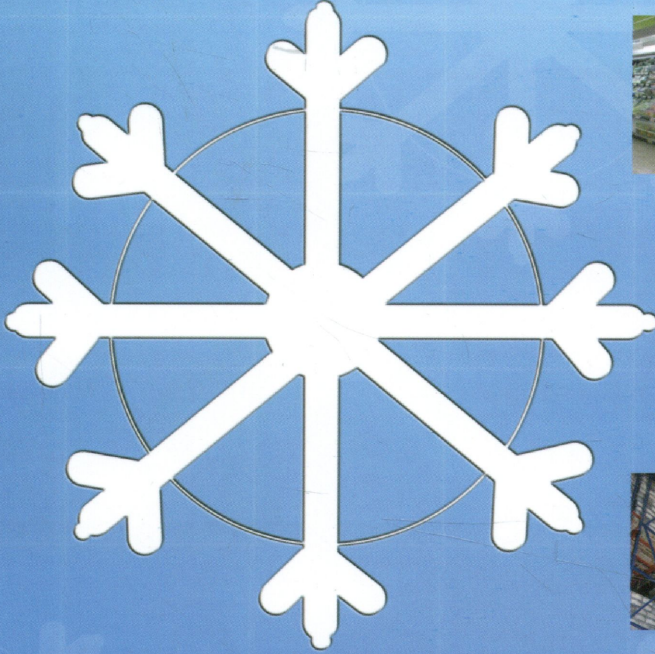


مخازن التبريد



أ. د. مصطفى محمد السيد أ. د. عمر محمد علي الراشدي



مركز النشر العالمي
جامعة الملك عبد العزيز
<http://spc.kau.edu.sa>





أ.د. مصطفى ملامح السيد هندسة ميكانيكية

- من مواليد مصر
- حصل على شهادة الدكتوراه في الهندسة الميكانيكية من الولايات المتحدة الأمريكية عام ١٩٧٦م.
- عمل أستاذاً بجامعة الملك عبد العزيز و جامعة الكويت (كلية الهندسة)
- له ما يزيد على ٩٠ بحثاً هندسياً منشوراً في مجالات الهندسة الميكانيكية (الهندسة الحرارية).
- مؤلف عدة كتب بالعربية و الانجليزية.
- مؤسس ويعمل حالياً شريك تنفيذي في المجموعة المصرية للاستشارات الهندسية (EGEC).

moustafa.elsayed@egec-xprt.com

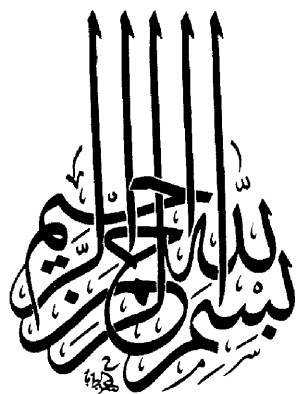


أ.د. عمر ملامح علي شتيان الراغب هندسة ميكانيكية

- من مواليد السعودية
 - حصل على شهادة الدكتوراه في الهندسة الميكانيكية من الولايات المتحدة الأمريكية
 - له ما يزيد عن ٣٣ بحثاً منشوراً في مجالات الهندسة الميكانيكية (الهندسة الحرارية)
 - يعمل أستاذاً بقسم الهندسة الحرارية و تقنية تحلية المياه - جامعة الملك عبد العزيز.
- orabghi@kau.edu.sa

ردمك : ٢ - ٦٠٤





مخازن التبريد

أ.د. مصطفى محمد السيد أ.د. عمر محمد علي الرابعي

المجموعة المصرية للاستشارات الهندسية كلية الهندسة - جامعة الملك عبد العزيز

مركز النشر العالمي
جامعة الملك عبد العزيز
ص ب : ٨٠٩٠٠ - جدة : ٢١٥٨٩
العلمية (للشؤون)
<http://spe.kau.edu.sa>

© جامعة الملك عبدالعزيز ١٤٣٢ هـ (٢٠١١ م)

جميع الحقوق محفوظة.

