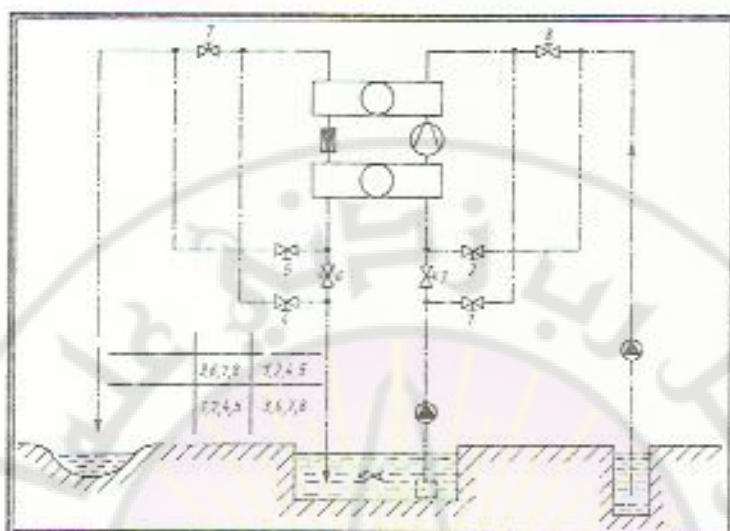
أبعاد المدخنة $84 \times 12 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$



الشكل (36-7) وحدة مضخة حرارية لمنشأ تربية الدواجن مع نظام تهوية

- 1- منبع حراري 2- مضخة حرارية ماء - ماء أو هواء - ماء
- 3- خزان حراري 4- مضخة 5- تسخين لاحق $Q_N = 20 \text{ Kw}$ 6- مشع حراري
- 7- وحدة تدفئة هواء ساخن مساعدة 8- نظام تدفئة أرضية $Q_H = 40 \text{ Kw}$
- 9- مراوح 10- حظيرة تربية الدواجن 11- هواء تغذية ساخن

تم توفير حرق وقود ما يعادل 60% من كمية الوقود اللازمة في حال التدفئة بالطرق التقليدية وعلاوة على ذلك انخفاض من انبعاثات CO_2 كما يمكن تطبيق المضخة الحرارية في مجال تربية الأسماك كما هو موضح بالشكل (37-7) مضخة حرارية ماء - ماء المنبع الحراري مياه بئر.



الشكل (7-37)

في مجال صناعة الأزهار في البيوت البلاستيكية بالإضافة إلى إنبات الخضار مثل البندورة، الخيار.. الخ يلزم تأمين درجة حرارة لازمة لإنبات الأزهار $+20 + 30^{\circ}\text{C}$ ورطوبة نسبة 50-80%.

مواصفات مضخة حرارية لببيت بلاستيكي كما يلي:

أبعاد البيت $20 \times 12 \times 2.3\text{m}$

استخدام شبكة تدفئة أرضية.

مضخة حرارية ماء - ماء تعمل R22

درجة حرارة الخزان الحراري $+20^{\circ}\text{C}$

دخول الماء إلى الميز 8

خروج الماء من المكثف 43

عودة الماء من شبكة التدفئة الأرضية 38

معامل الأداء 4.5

مدة استرجاع النظام 0.7



الفصل الثامن

الدراسة الاقتصادية والحرارية للمضخة الحرارية

1.8 مقارنة مع بعض أنظمة التدفئة المألوفة:

تم في الفصل السابع شرح مفصل لمقارنة أنظمة التدفئة والتسخين التقليدية في جميع المجالات - المنزلية - التجارية - الصناعية - الزراعية، وبيان كمية الطاقة والتكاليف السنوية الموفرة من جراء استخدام المضخة الحرارية.

2.8 توصيف النظام (تبريد - تكييف):

عبارة عن محطة تسخين - تبريد تتألف من آلة امتصاصية التي تشغل بوساطة الطاقة الشمسية وطاقات أخرى، تتأني وسيط التشغيل ماء - بروميد الليثيوم تكاليف المحطة تحسب وفقا لتكاليف رأس المال وتكاليف التشغيل وأيضا درجة التغطية من الطاقة الشمسية وتأتي وسيط التشغيل العامل الذي يؤثر على درجة حرارة التشغيل وحجم المحطة للشمسية، هناك عدة دراسات اقتصادية لاستثمار الطاقة الشمسية في التبريد والتكييف (تسخين - تبريد) 3, 2/.

الاستطاعة التبريدية والبيانات الأخرى للمحطة معطاة بالجدول (1-8).

3.8 الطريقة الحسابية:

التغطية الشمسية: 0%, 50%, 80%, 100%

الشروط الحدية للمحطة:

الاستطاعة التبريدية: 40 Kw

درجة حرارة غليان وسيط التبريد $+1^{\circ}\text{C}$

درجة حرارة تكاثف وسيط التبريد $+30^{\circ}\text{C}$

طاقة التسخين اللازمة للمولد تؤمن من طاقات مختلفة كما هو مبين في الجدول (1-8).

عمل المحطة 2000 ساعة عمل خلال السنة

كمية الطاقة الساعية للمتر المربع خلال عام من الانتعاش الشمسي $1000 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$

تكاليف اللواقط الشمسية للمحطة /5/ وفقاً 700 €/m^2

سعر الماء الساخن من الشبكة العامة /6/ $0,07 \text{ €/kWh} + 35,70 \text{ €/kW} \cdot \text{a}$

سعر الطاقة الكهربائية /6/ $0,1426 \text{ €/kWh} + 248 \text{ €/a}$

سعر الغاز الطبيعي /a/ $153,12 \text{ €/a}$ (لاستطاعة تسخين اسمية) $3,2 \text{ €/kW} \cdot \text{a}$ (30 kW)

ومن أجل استطاعة أكبر من 30 kW $0,0403 \text{ €/kWh} + 6/$

سعر مياه التبريد $1,89 \text{ €/m}^3 + 245 \text{ €/a}$

سعر المياه المستهلكة $2,15 \text{ €/m}^3 + 73,70 \text{ €/a}$

تحتسب التكاليف السنوية الكلية لنظام التبريد وفقاً للعلاقة التالية

$$K_{\text{ges}} = K_0 + K_1 \quad (1-8)$$

حيث أن:

K_0 رأس المال

K_1 تكاليف التشغيل

$$K_0 = \frac{k_{\text{inv}} \cdot q^n (q-1)}{q^n - 1} \quad (2-8)$$

حيث أن:

K_{inv} استثمار رأس المال

$q=0.6$ فائدة رأس المال المستثمر

n زمن الاستخدام

تكاليف التشغيل:

$$K_t = K_{thw} + K_{tkw} + K_{tel} + K_{tms} \quad (3-8)$$

حيث أن

K_{thw} تكاليف ثمن طاقة التسخين (ماء ساخن - غاز - طاقة كهربائية)

K_{tkw} تكاليف الماء البارد (استهلاك الماء والماء الجديد)

K_{tel} تكاليف الطاقة الكهربائية

K_{tms} استثمار رأس المال تكاليف الصيانة = 2% من تكاليف

في الجدول (1-8) يعطي التكاليف السنوية للتشغيل وزمن لاستثمار لمحطات تبريد مختلفة.

يحسب زمن الاستثمار (استرجاع رأس المال) وفقاً للعلاقة التالية:

$$A_x = \frac{K_{inv, sol} - K_{inv, ref}}{(K_{tel} + K_{tkw})_{ref} - (K_{tel} + K_{tkw} + K_{thw})_{sol}} \quad (4-8)$$

حيث أن

$K_{inv, ref}$ استثمار رأس المال للنظام المقارن (الدائرة الاتصالية)

$K_{inv, sol}$ عند التشغيل بالعلاقة الشمسية استثمار رأس المال للنظام

الجدول (1-8) تكاليف التشغيل السنوية لمحطات تبريد مختلفة وفقا لطرق التشغيل
ونظام التزويد الحراري من اجل زمن تشغيل 2000 ساعة عمل خلال سنة