الطبعة الأولى: ١٤٣٢ هـ (٢٠١١ م)

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

السيد ، مصطفى محمد

مخازن التبريد. / مصطفى محمد السيد ؛ عمر محمد علي الرابعي. -
جدة، ١٤٣٢ هـ

٤٥١ ص ؛ .. سم

ردمك: ٩٧٨-٩٩٦٠-٠٦-٦٠٤-٢

١- الاغنية - حفظ ٢- هندسة التبريد أ. الرابعي ، عمر محمد
علي (مؤلف مشارك) ب. العنوان
ديوي ٦٤١,٤
١٤٣٢/١٠٧١١

رقم الإيداع: ١٤٣٢/١٠٧١١

ردمك: ٩٧٨-٩٩٦٠-٠٦-٦٠٤-٢

تنشیر و تقدیر

یتقدم المؤلفان بالشكر والثناء لله عز وجل أن تم هذا الكتاب على الوضع الحالي،

كما يشكران عائلتيهما و كل من له حق عليهما.

ولا ينسى المؤلفان شكر جامعة الملك عبدالعزيز بجدة على تشجيعها على التأليف

والنشر العلمي، إضافة لشكر السادة المحكمين على ملاحظاتهم القيمة،

سائلين الله عز وجل أن يكون هذا الكتاب مفيداً.

تقديم

تعتبر مخازن التبريد واحدة من أهم التطبيقات الخاصة بهندسة التبريد، ويقصد بمخازن التبريد الثلجات الكبيرة لحفظ الأطعمة والمواد الغذائية والمواد التي يخشى من تلفها نتيجة للتفاعلات البيولوجية بهذه المواد، وهي بالتأكيد أحد الدعائم المهمة للحضارة المعاصرة وركيزة من ركائز الاقتصاد لأي دولة.

ويهدف الكتاب إلى إمداد المهندسين العاملين في تصميم، وبناء وتشغيل وصيانة مخازن التبريد بالمبادئ الهندسية الخاصة بهذا المجال المهم. ويقدم الكتاب عرضاً لمكونات هذه المخازن وطريقة عملها وكيفية تصميمها، وذلك من خلال خمسة عشر فصلاً بالإضافة إلى خمسة ملاحق.

في الفصل الأول من الكتاب نقدم مقدمة لمخازن التبريد وأهميتها في الحياة المعاصرة.

وتقدم الفصول الثاني والثالث والرابع أهم الأساسيات والمبادئ الهندسية اللازمة للمهندسين المهتمين بتصميم وتشغيل وصيانة مخازن التبريد، في الفصل الثاني نقدم مبادئ هندسة التبريد التي يقوم عليها مخازن التبريد، ويشمل الفصل دورة التبريد بانضغاط البخار، وأهم عملياتها، والعلاقات الرياضية بها وأسباب حيود الدورة عن الدورة المثالية، وتأثير الظروف الخارجية، مثل: درجة حرارة غرفة التبريد، ودرجة حرارة الجو المحيط على أداء الدورة. ويقدم الفصل الثالث خواص الهواء الرطب. ويقدم الفصل الرابع مبادئ سريان الموائع وانتقال الحرارة، ويشمل ذلك عرضاً لقانون بقاء الكتلة، وموازنة الطاقة لسريانات الموائع، والعلاقات اللازمة لحساب فقد الضغط للسريانات داخل الأنابيب

والمواسير، وتعريف انتقال الحرارة بالتوصيل وبالحمل وبالإشعاع والعلاقات الرياضية المستخدمة للتنبؤ بمعدل انتقال الحرارة في تطبيقات مخازن التبريد، كما يعرض أيضا الفصل توضيحًا لاستخدام الزعانف كأسطح ممتدة من جهة الهواء في ملفات التبريد والمكثفات المبردة بالهواء، وعرضا لاستخدام المبادلات الحرارية والنماذج الحسابية الخاصة بتصميمها والتنبؤ بأدائها.