البيانات التقنية /9/	آلة تبريد امتصاصية							آلة تبريد تضاغطية
	تشغيل بواسطة الشبكة المركزية لتأمين الحرارة	تشغيل بواسطة حرق الغاز الطبيعي بشكل مباشر	تشغيل بواسطة 50% الشبكة المركزية للتأمين الحراري 50% طاقة شمسية	تشغيل بواسطة 20% الشبكة المركزية للتأمين الحراري 80% طاقة شمسية	تشغيل بواسطة 50% طاقة كهربائية شبكة شمسية	تشغيل بواسطة 20% طاقة كهربائية شبكة شمسية	تشغيل بواسطة 100% طاقة شمسية	
الاستطاعة التبريدية [kW]	40	40	40	40	40	40	40	40
استطاعة التسخين المطلوبة [kW]	60	60	60	60	60	60	60	-
مساحة تلاقط الشمس [m ²]	-	-	60	96	60	96	120	-
الاستطاعة الكهربائية المطلوبة [kW]	3	2	4	4	34	16	4	18
كمية الماء المجيد المطلوبة [m ³ /a]	508	508	508	508	508	508	508	375
كمية الماء المصروفة [m ³ /a]	126	126	126	126	126	126	126	94
تكاليف طاقة التسخين [€/a]	10.540	5.085	5.271	2.108	-	-	-	-
تكاليف الطاقة الكهربائية [€/a]	1.140	818	1.389	1.389	9.945	4.811	1.389	5.382
تكاليف الماء البارد [€/a]	1.205	1.205	1.205	1.205	1.205	1.205	1.205	954
رأس المال المستثمر [€]	47.230	28.121	89.230	114.430	89.230	114.430	131.230	27.063
العمر [year]	20	20	20	20	20	20	20	10

البيانات التفصيلية /9/	آلة تبريد امتصاصية							آلة تبريد الضغط
	تشغيل بواسطة الشبكة المركزية لتأمين الحرارة	تشغيل بواسطة حرق الغاز الطبيعي بشكل مباشر	تشغيل بواسطة 50% الشبكة المركزية للأمن الحرارة 50% طاقة شمسية	تشغيل بواسطة 20% الشبكة المركزية للأمن الحرارة 80% طاقة شمسية	تشغيل بواسطة 40% طاقة كوبريتية % طاقة شمسية	تشغيل بواسطة 20% طاقة كوبريتية 80% طاقة شمسية	تشغيل بواسطة 100% طاقة شمسية	
التكاليف السنوية لرأس المال [€/a]	4.118	2.452	7.779	9.976	7.779	9.976	11.441	3.676
تكاليف الصيانة السنوية [€/a]	472	562	892	1.144	892	1.144	1.312	541
تكاليف التشغيل السنوية [€/a]	17.475	10.122	15.331	15.822	19.821	17.136	15.347	10.553
زمن استرجاع رأس المال [Jahre] Az	-	-	غير ممکن	53,5	غير ممکن	273,0	27,9	-

بيانات الجدول من بحث /3/

4.8 أمثلة تطبيقية:

مثال 1:

دورة امتصاصية تستخدم $H_2O/LiBr$ باستطاعة تبريدية 100 kW:

كمية الحرارة المعطاة للمولد $\dot{Q}_H = 132,6 \text{ kW}$

الإنتالبي في المولد 2681 kJ/kg وبعد المكثف 188,4 kJ/kg

الإنتالبي بعد المبخر 2510 kJ/kg

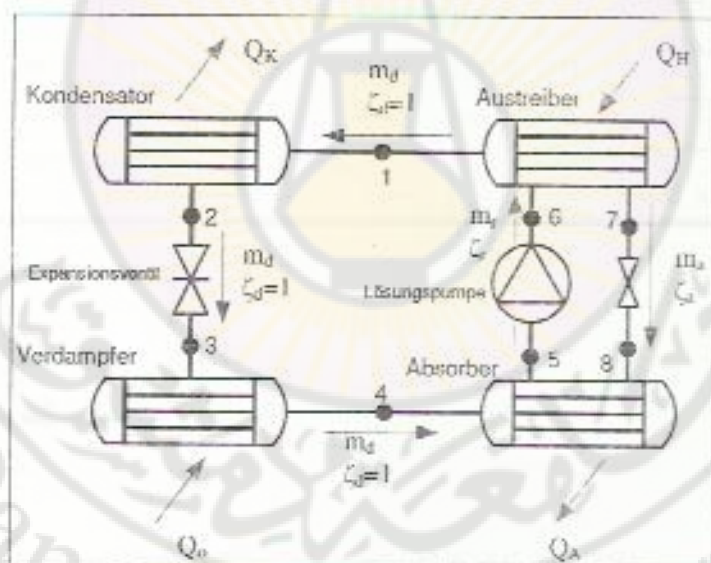
يتم تسخين المياه بالمكثف، ودرجة حرارة خروج الماء 45°C

المطلوب:

1. مثل الدارة (ارسم مخطط توضيحي للدارة)
2. حدد معامل أداء الدارة كالة تبريد
3. استطاعة المكثف
4. كمية الحرارة المتبردة في وعاء الامتصاص
5. درجة حرارة دخول الماء إلى المكثف إذا كان تدفق الماء $\dot{m}_w = 25 \text{ m}^3/\text{h}$

الحل:

1.



2.

$$\varepsilon_0 = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_{11}}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_0 = \frac{100}{132,6} = 0,75$$

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_d \cdot (h_1 - h_2)$$

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}_d \cdot (h_4 - h_3)$$

$$\Rightarrow 100 \text{ kW} = \dot{m}_d \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (2510 - 188,4) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow \dot{m}_d = 0,043 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_K = 0,043 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (2681 - 188,4) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow \dot{Q}_K = 107,18 \text{ kW}$$

4. من الموازنة الحرارية لكمية الحرارة المطروحة في وعاء الامتصاص

$$\dot{Q}_K + \dot{Q}_A = \dot{Q}_0 + \dot{Q}_H$$

$$107,18 + \dot{Q}_A = 100 + 132,6$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_A = 125,42 \text{ kW}$$

5. درجة حرارة دخول الماء

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_w \cdot c_{pw} \cdot (t_{w2} - t_{w1})$$

السعة الحرارية للماء $c_{pw} = 4,186 \text{ kJ/KgK}$

$$107,18 \text{ kW} = 25 \frac{10^3}{3600} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (45^\circ\text{C} - t_{w1})$$

$$\Rightarrow t_{w1} = 41,32^\circ\text{C}$$

مثال 2:

آلة تبريد امتصاصية تستخدم بدارة تكثيف، تعمل على إنتاج ماء بارد $t_{0,w} = 7^\circ\text{C}$ يوجد لدينا ماء بدرجة حرارة $t_{k,w} = 30^\circ\text{C}$ وماء بدرجة حرارة $t_{k,w} = 95^\circ\text{C}$ مع العلم بأن جميع عمليات التبادل الحراري تتم بفارق في درجة حرارة مقداره $\Delta t_{\min} = 5^\circ\text{C}$.

احسب:

1. حدد درجة حرارة التبخير - درجة حرارة المولد - درجة حرارة المكثف - درجة حرارة وعاء الامتصاص.
2. مثل الدارة على مخطط $\log p, 1/T$.
3. حدد كمية وسيط التبريد وكمية المحلول في الدارة من أجل $\dot{Q}_0 = 100 \text{ kW}$.
4. حدد الفرق (فرق التركيز في الدارة x_1, x_2, x_3) (Δx) .

الحل:

1. درجات الحرارة:

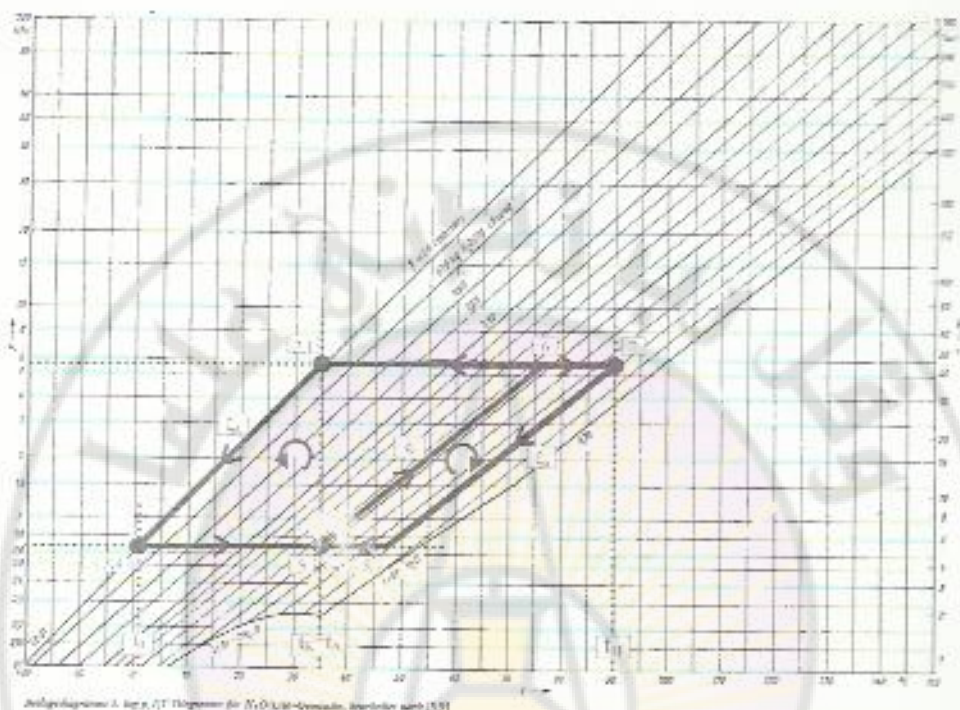
$$t_k = t_{k,w} + \Delta t_{\min} = 30 + 5 = 35^\circ\text{C}$$

$$t_A = t_{k,w} + \Delta t_{\min} = 30 + 5 = 35^\circ\text{C}$$

$$t_H = t_{k,w} - \Delta t_{\min} = 95 - 5 = 90^\circ\text{C}$$

$$t_0 = 7^\circ\text{C} - \Delta t_{\min} = 7 - 5 = 2^\circ\text{C}$$

2. تمثيل الدارة



3.