يقدم الفصل الخامس أسباب تلف الأغذية والعوامل التي تؤدي إلى ذلك، ويقدم الفصل أيضا ظاهرة فقد الماء من الأغذية وتنفس الخضروات والفواكه والحمل الحراري الناتج عن ذلك. كما يقدم الفصل أيضا الشروط المثلى الواجب أخذها في الاعتبار لحفظ الأنواع المختلفة من الأغذية في مخازن التبريد. نقدم بعد ذلك أهم الاعتبارات الهندسية الواجب أخذها في الاعتبار عند بناء مخازن التبريد في الفصل السادس، ويشمل ذلك طرق البناء ومواصفاته، والأساس والأرضية، وتخطيط مخازن التبريد، وطرق رص ونقل المواد المخزنة، وتقدير حجم المواد المخزنة بكل غرفة من الغرف. كما يتعرض الفصل أيضا لما يجب اتباعه للخفض الأولي لدرجة حرارة غرفة التخزين والمشاكل الناجمة عن تغير الضغط بالغرفة نتيجة لذلك.

يعتبر الفصل السابع قلب الكتاب الحالي، ويعنى هذا الفصل بتقدير حمل التبريد لكل غرفة من غرف التبريد، وذلك بهدف تقدير وتوصيف معدات التبريد اللازمة لعمل المخزن. ويشمل الفصل عرضاً للمكونات المختلفة لحمل التبريد، مثل: حمل التبريد المنتقل من الحوائط والسقف والأرضية، وحمل التبريد الناتج عن المواد المخزنة، وحمل التبريد الناتج عن تسرب الهواء من خارج غرفة التبريد إلى داخلها. في الفصل الثامن، يتم استعراض نظم التبريد سواء النظم أحادية المرحلة أم متعددة المراحل، تستخدم مخازن التبريد عدة نظم للتبريد تبعاً

لدرجة حرارة التخزين، وإن كانت هذه الدرجة في بعض المخازن تحت الصفر أم لا، ويبين الفصل مميزات وعيوب كل نظام من هذه النظم وكيفية عمله وتصميمه.

تخصص الفصول من تسعة إلى الثاني عشر لمكونات نظم التبريد في مخازن التبريد من غير ماكينات التبريد. ويقدم الفصل التاسع طرق تصميم أنابيب ومواسير المبرد في خطوط السحب من المبخر، وخطوط الغاز الساخن القادم من الضاغط إلى المكثف، وخطوط المبرد السائل العائد من المكثف، ويعرض الفصل كيفية تحديد مسارات وأقطار هذه المواسير والأنابيب والاعتبارات الهندسية التي يلزم أخذها في الاعتبار لضمان عمل نظم التبريد بالكفاءة المرجوة منها. ويعرض الفصل العاشر التحكم في نظم التبريد المستخدمة في مخازن التبريد. نعرض تصميم واختيار العزل الحراري وحاجز البخار في الفصل الحادي عشر، ويبين الفصل كيفية اختيار السمك الأمثل للعزل الحراري للموازنة بين التكاليف الأولية لبناء مخزن التبريد وتكلفة التشغيل، كما يقدم الفصل أيضا أهمية توصيف واختيار وتركيب حاجز البخار في مخازن لتبريد للحد من تسرب بخار الماء من خارج غرف التبريد إلى داخلها، كما يبين الفصل الثاني عشر نظم إذابة الصقيع من حيث عملها، وتصميمها وتشغيلها.

يقدم الفصلان الثالث عشر والرابع عشر مكونات ماكينات التبريد، فيقدم الفصل الثالث عشر عرضا للضواغط الترددية والضواغط اللولبية المستخدمة في ماكينات تبريد مخازن التبريد، وعمل هذه الضواغط والعلاقات الرياضية الحاكمة لأداء هذه الضواغط، ويقدم الفصل الرابع عشر ملفات التبريد والمكثفات المبردة بالماء والمكثفات المبردة بالهواء وطرق عملها والعلاقات الرياضية التي تحكم أدائها وكيفية اختيارها وتوصيفها. كما يقدم الفصل أيضا وحدات التكثيف

الشائعة تجاريًا، والتي تضم الضاغط والمكثف في معدة واحدة، وكيفية اختيار هذه الوحدات من كتلوجات الشركات المصنعة، ويقدم الجزء الأخير من الفصل توافق أداء ملفات التبريد ووحدات التكثيف عند عملها معا في ماكينة للتبريد.

في الفصل الخامس عشر، يتم وضع خطوات مفصلة لتصميم غرفة تبريد، ويستفاد من العلاقات الرياضية المعطاة في الفصل السابع، كما تم عمل برنامج حاسب آلي على اكسل (Excel) لتسهيل الحسابات، كما تم إدراج مثال محلول على ذلك.

يشمل الكتاب أيضا خمسة ملاحق، بالإضافة إلى قائمة المراجع وثبت المصطلحات العربية والإنجليزية، وتشمل هذه الملاحق: خواص وجداول بعض المبردات المستخدمة في غرف التبريد، وخواص الهواء الرطب، والخواص التيرموديناميكية للماء والهواء الجاف، ومعاملات التحويل للوحدات السائد استخدامها في هذا المجال.

المحتويات

الصفحة

شكر وتقدير	هـ
تقديم	ز
١. مقدمة	

١,١ أهمية مخازن التبريد	١
١,٢ طرق حفظ الأطعمة	٢
١,٣ مخازن التبريد	٤
١,٤ تاريخ مخازن التبريد	٥
١,٥ السلسلة الباردة	٦
١,٦ وسائل النقل المبردة	٩
١,٧ التبريد الأولي	١٥
١,٨ الجمعيات والهيئات الدولية	١٥

٢. مبادئ هندسة التبريد بانضغاط البخار

٢,١ الدورة المثالية للتبريد بانضغاط البخار	١٩
٢,٢ موائع التبريد (المبردات)	٢٢
٢,٣ تأثير درجتي حرارة المكثف والمبخر على أداء الدورة المثالية ...	٢٥
٢,٤ الحيود عن الدورة المثالية للتبريد بانضغاط البخار	٢٨
٢,٤,١ انتقال الحرارة بين الجو المحيط وخطوط المبرد	٢٩
٢,٤,٢ فقد الضغط في خطوط المبرد وفي المكونات المختلفة للدورة	٣٢

- ٣٥ ٢,٤,٣ حيود عملية الانضغاط عن عملية الانضغاط المثالية
- ٣٧ ٢,٤,٤ الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار
- ٤١ ٢,٥ الأثر البيئي للمبردات

٣. خواص الهواء الرطب

- ٤٩ ٣,١ الهواء الجاف والهواء الرطب
- ٤٩ ٣,٢ نسبة الرطوبة و درجة التشبع و الرطوبة النسبية
- ٥١ ٣,٣ درجات حرارة الهواء الرطب
- ٥٢ ٣,٤ كثافة و انثالبي الهواء الرطب
- ٥٣ ٣,٥ خريطة السيكروميترى
- ٥٥ ٣,٦ العمليات الأساسية المستخدمة فى تكييف الهواء

٤. مبادئ سريان الموائع وانتقال الحرارة

- ٦٧ ٤,١ مقدمة
- ٦٧ ٤,٢ قانون بقاء الكتلة
- ٦٩ ٤,٣ معادلة الطاقة لسريانات الموائع
- ٧٠ ٤,٤ فقد الضغط للسريان داخل الأنابيب
- ٧٤ ٤,٥ انتقال الحرارة بالتوصيل
- ٧٧ ٤,٦ انتقال الحرارة بالحمل
- ٨١ ٤,٧ انتقال الحرارة بالإشعاع
- ٨٢ ٤,٨ المعامل الكلي لانتقال الحرارة
- ٨٤ ٤,٩ الزعانف