من خلال تقاطع ضغط البخار ودرجة حرارة وعاء الامتصاص يمكن قراءة

$$P_a \text{ \& } t_a \rightarrow \xi_r = 0,41 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg sol}}$$

$$P_k \text{ \& } t_{11} \Rightarrow \xi_s = 0,34 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg sol}}$$

من أجل تحديد الكميات يجب كتابة الموازنة الحرارية لوعاء الامتصاص أو المولد

موازنة كمية وسيط التبريد:

$$\xi_r \cdot \dot{m}_r = \xi_s \cdot \dot{m}_s + 1 \cdot \dot{m}_d \quad \text{موازنة البارد}$$

$$\dot{m}_r = \dot{m}_s + \dot{m}_d \quad \text{موازنة للكمية الكلية}$$

نعطي $\dot{m}_d$ من انتالي المبخر (تبخر الماء) $r(t_s) = 2485,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ ولكن

$$\dot{m}_d = \frac{\dot{Q}_d}{r(t_s)} = \frac{100 \text{ kW}}{2485,8 \text{ kJ/kg}} = 0,04 \text{ kg/s} \quad \text{يؤدي} \quad \dot{Q}_d = \dot{m}_d \cdot \Delta h = \dot{m}_d \cdot r(t_s)$$

ومن موازنة الكتلة ودمج العلاقات

$$\dot{m}_r = \frac{1 - \xi_s}{\xi_r - \xi_s} \dot{m}_d = \frac{1 - 0,34}{0,41 - 0,31} \cdot 0,04 = 0,264 \text{ kg/s}$$

وكذلك

$$\dot{m}_a = \dot{m}_r - \dot{m}_d = 0,264 - 0,04 = 0,224 \text{ kg/s}$$

4. تحديد الفرق:

$$\Delta \xi = \xi_r - \xi_s = 0,264 - 0,224$$

$$\rightarrow \Delta \xi = 0,04$$

مثال 3:

آلة تبريد امتصاصية تعمل على $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ ذات المواصفات التالية:

$$\dot{m}_s = 0,75 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- المحلول الفقير

$$\dot{m}_r = 0,85 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- المحلول الغني

$$\Delta \xi = 0,08$$

- فرق التركيز

$$t_{\text{th}} = 5^\circ \text{C}$$

- درجة حرارة التبخير

$$P_K = 8 \text{ kPa}$$

- ضغط المكثف

$$\dot{Q}_{\text{th}} = 350 \text{ kW}$$

- استطاعة التسخين اللازم للمولد

المطلوب:

1. مثل نقاط الدارة على المخطط $\log p - T$ ثم أوجد درجات حرارة جميع النقاط من t_1

وحتى t_8 .

2. أحسب معامل أداء الدارة.

الحل:

1.

$$\xi_r \cdot \dot{m}_r = \xi_a \cdot \dot{m}_a + 1 \cdot \dot{m}_d$$

$$\dot{m}_r = \dot{m}_a + \dot{m}_d$$

$$0,85 = 0,75 + \dot{m}_d \Rightarrow \dot{m}_d = 0,1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow \xi_r \cdot 0,85 = 0,1 + \xi_a \cdot 0,75 \quad \dots \quad (1)$$

ولكن

$$\Delta \xi = \xi_r - \xi_a$$

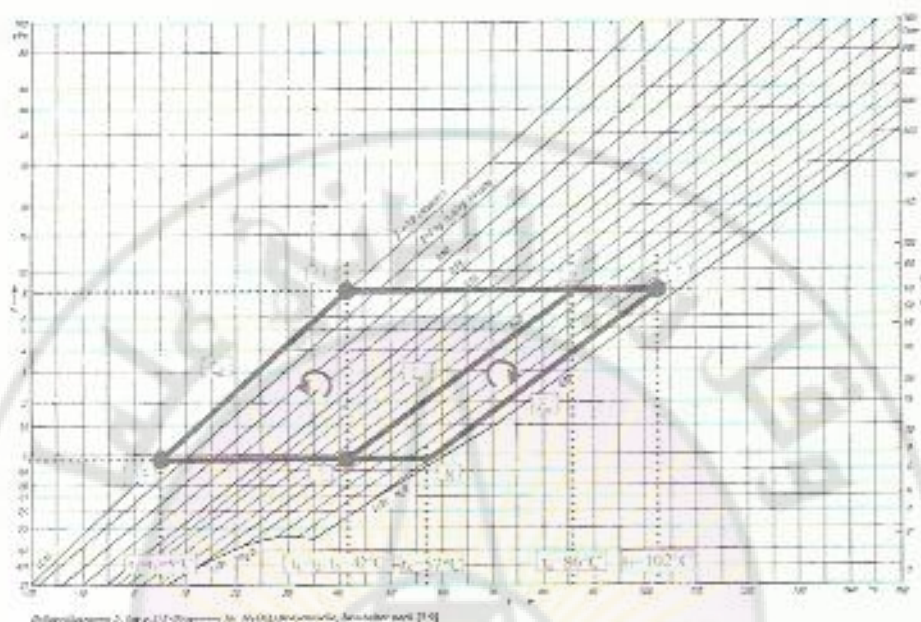
$$\Rightarrow 0,08 = \xi_r - \xi_a \Rightarrow \xi_r = 0,08 + \xi_a \quad \dots \quad (2)$$

$$(2) \text{ in } (1) \rightarrow$$

$$\Rightarrow \xi_a = 0,32 \quad (0,08 + \xi_a) \cdot 0,85 = 0,1 + 0,75 \cdot \xi_a$$

$$\Rightarrow \xi_r = 0,08 + 0,32 \Rightarrow \xi_r = 0,40$$

ومن المخطط:



$$t_1 = t_2 = 42^\circ\text{C}$$

$$t_3 = t_4 = 5^\circ\text{C}$$

$$t_5 = 42^\circ\text{C}$$

$$t_6 = 86^\circ\text{C}$$

$$t_7 = 102^\circ\text{C}$$

$$t_8 = 57^\circ\text{C}$$

2. معامل الأداء

$$\varepsilon_0 = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H}$$

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}_a \cdot r_0$$

من معادلة استطاعة التبريد

وبما أن: $t_0 = 5^\circ\text{C}$

$$r_0 = \Delta h_v = 2488,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_o = 0,1 \cdot 2488,7 \Rightarrow \dot{Q}_o = 248,87 \text{ kW}$$

$$\varepsilon_o = \frac{248,87}{350} \Rightarrow \varepsilon_o = 0,71$$

مثال 4:

دائرة تبريد امتصاصية تعمل على $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ بضغط تبخر $P_0 = 0,8 \text{ kPa}$ وضغط تكثف $P_K = 6 \text{ kPa}$ ومعامل أداء تبريدي $\varepsilon_{th} = 0,65$ واستطاعة تبريدية $\dot{Q}_o = 82,3 \text{ kW}$ واستطاعة تكثف $\dot{Q}_K = 95 \text{ kW}$ وكمية المحلول القوي

$$\dot{m}_a = 0,22 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{ بتركيز } x_a = 0,32 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg sol}} \text{ والمطلوب:}$$

1. مثل الدارة على مخطط $\log p, 1/T$ وحدد (t_a, t_{th}, t_k, t_o) .
2. أحسب كمية الحرارة المطروحة من وعاء الامتصاص.
3. يتم تسخين المياه بالمكثف فتدخل بدرجة حرارة $t_{w1} = 10^\circ\text{C}$ وتخرج بـ $t_{w2} = 16^\circ\text{C}$ يطلب ما يلي:

أ. فرق درجة الحرارة الوسطى اللوغاريتمي.