٨٧	٤,١٠ المبادلات الحرارية
	٥. متطلبات ومواصفات التبريد لحفظ الأغذية
٩٧	٥,١ مقدمة
٩٧	٥,٢ أسباب تلف الأغذية
٩٩	٥,٣ حفظ الأغذية بالتبريد
١٠٢	٥,٤ تنفس الفواكه والخضراوات الطازجة
١٠٤	٥,٥ فقد الماء من الفواكه والخضراوات الطازجة
١٠٥	٥,٦ الخواص الحرارية للمواد الغذائية
١١١	٥,٧ الشروط المثلى لتخزين المواد الغذائية
	٦. الاعتبارات الهندسية لبناء وتشغيل مخازن التبريد
١١٧	٦,١ تقديم
١١٨	٦,٢ طرق البناء
١٢١	٦,٣ مواصفات البناء
١٢٤	٦,٤ الأساس والأرضية
١٣٠	٦,٥ تخطيط مخازن التبريد
١٣٣	٦,٦ طرق الرص ونقل البضائع داخل مخازن التبريد
١٣٧	٦,٧ أرضقة التحميل والتفريغ
١٣٩	٦,٨ تقدير حجم غرف التبريد
١٤٣	٦,٩ خفض درجة حرارة غرف التبريد
١٤٤	٦,١٠ تغيير الضغط في مخازن التبريد

٧. حمل التبريد

- ١٤٩ ٧,١ تعريف حمل التبريد
- ١٥٠ ٧,٢ حمل التبريد نتيجة انتقال الحرارة بالحوائط والأسقف والأرضية .
- ١٥٢ ٧,٣ حمل التبريد للمواد المخزنة
- ١٥٤ ٧,٤ حمل التبريد الداخلي
- ١٦٠ ٧,٥ حمل التبريد للهواء الخارجي المتسرب إلى غرفة التبريد
- ١٦٩ ٧,٦ حمل التبريد الإجمالي لغرف التبريد

٨. نظم التبريد

- ١٧٣ ٨,١ مقدمة
- ١٧٣ ٨,٢ نظم التبريد أحادية المرحلة
- ١٨٠ ٨,٣ نظم التبريد متعددة المراحل
- ١٨٣ ٨,٣,١ المبرد البيئي المغلق
- ١٨٧ ٨,٣,٢ المبرد البيئي المفتوح
- ١٩٠ ٨,٣,٣ مبرد المياه البيئي
- ١٩١ ٨,٣,٤ عدد المراحل والضغط البيئي في النظم متعددة المراحل...
- ١٩٤ ٨,٤ نظم التغذية الزائدة للسائل
- ١٩٧ ٨,٤,١ حساب معدل دوران السائل
- ١٩٨ ٨,٤,٢ تصميم مستقبل السائل للضغط المنخفض

٩. تصميم أنابيب ومواسير المبرد

- ٢٠٧ ٩,١ مقدمة

٢٠٧	٩,٢ أساسيات فقد الضغط في خطوط المبردات
٢١١	٩,٣ التغير في درجة حرارة التثبيح المكافئ لفقد الضغط
٢١٣	٩,٤ الاعتبارات الهندسية لتصميم مسارات خطوط المبردات
٢١٦	٩,٥ جداول حساب أقطار خطوط المبرد
٢١٨	٩,٦ تصميم مسار خط السائل
٢٢٦	٩,٧ تصميم مسار خط السحب
٢٣٦	٩,٨ تصميم مسار خط الغاز الساخن
٢٤٥	٩,٩ تصميم مسار خط البخار المتكثف
٢٤٩	٩,١٠ الاهتزازات والضوضاء والعزل الحراري لخطوط المبرد