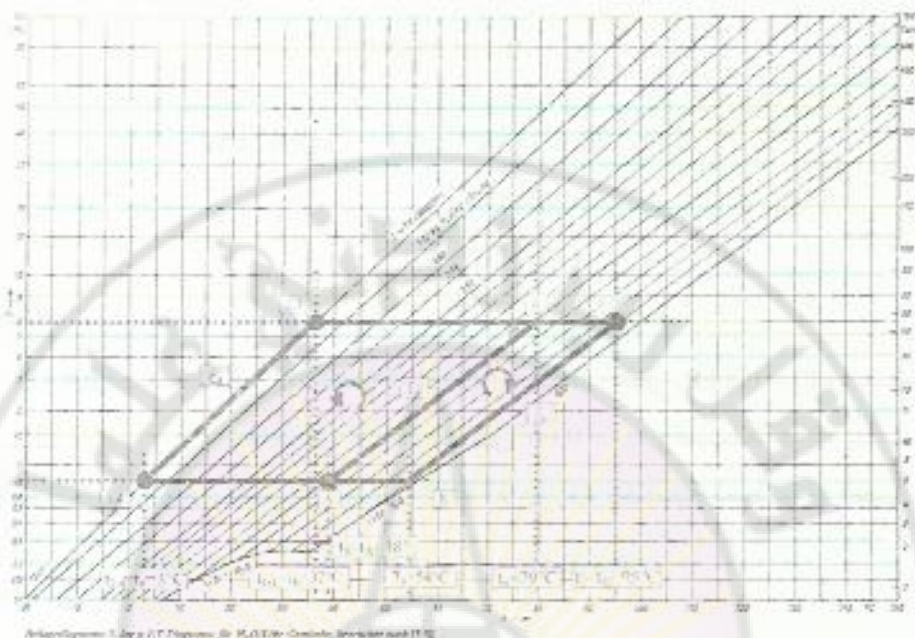
ب. كمية تدفق المياه

ت. مساحة سطح التبادل الحراري إذا كان $k = 650 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

ث. طول الأنابيب إذا كان عدد الأنابيب $N_K = 58$ وقطر الأنبوب $d_K = 20 \text{ mm}$

الحل:

$$1. \text{ استطاعة التبريدية ولكن } t_o = 3^\circ\text{C} < t_0 = 3^\circ\text{C} \Rightarrow r_0 = \Delta h_v = 2493,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



$$82,3 \text{ kW} = \dot{m}_d \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2493,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m}_d = 0,033 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \leftarrow$$

نكتب كميات التدفقات لوسيط التبريد والمحلول الغني والفقير

$$\dot{m}_r = \dot{m}_a + \dot{m}_d$$

$$\dot{m}_r = 0,22 + 0,033 \Rightarrow \dot{m}_r = 0,253 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

ومن موازنة وسيط التبريد

$$\Rightarrow \xi_r \cdot \dot{m}_r = \xi_a \cdot \dot{m}_a + 1 \cdot \dot{m}_d \Rightarrow \xi_r \cdot 0,253 = 0,32 \cdot 0,22 + 1 \cdot 0,033 \Rightarrow \xi_r = 0,4 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{Insung}}}$$

تحديد درجات الحرارة. من المخطط بعد تحديد $P_o, P_c, \xi_r, \xi_d, \xi_a$

$$t_2 = t_1 = t_3 = 37^\circ \text{C} \quad \leftarrow \xi_d = 1 \text{ مع } P_c$$

$$t_6 = t_3 = t_4 = 3^\circ \text{C} \quad \leftarrow \xi_d = 1 \text{ مع } P_o$$

$$t_8 = 79^\circ \text{C} \quad \leftarrow \xi_r \text{ مع } P_c$$

$$t_5 = t_6 = 38^\circ \text{C} \quad \leftarrow \xi_r \text{ مع } P_o$$

$$t_7 = t_{II} = 95^\circ \text{C} \quad \leftarrow \xi_a \text{ مع } P_c$$

$$t_8 = 54^\circ \text{C} \quad \leftarrow \xi_a \text{ مع } P_o$$

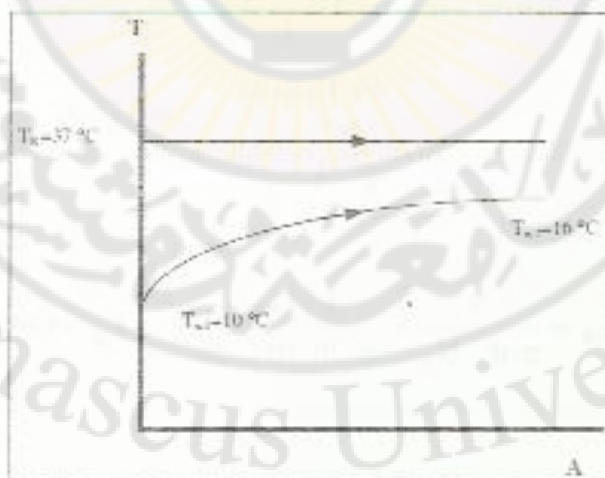
2. تحسب كمية الحرارة Q_A من الموازنة الحرارية

$$\dot{Q}_K + \dot{Q}_A = \dot{Q}_H + \dot{Q}_H$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} \Rightarrow 0,65 = \frac{82,3}{\dot{Q}_H} \Rightarrow \dot{Q}_H = 126,6 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_A + 95 = 82,3 + 126,6 \Rightarrow \dot{Q}_A = 113,9 \text{ kW}$$

3.



$$\leftarrow \Delta t_L = 37 - 10 = 27, \Delta t_s = 37 - 16 = 21$$

أ. درجة الحرارة الوسطية اللوغاريتمية

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{gr} - \Delta T_{kl}}{\ln \frac{\Delta T_{gr}}{\Delta T_{kl}}}$$

$$\Delta T_{gr} = 37 - 10 = 27 \text{ K}$$

$$\Delta T_{kl} = 37 - 16 = 21 \text{ K}$$

$$\Rightarrow \Delta T_m = \frac{(27 - 21)}{\ln \left(\frac{27}{21} \right)} \Rightarrow \Delta T_m = 23,87 \text{ K}$$

ب. حساب كمية المياه

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_w \cdot c_{pw} \cdot (T_{w2} - T_{w1})$$

$$95 \text{ kW} = \dot{m}_w \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (16 - 10) \text{ K} \Rightarrow \dot{m}_w = 3,78 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

ت. حساب مساحة سطح التبادل

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_m$$

$$\Rightarrow A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta T_m}$$

$$\Rightarrow A = \frac{95 \cdot 1000 \text{ W}}{650 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 23,87 \text{ K}} = 6,12 \text{ m}^2$$

ث. طول الأنابيب:

$$L_R = \frac{A}{\pi \cdot d_p \cdot N_R} = \frac{6,12 \text{ m}^2}{\pi \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 58} \Rightarrow L_R = 1,68 \text{ m}$$

المراجع المستخدمة

- 1- مصطفى السيد - فتاحي - درويش - هندسة التبريد وتكييف الهواء - جامعة الملك عبد العزيز 1988.
- 2- أساسيات تقنية التبريد والتكييف - المؤسسة العامة للتعليم الفني وتطوير المناهج - المملكة العربية السعودية - 2006.
- 3- جورج - ناعمة - قاسم - صايغ - مصري - عجبب: الطاقة الشمسية وتطبيقاتها - جامعة البعث - 2009.
- 4- Finitz Richats/ Kurt Michler; Wärme pumpenalagen für die Raumheizung, Auslegung-Energieblanz-Wirtschaftlichkeit. VDI-Verlag GmbH-Düsseldorf 1982.
- 5- Hans hudlurig Von cube and Fritz steink; Heat pump technology.
- 6- Richard Nicholls; Heat Pump Ventilation and air coditionig-Third Edition Academic year 2004-2005.
- 7- Frank Kreith-Mechanical Engineering third book - Crenet BASE 1999.
- 8- Heinrich; G. Najork and Nestler; Wärme pumpenan wen dung in industrie, Land wirts chaft, Gesellschaft und Wohnungs bau VEB Verlag Technik Berlin-1982.
- 9- Salman Ajib; Wärme punpen anwendung; Tu-Ilmenou-Lehrveranstaltung; Wä wame pump/ Kältemaschine 2006.
- 10- Heinz Jungnickel; Rainer Agsten; Wolf Eberhard Kraus: Grundlagen der Kältetechnik, Berlin; Verl. Technik, 1985.
- 11- Salman Ajib; Beiträge zur Entwicklung und Auslegung Solar themisch betriebener Absorption Skältemaschiren zur Kälteerzeugung und Raumklimatisierung zusammenfassung von wissenschaftlicheu Veröffentlichungen 2005.
- 12- Recknagel, Sprenger Schramck; Taschenbuch für heizung - klimatechnik 2004.

- 13- Lehrbuch der Kältetechnik - H. L. Von Cube - Verlag C. F. Müller Karlsruhe
1971
- 14- Handbuch der Kältetechnik, Bd 6. a. Hrsg. Von Plank - Berlin, Heidelberg,
New York: Springer - Verlag 1969.
- 15- Häußler, W.: Untersuchung über der Wärmepump. Wiss. Z. Tu-Dresden,
1955/56-H 6, 5, 1059-1078.
- 16- ASHRAE, Applied Heatpump and Heat Recovery System. Chapter 8 - System
and Equipment 2008.

جامعة دمشق
Damascus University

الملحق A

A.1 الرموز والوحدات الدولية:

الوحدات الأساسية الدولية			
-1	درجة الحرارة	t	C درجة مئوية
-2	الطول	l	m متر
-3	الزمن	τ	S أو sec ثانية
-4	الكتلة	m	Kg كيلو غرام
-5	شدة التيار	A	A أمبير
-6	الكتلة المولية	M	mol مول
-7	شدة الإضاءة	E	I.x لوكس

A.2 مضاعفات الوحدات الدولية:

المضاعفات		
الرمز	الدليل	العامل
da	Deka ديكا	10
h	Hekto هيكتو	10^2
k	Kilo كيلو	10^3
M	Mega ميغا	10^6
G	Giga غيغا	10^9
T	Tera تيرا	10^{12}
P	Peta بيتا	10^{15}
E	Exa اكسا	10^{18}

٨.3 أجزاء الوحدات الدولية:

الأجزاء		
الرمز	الدليل	العامل
d	دسي Dece	10^{-1}
c	سنطي Centi	10^{-2}
m	ميلي Milli	10^{-3}
μ	ميكرو Mikro	10^{-6}
n	نانو Nano	10^{-9}
p	بيكو Piko	10^{-12}
f	فيمتو Femto	10^{-15}
a	أتو Atto	10^{-18}

A.4 جدول الواحدات والرموز الدولية في مجال الهندسة الحرارية:

التعبير	الرمز	الواحدة	التحويلات إلى الواحدات الدولية
العمل	W	J	$J = N.m = W.s = 1/3600Wh$ $= 1/3600.1/8760Wa$ (جول) $1kcal = 4.16Wh$ $1BTU = 29.3Wh$ $1Wh = 3.6kJ$
العمل النوعي	w	J/kg	
القوة	F	N	$N = 1mkg/s^2$
كمية الحرارة	Q	J	$J = N.m = W.s$
كمية الحرارة النوعية	q	J/kg	
الاستطاعة	P	W	$1PS = 0.7355 kW$
شدة الإشعاع	E	W/m^2	W/cm^2 (شدة الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي = الثابت الشمسي وهو $E_s = 1353 W/m^2$)
الطاقة	W, E	J	$J = N.m = W.s$
السبالة الحرارية	$\dot{Q}$	W	$W = J/s = N.m/s$
السبالة الحرارية النوعية	$\dot{q}$	W/m^2	kW/m^2 كما تستخدم
عامل الحمل الحراري	α, h	$W/m^2.K$	
عامل انتقال الحرارة	k	$W/m.K$	
الايصالية الحرارية	λ	$W/m.K$	
مقاومة انتقال الحرارة	R	$m^2 K/W$	
السعة الحرارية	C	J/kg	
السعة الحرارية النوعية	c	$J/kg.K$	

التحويلات إلى الواحدات الدولية	الواحدة	الرمز	التعبير
	J/kg	r	طاقة التبخر
$1kcal/kg = 4,1868 kJ/kg$	J/kg	H_o, H_v	القيمة الحرارية
	J/K	S	الانثروبي
	$J/kg.K$	s	الانثروبي النوعي
	J	H	الانتالبي
	J/kg	h	الانتالبي النوعي
	J/kg	s	طاقة الذوبان
	g/kg	x, ψ	الرطوبة المطلقة
	%	φ	الرطوبة النسبية
	m^3/s	V	التدفق الحجمي
	kg/s	m	التدفق الكتلي
	kg/m	ρ	الكثافة
$cm, mm, \mu m$ ومضاعفات المتر	m	s, d, δ	السمكة
الأجزاء والمضاعفات أيضا	m	h	الارتفاع والعمق
الأجزاء والمضاعفات أيضا	m	L, ℓ	الطول
الأجزاء والمضاعفات أيضا	m	D, d	القطر
الأجزاء والمضاعفات أيضا	m	R, r	نصف القطر
الأجزاء والمضاعفات أيضا	m	U, u	المحيط
$1ha = 10^4 m^2$ $1km^2 = 10^6 m^2$	m^2	s, A	المساحة
	m^3	V	الحجم
	m^3/kg	v	الحجم النوعي

التحويلات إلى الوحدات الدولية	الواحدة	الرمز	التعبير
$km / h = kn$ $1 km / h = 0,2778 m / s$ $1 kn = 0,5144 m / s$	m / s	$v, u,$ w, c	السرعة
a دقة h ساعة	s ثانية	τ	الزمن
$1 lm/cm^2 = 10^4 Lx$ $1 Lx = 1 lm/m^2$	Lx	L	شدة الإضاءة
$km, \mu m, mm$	m	λ	طول الموجة
	$\%$	η	المردود
درجة	rad	δ	الزاوية
$1 torr = 1 mmHg = 133,3 Pa$ $1 mmHg = 9,8066 Pa$ $1 bar = 0,1 MPa = 10^5 Pa$ $1 atm = 101325 Pa = 1,01325 bar$ $1 at = 98,066 kPa = 0,98066 bar$	$Pa = Nm^2$	p	الضغط
انظر الضغط	Pa	Δp	فرق الضغط
$t(^{\circ}C) - T(K) - 273,15$	$K, ^{\circ}C$	θ, t	درجة الحرارة
عند تحديد فرق درجة الحرارة $^{\circ}C = K$ فان	$K, ^{\circ}C$	Δt	فرق درجة الحرارة

A.5 التحويلات والوحدات المكافئة:

المتغير	الوحدات	التحويلات والوحدات المكافئة
القوة	نيوتن	$N = Pa \cdot m^2 = J / m = W \cdot s / m = m \cdot kg \cdot s^{-2}$
الضغط	باسكال	$Pa = N / m^2 = J / m^3 = W \cdot s / m^3 = kg \cdot (m \cdot s^{-2})$
اللزوجة المظلمة	نيوتن. متر	$N \cdot m = J = W \cdot s = Pa \cdot m^3 = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
اللزوجة الديناميكية μ	باسكال. ثانية	$Pa \cdot s = N \cdot s / m^2 = J \cdot s / m^3 = W \cdot s^2 / m^3 = kg \cdot (m \cdot s^{-1})$
اللزوجة الحركية ν	متر مربع للثانية	$m^2 / s = Pa \cdot s \cdot m^2 / kg = N \cdot s \cdot m^2 / kg = W \cdot s^2 / kg = J \cdot s / kg$
عمل - طاقة	جول	$J = N \cdot m = W \cdot s = Pa \cdot m^3 = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
الاستطاعة - المسيلة الحركية	واط	$W = J / s = N \cdot m / s = Pa \cdot m^3 / s = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
المسعة الحرارية - الانتروبي	جول/كلفن	$J / K = N \cdot m / K = W \cdot s / K = Pa \cdot m^3 / K = m^2 \cdot kg \cdot (s^{-2} \cdot K)$
المسعة الحرارية الانتروبية الانتروبي	جول/كيلوغرام. كلفن	$J / (kg \cdot K) = N \cdot m / (kg \cdot K) = W \cdot s / (kg \cdot K) = Pa \cdot m^3 / (kg \cdot K) = m^2 \cdot kg \cdot (s^{-2} \cdot K)$
شدة السبالة الحرارية الانتروبية	واط. متر مربع	$W / m^2 = J / (m^2 \cdot s) = N \cdot s / m^2 = Pa \cdot m^3 / s = kg \cdot (s^{-3} \cdot K)$
الإحصائية الحرارية	واط. متر. كلفن	$W \cdot (m \cdot K) = J / m \cdot s \cdot K = N \cdot (s \cdot K) = Pa \cdot m^3 \cdot (s \cdot K) = m \cdot kg \cdot (s^{-2} \cdot K)$
عامل انتقال الحرارة - عامل العمل الحراري	واط. متر. كلفن	$W \cdot (m^2 \cdot K) = J \cdot (m^2 \cdot s \cdot K) = N \cdot (m \cdot s \cdot K) = Pa \cdot m^3 \cdot (s \cdot K) = kg \cdot (s^{-3} \cdot K)$