١٠. نظم التحكم

٢٥٣	١٠,١ مقدمة
٢٥٣	١٠,٢ المكونات الأساسية لمنظومة التحكم الآلي
٢٥٥	١٠,٣ نظام تحكم بسيط من نوع تشغيل/إيقاف
٢٥٦	١٠,٤ أنواع التحكم
٢٥٨	١٠,٤,١ نظام تحكم من نوع تشغيل/إيقاف موقوت
٢٥٨	١٠,٤,٢ التحكم العائم
٢٦٠	١٠,٤,٣ نظام التحكم المتغير
٢٦٣	١٠,٥ أمثلة على تطبيقات التحكم الآلي في دورة التبريد بانضغاط البخار ..
٢٦٧	١٠,٥,١ مكونات أخرى في دائرة التبريد
٢٦٩	١٠,٦ أجهزة القياس والاستشعار

٢٦٩	 ١٠,٦,١ مجسات قياس درجة الحرارة
٢٧٦	 ١٠,٦,٢ قياس الرطوبة النسبية للهواء
٢٧٧	 ١٠,٦,٣ أجهزة قياس الضغط
٢٧٩	 ١٠,٧ أجهزة التحكم
٢٨٢	 ١٠,٨ التحكم الرقمي

١١. العزل الحراري وحاجز البخار

٢٨٧	 ١١,١ مقدمة
٢٨٨	 ١١,٢ العوازل الحرارية المستخدمة في غرف التبريد
٢٨٩	 ١١,٣ انتقال الحرارة خلال العازل الحراري
٢٩٢	 ١١,٤ السمك الاقتصادي للعازل الحراري
٢٩٤	 ١١,٥ استخدام الحاسب الآلي لحساب السمك الاقتصادي للعازل الحراري
٢٩٩	 ١١,٦ القيم الموصى بها لسمك العزل الحراري
٣٠٥	 ١١,٧ حاجز انتقال بخار الماء
٣٠٧	 ١١,٨ ألواح العزل الحراري سابقة التصنيع

١٢. نظم إذابة الصقيع

٣١٣	 ١٢,١ مقدمة
٣١٥	 ١٢,٢ طرق إذابة الصقيع
٣١٦	 ١٢,٣ استخدام الغاز الساخن لإذابة الصقيع
٣٢٣	 ١٢,٤ تصميم خطوط الغاز الساخن لإذابة الصقيع
٣٢٦	 ١٢,٥ اعتبارات هندسية

١٣. الضواغط

٣٢٩	 ١٣,١ مقدمة
٣٢٩	 ١٣,٢ الضواغط الترددية
٣٢٩	 ١٣,٢,١ طريقة العمل
٣٣٢	 ١٣,٢,٢ إزاحة الكباس
٣٣٤	 ١٣,٢,٣ الكفاءة الحجمية
٣٣٥	 ١٣,٢,٤ سعة التبريد
٣٤١	 ١٣,٣ الضواغط اللولبية
٣٤١	 ١٣,٣,١ طريقة العمل
٣٤٤	 ١٣,٣,٢ إزاحة الكباس
٣٤٥	 ١٣,٣,٣ الكفاءة الحجمية
٣٤٧	 ١٣,٣,٤ الكفاءة الايزنتروبية

١٤. ملفات التبريد والمكثفات

٣٥٣	 ١٤,١ مقدمة
٣٥٤	 ١٤,٢ ملفات التبريد
٣٥٩	 ١٤,٣ المكثفات
٣٦٥	 ١٤,٤ المكثفات المبردة بالماء
٣٦٩	 ١٤,٥ المكثفات المبردة بالهواء
٣٧٢	 ١٤,٦ وحدات التكثيف: الضاغط والمكثف
٣٧٩	 ١٤,٧ توافق أداء معدات التبريد

١٥. تصميم مخازن التبريد

٣٨٥	 ١٥,١ مقدمة
٣٨٥	 ١٥,٢ خطوات حسابات تصميم غرف التبريد
٣٩٧	 ١٥,٣ مثال لتصميم غرف التبريد
٤٠٧	 المراجع

الملاحق

٤١٣	 ثبت المصطلحات
٤٢٨	 ملحق أ: خواص بعض مبردات التبريد
٤٤٣	 ملحق ب: خواص الهواء الرطب
٤٤٦	 ملحق ج: الخواص الثيرموديناميكية للماء عند التشبع
٤٤٩	 ملحق د: الخواص الثيرموفيزيائية للماء والهواء الجاف
٤٥١	 ملحق هـ: معاملات التحويل للوحدات

الفصل الأول

مقدمة

١,١ أهمية مخازن التبريد

يتناول هذا الكتاب موضوعًا يلامس حياتنا اليومية بشكل مباشر، ألا وهو مخازن التبريد لحفظ المواد الغذائية. ويمكن الجزم بأنه لا توجد أي مدينة معاصرة بدون مخازن تبريد بأحجامها المختلفة، بدءًا من الثلاجات المنزلية، إلى مباني مخازن التبريد العملاقة التي يمكن الحركة داخلها بسيارات ومعدات نقل البضائع. ويعنى الكتاب الحالي بمخازن التبريد كبيرة الحجم، أي التي يتم تصميمها وبنائها حسب الاحتياج، وبالتالي لا يشمل الكتاب الثلاجات المنزلية أو ما يماثلها من الثلاجات سابقة التصنيع بأحجامها المختلفة.

تقسم مخازن التبريد تبعًا لدرجة الحرارة بها إلى مخازن تبريد أو مخازن تجميد أو مخازن تبريد وتجميد، وإن كانت تعرف جميعًا مجازًا باسم مخازن تبريد. أيضًا، تقسم مخازن التبريد من حيث التصنيع إلى مخازن (أو غرف تبريد) مسبقة الصنع، ومخازن تبريد يتم تصميمها وإنشاؤها في الموقع حسب مساحة الموقع ورغبة المالك وعناصر التصميم الأخرى.

يتم إنشاء مخازن التبريد واستخدامها للمحافظة على المواد الغذائية من التلف، فالعامل الاقتصادي هو العنصر الأساسي المحرك لإنشاء مخازن التبريد والتجميد. ولقد صاحب التوسع في إنشاء مخازن التبريد الاهتمام بنقل المواد المبردة بوسائل نقل مختلفة (برًا وجوًا وبحرًا) وضمان وجود سلسلة من مخازن التبريد الساكنة والمتحركة حتى يسهل نقل المواد الغذائية من موقع تحصيلها أو صناعتها إلى مائدة المستهلك دون تعرضها للتلف خلال التحميل أو الشحن أو النقل أو التفريغ.

١,٢ طرق حفظ الأغذية

حاول الإنسان منذ القدم المحافظة على المواد الغذائية لفترات زمنية طويلة بالعديد من الطرق للاستفادة من هذه المواد عندما يتعثر الحصول على الغذاء أو عندما يندر وجود بعضها من أصنافه، وكان التبريد والتجميد واحداً من هذه الطرق. وتعمل جميع الطرق التي اكتشفها الإنسان وطورها عبر الزمن على القضاء على الكائنات الدقيقة الضارة أو إبطاء نموها للمحافظة على المواد الغذائية من الفساد الذي يؤدي إلى تغير في كل أو بعض من الخصائص الخاصة بالطعم أو المذاق أو الشكل أو القيمة الغذائية. وتتم المحافظة على المواد الغذائية عادة بتغيير المناخ اللازم لنمو هذه الكائنات، مما يعمل على موتها أو الحد بشكل فعال ومؤثر من تكاثرها. تختلف طرق حفظ المواد الغذائية فيما بينها تبعاً للخاصية الأساسية المستخدمة لحفظها، مع استخدام بعض الطرق لأكثر من خاصية من هذه الخصائص. ونعرض فيما يلي بعضاً من أهم الطرق المستخدمة لحفظ المواد الغذائية.