الملحق B

الخواص الفيزيائية للماء (DIN V 4757-4 , ISO 9806 -11)

C.1 كثافة الماء (عند 1 bar) بوحدة kg / m^3 :

$$\rho(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4$$

مجال تطبيق العلاقة ($0 \leq t \leq 99,5 \text{ } ^\circ\text{C}$)

الثوابت:

$$a_0 = 999,85$$

$$a_1 = 6,187 \cdot 10^{-2}$$

$$a_2 = -7,654 \cdot 10^{-3}$$

$$a_3 = 3,974 \cdot 10^{-5}$$

$$a_4 = -1,110 \cdot 10^{-7}$$

تغطي المعادلة مع الثوابت قيماً تحوي انحرافاً في النتائج أقل مما هو موجود في الجدول
0,02%

C.2 السعة الحرارية النوعية للماء (عند 1 bar) بوحدة $(\text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K}))$

$$c_p(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$$

مجال تطبيق العلاقة ($0 \leq t \leq 99,5 \text{ } ^\circ\text{C}$)

حيث الثوابت:

$$a_0 = 4,217$$

$$a_1 = -3,358 \cdot 10^{-3}$$

$$a_2 = 1,089 \cdot 10^{-4}$$

$$a_3 = -1,675 \cdot 10^{-6}$$

$$a_4 = 1,309 \cdot 10^{-8}$$

$$a_5 = -3,884 \cdot 10^{-11}$$

تغطي المعادلة مع الثوابت قيماً تحوي انحرافاً في النتائج أقل مما هو موجود في
الجدول 0,02%.

المصطلحات العلمية

A

Absolute	مطلق
Absolute humidity	الرطوبة المطلقة
Absolute pressure	المضغوط المطلق
Absolute temperature	درجة الحرارة المطلقة
Absorber	ماص
Absorption	امتصاص
Absorption Refrigeration	التبريد بالامتصاص
Actual	فعلي
Actual capacity	استطاعة فعلية
Actual cycle	دائرة فعلية
Adiabatic	الكظيم
Adiabatic compression	الانضغاط الكظيم - الأديباتي
Adiabatic expansion	التمدد الكظيم - الأديباتي
Air	الهواء
Air compressor	ضاغط هواء
Air flow	تدفق الهواء
Air conditioning	تكييف الهواء
Air composition	تركيب الهواء
Air dry	الهواء الجاف
Air sensible heat	الحرارة المحسوسة للهواء
Air circulation	تدوير الهواء
Air change load	حمل تغيير الهواء
Air changes in refrigerated space	عدد مرات تغيير الهواء في الحيز المبرد
Air conditioning	تكييف الهواء

Air conditioning systems	أنظمة تكييف الهواء
Air cooled condensers	المكثفات المبردة بالهواء
Air cooling coil	وشية تيزيد الهواء
Ammonia	الامونياك
Antifreeze solution	المحاليل المضادة للتجمد
Atmosphere	الجوي
Approach	الاقتراب
Automatic expansion valve	صمام التمدد الآلي

B

Bar	بار "وحدة قياس الضغط"
Barometric pressure	الضغط الجوي
Booster compressors	الضواغط التوليفية
Brake horse power	الاستطاعة المكبحية
Brine cooling	التيزيد بالمطول الملحي
Brines	محاليل الملح
British thermal unit - BTU	الوحدة الحرارية البريطانية
Butane	البوتان
BY-pass	التمرير
By-pass hot gas	تمرير الغاز الساخن

C

Central air conditioning	تكييف الهواء المركزي
Centrifugal compressors	الضواغط النابضية
Capacity	السعة
Capacity evaporator	استطاعة المبخر
Capacity expansion valve	سعة صمام التمدد
Capacity system	سعة النظام
Capacity control	التحكم بالاستطاعة

Capillary tube	الأنبوب الشعري
Carbon dioxide	ثاني أكسيد الكربون
Carnot cycle	دائرة كارنو
Cascade systems	الأنظمة على شكل شلال
Centrifugal	نايذ
Clearance	الخلوص
Clearance factor	عامل الخلوص
Clearance gas	غاز الخلوص
Chillers	المبردات
Chillers oil	ميرد الزيت
Chillers water	ميرد الماء
Coefficient	عامل
Coefficient of heat transfer	عامل انتقال الحرارة
Coefficient of performance – COP	معامل الأداء
Coils	ملفات (وشيعه)
Coils bare tube	وشيعه الأنابيب العارية – الملمساء
Coils Finned	وشيعه الأنابيب المزعقة – ذات الريش
Coils flooded	الوشيعه المغمورة
Coils forced convection	وشيعه الحمل الحراري القسري
Coils natural convection	وشيعه الحمل الحراري الطبيعي
Comfort air conditioning	تكييف الهواء للراحة
Compression	الانضغاط
Compressor	المضاغط
Compressor bore	قطر الأسطوانة
Compressor centrifugal	المضاغط النايذة
Compressor classification	تصنيف المضاغط
Compressor Compression efficiency	مردود الانضغاط للمضاغط

Compressor crankshaft	الجدع المعقوف للضاغط
Compressor cylinder arrangement	ترتيب الاسطوانات في الضاغط
Compressor discharge	تصريف الضاغط
Compressor function	عمل الضاغط
Compressor hermetic	الضاغط محكمة الإغلاق - المغلفة
Compressor horizontal double action	الضاغط الأفقية ثنائية التأثير
Compressor horsepower	استطاعة الضاغط
Compressor impellers	ذو اليب الضاغط
Compressor lubrication	تزييت الضاغط
Compressor mechanical efficiency	المردود الميكانيكي للضاغط
Compressor oil check valve	صمام فحص الزيت للضاغط
Compressor piston displacement	إزاحة مكبس الضاغط
Compressor pistons	مكبس الضاغط
Compressor pumping limit	حد الضخ
Compressor reciprocal	الضاغط الترددية
Compressor rotary	الضاغط الدوارة
Compressor r selection	اختيار الضواغط
Compressor single acting vertical	الضاغط الشاقولية ذات الفعل الوحيد
Compressor Speed	سرعة الضاغط أنواع الضواغط
Compressor types	أنواع الضواغط
Compressor volumetric efficiency	المردود الحجمي للضاغط
Condenser	المكثف
Condenser air cooled	المكثف المبرد بالهواء
Condenser capacity	استطاعة المكثف
Condenser capacity control	التحكم باستطاعة المكثف
Condenser chassis mounted	مكثف مركب على هيكل
Condenser forced air	مكثف بالهواء القسري

Condenser function	عمل المكثف
Condenser Location	اختيار موقع المكثف
Condenser rating and selection	تقدير المكثف واختياره
Condenser water cooled	المكثف المبرد بالماء
Condenser evaporative	المكثف التبخيري
Condensation of vapors	تكاثف الأبخرة
Condensing pressure	ضغط التكثيف
Condensing temperature	درجة حرارة التكثيف
Condensing units	وحدات التكثيف
Conduction	التوصيل الحراري
Conductivity	قابلية التوصيل الحراري
Convection	الحمل الحراري
Convection forced	الحمل الحراري القمري
Convection natural	الحمل الحراري الحر
Coolers	المبردات
Cooling coils	ملفات التبريد
Corrosion	التآكل
Crankcase heaters	مسخانات غلبة الجذع المعطوف
Critical pressure	الضغط الحرج
Cycle	دائرة
Cycle compression	دائرة الانضغاط
Cycle diagram	مخطط الدائرة
Cycle reverse	الدائرة المعكوسة
Cycle simple saturated	الدائرة البسيطة المشبعة
Cycle sub cooled	دائرة التبريد التحتي

D

Data	معلومات
Defrosting	إزالة الجليد
Defrosting electric	إزالة الجليد كهربائياً
Defrosting hot gas	إزالة الجليد بالغاز الساخن
Defrosting reverse cycle	إزالة الجليد بقلب الدارة
Defrosting timers	مؤقتات إزالة الجليد
Dehydration	تجفيف (تجفيف)
Dehydration of refrigerants	تجفيف وسائط التبريد
Density	الكثافة
Desiccates	مجففات
Dew point temperature	درجة حرارة نقطة الندى
Dilution	تمديد
Dehydration oil by refrigerant	تمديد الزيت بوساطة وسيط التبريد
Discharge	تصريف
Discharge valve	صمام التصريف
Discharge line	خط التصريف
Domestic	منزلي
Double pipe	أنبوب مزدوج
Double pipe condensers	المكثفات ذات الأنابيب المزدوج
Double pipe evaporators	المبخرات ذات الأنابيب المزدوج
Drier - Dryer	مجفف
Dry expansion evaporator	مبخر جاف
Drier refrigerant	مجفف وسيط التبريد
Drift	حمل القطرات
Drift water loss by drift	ضیاعات الماء بحمل القطرات
Dry bulb temperature	درجة الحرارة بالترموستات الجاف
Dry ice	الجليد الجاف

Duct	مجرى (هواء)
Duct systems	منظومة مجاري الهواء

E

Effective	فعال
Efficiency	المردود
Efficiency of compression	مردود الانضغاط
Efficiency of system	مردود الجملة
Energy	الطاقة
Enthalpy	الانتالبي
Entropy	الانتروبي
Equal-friction method	طريقة الاحتكاك المتساوي
Equalizer crankcase oil	معدل زيت صندوق الكرنك
Equivalent	مكافئ
Eutectic solution	المحاليل الاوتكتية
Evaporation	التبخير
Evaporative condensers	المكثفات التبخيرية
Evaporators	المبخرات
Evaporators plate type	المبخرات الصفائحية
Evaporators finned	المبخرات ذات الشفرات
Evaporators selection	اختيار المبخرات
Evaporators shell and coil type	المبخرات ذات الغلاف والملف
Shell and tube type	المبخرات ذات الغلاف وحزمة الأنابيب
Evaporators spray type	المبخرات ذات الرش
Expansion valve	صمام التمدد
Expansion valve automatic	صمام التمدد الآلي
Expansion valve thermostatic	صمام التمدد الترموستاتيكي
Exponent	قوة، أس

P	
Fahrenheit	درجة حرارة فهرنهايت
Fan	مروحة
Feather valve	صمام ريشة
Fins	زعانف (ريش)
Flammability of refrigerants	قابلية التهاب وسيط التبريد
Flash inter cooler	مبرد متوسط بالتقوير
Float	فواشة
Float expansion valves	صمام تمدد فواشة
Float Switch	قاطعة
Foam	رغوة
Freezing	التجميد
Friction	الاحتكاك
Frost	الجليد
Frost acclamation on coils	تجميع الجليد على الملفات
Fusion	الانصهار
Fusion latent heat	الحرارة الكامنة للانصهار
Fusion temperature	درجة حرارة الانصهار
G	
Gas	غاز
Generator	مولد
H	
Halogens	الهالوجينات
Hand expansion valve	صمام تمدد يدوي
Head	ارتفاع - رأسي
Head friction	ارتفاع التحاك
Head pumping	ارتفاع الضخ

Head static	الارتفاع الستاتيكي
Head total	الارتفاع الكلي
Heat	الحرارة
Heat latent	الحرارة الكامنة
Heat compression	حرارة الانضغاط
Heat measurement	قياس كمية الحرارة
Heat sensible	الحرارة المحسوسة
Heat Total	الحرارة الكلية
Heat exchangers	المبادلات الحرارية
Heat Load	الحمل الحراري
Heat air change	الحمل الحراري لتغيير الهواء
Heat equipment	الحمل الحراري للتجهيزات
Heat lights	الحمل الحراري للإضاءة
Heat motors	الحمل الحراري للمحركات
Heat occupancy	الحمل الحراري للأشخاص
Heat pumps	المضخات الحرارية
Heat product	الحمل الحرارية للمنتج
Heat solar	الحمل الحراري الشمسي
Heat transfer	انتقال الحرارة
Heaters	المسخنات
Heat wall again	الحمل الحراري المكتسب عبر الجدران
Hermetic	محكم الإغلاق
Hermetic motor compressor	ضاغط محكم الإغلاق
High pressure control	تحكم الضغط العالي
Horsepower	الاستطاعة
Horsepower brake	الاستطاعة المكبحية
Horsepower compressor	الاستطاعة المضاطعة

Horsepower indicated	الاستطاعة الدليلية
Horsepower pump	استطاعة المضخة
Horsepower theoretical	الاستطاعة النظرية
Hot gas defrosting	إزالة الصقيع بالغاز الساخن
Hot gas line	خط الغاز الساخن
Humidity	الرطوبة
Humidity ratio	نسبة للرطوبة
Hydrocarbons	الهيدروكربونات

I

Ice	الجليد
Ice latent heat	الحرارة الكامنة للجليد
Ice melting temperature	درجة حرارة الانصهار
Ice refrigeration	التبريد بالجليد
Ideal gas	الغاز المثالي
Indicator diagram	المخطط الدائلي
Industrial refrigeration	التبريد الصناعي
Infiltration	التسرب
Insulation	العزل
Intercooler	المبرد المتوسط
Internal energy	الطاقة الداخلية
Isentropic compression	الضغط الايزونتروبي
Isothermal process	عملية تحت درجة حرارة ثابتة

K

Kelvin temperature	درجة الحرارة المطلقة
Kinetic energy	الطاقة الحركية

L

Latent heat	الحرارة الكامنة
Leakage	تسرب
Liquid	السائل
Liquid chiller	مبرد السائل
Liquid intercooler	المبرد المتوسط للسائل
Liquid line	خط السائل
Liquid riser	صاعد السائل
Liquid saturated	سائل مشبع
Liquid sub cooled	سائل تبريد تحت
Liquid suction heat exchanger	مبادل حراري بين السائل وبخار السحب
Lithium-bromide absorption refrigeration	التبريد الامتصاصي باستخدام بروميد الليثيوم
Load	الحمل
Load heat	الحمل الحراري
Log mean temperature difference	فرق درجة الحرارة الوسطي اللوغاريتمي
Low pressure control	التحكم بالضغط المنخفض
Lubricants	زيوت التزييت
Lubrication methods	طرق التزييت

M

Machine	آلة
Manometer	مقياس الضغط
Mass transfer	انتقال الكتلة
Mean effective temperature difference	فرق درجات الحرارة الوسطي
Mechanical efficiency	المردود الميكانيكي
Mechanical energy	الطاقة الميكانيكية
Mechanical energy heat equivalent	المكافئ الحراري للطاقة الميكانيكية

Mercury gages	مقياس زئبقى
Methane	ميثان
Methyl chloride	كلوريد الميثيل
Microorganism in food	كلوريد الميثيلين
Moisture	الرطوبة
Moisture in air	الرطوبة في الهواء
Moisture indicator	دليل الرطوبة
Moisture in refrigerating systems	الرطوبة في أنظمة التبريد
Moisture removal from systems	نزع الرطوبة من الأنظمة
Multiple compression systems	أنظمة الضغط المتعدد
Multiple temperature systems	أنظمة درجات الحرارة المتعددة
Multistage compression	عملية الانضغاط متعددة المراحل
N	
Newton	نيوتن
Noise	ضجيج
Nusselt number	عدد نوسلت
O	
Oil	الزيت
Oil bleed line	خط نزف الزيت
Oil check valve	صمام عدم رجوع الزيت
Oil chemical stability	الاستقرار الكيميائي للزيت
Oil chiller	مبرد الزيت
Oil cloud point	نقطة التثيد للزيت
Oil dielectric strength	متانة العزل الكهربائي للزيت
Oil dilution by refrigerant	تمديد الزيت بوسيط التبريد
Oil film	غشاء (فلم) الزيت

Oil foaming	ترغية الزيت
Oil floc point	نقطة التبعثر
Oil miscibility with refrigerant	امتزاج الزيت مع وسيط التبريد
Oil pour point	نقطة الانصباب
Oil pressure	ضغط الزيت
Oil separator	فاصل الزيت
Oil viscosity	لزوجة الزيت
Optimization	الأمثلة
Over all coefficient of heat transmission	معامل انتقال الحرارة الكلي
Overload protection	الحماية ضد زيادة الحمل
P	
Perfect	كامل
Perfect gas	الغازات الكاملة
Performance	الأداء
Performance coefficient of	معامل الأداء
Percentage humidity	الرطوبة (النسبة المئوية للرطوبة)
Pipes	الأنابيب
Piped connections	وصلات الأنابيب
Pipes fitting	متممات الأنابيب
Pipes equivalent length of piping	الطول المكافئ للأنابيب
Pipes friction loss in	طياحات التحكك في الأنابيب
Pipes joints	وصلات الأنابيب
Pistons	المكبس
Pistons clearance	خلوص المكبس
Pistons pin	محور المكبس
Pistons rings	حلقات المكبس

Pistons speed	سرعة المكبس
Pipes types	أنواع المكابس
Polytropic processes	العمليات البوليترودية
Potential energy	الطاقة الكامنة
Power	الاستطاعة
Prandtl number	عدد (رقم) براندل
Pressure factor	عامل الضغط
Pressure	الضغط
Pressure absolute	الضغط المطلق
Pressure condensing	ضغط التكثيف
Pressure critical	الضغط الحرج
Pressure evaporator	ضغط المبخر
Pressure fluid	ضغط المائع
Pressure losses in refrigerant system	ضخايات الضغط في نظام التبريد
Pressure losses in water piping	ضخايات الضغط في أنابيب الماء
Pressure measurement	قياس الضغط
Pressure oil	ضغط الزيت
Pressure saturation	ضغط الإشباع
Pressure static	الضغط الساكن
Pressure vapor	ضغط البخار
Pressure limiting expansion valve	صمام تمدد محدد للضغط
Pressure relief valve	صمام تخفيف الضغط
Pumping	الضخ
Pumping head	ارتفاع الضخ
Pumping limit (centrifugal compressors)	حد الضخ للضاغط الدائري
Pump	المضخة

Pump capacity	سعة المضخة
Pump centrifugal	المضخة النابذة
Pump rating	المضخة الدوارة
Pump selection	اختيار المضخة
Propane	بروبان
Propylene glycol	كليغول البروبيلين
Psychrometric properties air	الخواص البسيكرومترية للهواء

Q

Quantity Refrigerant	كمية وسيط التبريد
Quick freezing	التجميد السريع

R

Radiation	إشعاع
Range	مجال
Ratio	نسبة
Ratio compression	نسبة الانضغاط
Receiver	المتكبل
Reciprocating	ترددي
Reciprocating compressors	ضاغطات ترددية
Refrigerant	وسيط التبريد
Refrigerant control	التحكم بوسيط التبريد
Refrigerant oil mixture	مزيج الزيت و وسيط التبريد
Refrigerant piping	أنابيب وسيط التبريد
Refrigerant effect	التأثير التبريدي
Refrigerant systems	أنظمة التبريد
Refrigeration	التبريد
Refrigeration applications of	تطبيقات التبريد

Refrigeration load	أحمال التبريد
Refrigerator	براد
Relative humidity	الرطوبة المحسوسة
Resistance	مقاومة (ممانعة)
Respiration heat	حرارة التنفس
Reverse cycle defrosting	إزالة الصقيع بقلب الدارة
Reynolds number	عدد (رقم) رينولدز
Rotor	الدوار
Rotary compressor	الضاغط الدوار
Rotary screw compressor	الضاغط الحلزوني الدوار
S	
Safety	الامان
Saturation	الإشباع
Saturated pressure	ضغط الإشباع
Saturated vapor	بخار مشبع
Saturated temperature	درجة حرارة الإشباع
Saybolt viscosity	لزوجة سايبولت
Seals	حاشيات الكتامة
Seals crankshaft	حاشيات الكتامة للجزع المعقوف
Secondary	ثانوي
Secondary refrigerants	وسائط التبريد الثانوية
Sensible	المحسوسة
Sensible heat	الحرارة المحسوسة
Service	خدمة
Service valves	صمامات الخدمة
Shell-coil condenser	المكثف ذو الغلاف والملف

Shell-coil evaporator	المبخر ذو الغلاف والملف
Sell-tube condenser	المكثف ذو الغلاف وحزمة الأنابيب
Sell-tube evaporator	المبخر ذو الغلاف وحزمة الأنابيب
Sight glass	زجاجة الرؤية
Sludge	وحل
Sludge formation in oils	تشكل الوحل في الزيوت
Sodium chloride brine	محلول ملح كلوريد الصوديوم
Sol-air temperature	درجة الحرارة الشمسية
Solar energy	الطاقة الشمسية
Solar radiation	الإشعاع الشمسي
Solder joints	وصلات لحام أو كسي استيلوني
Solenoid valve	صمام مغناطيسي
Specific	نوعي
Specific gravity of liquid	الوزن النوعي للسائل
Specific heat	الحرارة النوعية
Specific humidity	الرطوبة النوعية
Specific volume	الحجم النوعي
Speed	سرعة
Speed compressor	سرعة الضاغط
Speed motor	سرعة المحرك
Spoilage	فساد
Spoilage agents	عناصر (عوامل) الفساد
Spoilage control	التحكم بالفساد
Spray type evaporator	مبخر الطراز بالبخ
Squirrel cage motor	محرك قفص السنجاب
Standard air	الهواء النظامي
Starting	الإقلاع

Starting relays	ريليات الإقلاع
Starting torque	عزم الإقلاع
Static head	الارتفاع الستاتيكي
Stefan-Boltzmann law	قانون ستيفن بولتزمان
Storage	تخزين
Strainer	مصفاة
Stuffing box	حشوات الكتامة
Sub cooler	مبرد تحتي
Suction	سحب
Suction line	خط السحب
Sulfured dioxide	ثاني أكسيد الكبريت
Superheated	محمص - زيادة تسخين
Superheated cycle	دائرة ذات تحميص
Superheated cycle region	منطقة التحميص
Superheated vapors	أبخرة محمصة
Synchronous motors	محركات متزامنة
System	نظام
System balance	توازن النظام
System capacity	سعة النظام

T

Temperature	درجة الحرارة
Temperature absolute	درجة الحرارة المطلقة
Temperature condensing	درجة الحرارة التكثيف
Temperature dew point	درجة الحرارة نقطة الندى
Temperature dry bulb	درجة الحرارة بالترمومتر الجاف
Temperature freezing	درجة الحرارة التجمد

Temperature fusion	درجة حرارة الانصهار
Temperature wet bulb	درجة الحرارة بالترمو متر الرطب
Temperature-entropy diagram	مخطط درجة الحرارة الانتروبي
Thermal insulation	العزل الحراري
Thermostatic	ترموستاتيكي
Thermosphere	طبقة الترموسفير
Thermostatic expansion valve	صمام تمدد ترموستاتيكي
Thermostatic external equalizer	معنن خارجي ترموستاتيكي
Thermostatic sensing elements	عناصر تلمس ترموستاتيكية
Thermostat	ترموستات
Tower	برج
Tower cooling	برج التبريد
Troposphere	طبقة التريوسفير
Tube	أنبوب
Tube capillary	أنبوب شعري
Tunnel freezers	مجعدات نفقية (ألفاق التجميد)
Types of compressors	أنواع الضواغط

U

Unit cooler	وحدة مبرد
Universal viscosity	لزوجة عالمية
Unloaded	مزيل الحمل

V

Valve	صمام
Valve automatic expansion	صمام تمدد آلي
Valve compressor	صمام الضاغط
Valve condenser by pass	صمام التمرير للمكثف

Valve crankcase pressure regulating	صمام عيار الضغط
Valve hand expansion	في الخلوص
Valve hand stop	صمام تمدد يدوي
Valve hot gas by pass	صمام إغلاق يدوي
Valve pressure relief	صمام تمرير الغاز الساخن
Valve receiver tank	صمام تخفيف الضغط
Valve service	صمام خزان المستقلة صمام الخدمة
Valve solenoid	صمام مغناطيسي
Vapor	بخار
Variable	متغير
Velocity	سرعة
Velocity method	طريقة السرعة
Vibration	الاهتزاز
Volume	حجم
Volumetric efficiency	المردود الحجمي

W

Warm air defrost	إذابة الصقيع بالهواء الدافئ
Water	ماء
Water cooled condensers	المكثفات المبردة بالماء
Water heaters	مسخنات الماء
Water treatment	معالجة الماء

Z

Zero absolute	الصفر المطلق
---------------	--------------

المقومون العلميون:

- الأستاذ الدكتور المهندس مروان شرباتي
- الأستاذ الدكتور المهندس محمد سعيد الجراح
- الأستاذ الدكتور المساعد نصر ياسين

المدقق اللغوي:

- الأستاذ الدكتورة منى الياس

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات الجامعية

جامعة دمشق
Damascus University