تعمل بعض الطرق على المحافظة على المواد الغذائية عن طريق خفض محتوى الرطوبة بالمادة الغذائية، فمثلاً يستخدم التجفيف لحفظ الحبوب والبقول والفاكهة واللحوم والأسماك وغيرها. ويعتبر التجفيف من أقدم الطرق التي عرفها الإنسان لحفظ الأغذية. ويتم التجفيف أما طبيعياً بتعريض المادة الغذائية لأشعة الشمس مباشرة، أو صناعياً باستخدام سخانات ومراوح لتوزيع الهواء الساخن على المادة الغذائية المطلوب تجفيفها. كما يستخدم أيضاً التجفيف بوضع المادة الغذائية في فراغ (أي عند ضغط يقترب من الصفر المطلق). ويعيب عملية التجفيف تغير شكل وطعم والقيمة الغذائية للمواد التي يتم تجفيفها. ويتم التجفيف أيضاً في بعض الأحيان بإضافة ملح الطعام لحفظ اللحوم والأسماك، فيعمل الملح على سحب الماء من هذه اللحوم والأسماك، مما يحول دون فسادها لفترات طويلة.

ويعتبر تسخين بعض المواد الغذائية لدرجة غليان الماء كافياً لقتل الكائنات الدقيقة الضارة بها، ثم يتم تغليبها وحفظها للحيلولة دون وصول الهواء الخارجي المحمل بالكائنات الدقيقة الضارة إليها، وتستخدم هذه الطريقة بكثرة لحفظ الخضراوات والفواكه والحليب ومشتقاته، وغيرها. وتُحفظ بعض المواد الغذائية أيضاً عن طريق وضعها في محلول غير صالح لحياة الكائنات الدقيقة أو تكاثرها. ويعتبر التخليل أحد هذه الطرق، حيث تحفظ المادة الغذائية في محلول من الملح والليمون أو الملح والخل، كما هو الحال في حفظ الخيار والجزر والليمون والمانجو والزيتون وغيرها. وكذلك يمكن حفظ بعض المواد الغذائية بوضعها في محلول سكري، كما هو الحال في حفظ بعض أنواع الفاكهة مثل الكمثرى والتفاح. وتحفظ بعض أنواع الأغذية مثل اللحوم والأسماك والجبن أيضاً فيما يعرف بالتدخين، أي بتعريض المواد الغذائية لدخان الأخشاب، حيث لاحظ الإنسان عبر التاريخ تأثير هذا الدخان على الحد من نشاط الكائنات الدقيقة وتكاثرها.

ومن الطرق الحديثة التي تستخدم أيضاً لحفظ بعض المواد الغذائية المعالجة الإشعاعية، حيث يتم تسليط أيونات إشعاعية على المادة الغذائية للقضاء على الكائنات الدقيقة المسببة لتلفها. ومن الطرق الواعدة أيضاً لحفظ المواد الغذائية بتعرضها لنبضات من مجال كهربائي، وما زالت هذه الطريقة تحت البحث والتطوير. كما تم تطوير طريقة أخرى جديدة لحفظ المواد الغذائية بتعرضها لضغط جوي مرتفع، مما يُصعب على الكائنات الدقيقة الحياة أو التكاثر به. ولقد أثبتت هذه الطريقة نجاحاً في السنوات الأخيرة لحفظ العصائر واللحوم الباردة.

يأتي حفظ المواد الغذائية بالتبريد والتجميد كواحد من أقدم الطرق التي عرفها الإنسان. ومع تقدم العلم والتقنيات المختلفة تطورت هذه الطريقة بشكل

كبير وفعال. ويتميز حفظ الأطعمة بالتبريد والتجميد مقارنة بالطرق الأخرى لحفظ الأغذية بعدم وجود أي إضافات للمواد الغذائية مع احتفاظ المادة الغذائية بشكل كبير بشكلها و لونها الأساسي. ويعمل التبريد على إيقاف أو إبطاء نمو وتكاثر البكتريا الضارة. وينبغي الإشارة هنا إلى أن لكل مادة غذائية شروط مثلى لحفظها من حيث درجة الحرارة والرطوبة. ويمكن الرجوع إلى الفصل الخامس لمزيد من التفصيل حول حفظ المواد الغذائية بالتبريد والتجميد. كما يجب الإشارة إلى أن التبريد والتجميد يحتاجان إلى طاقة كهربائية (في العادة) عالية نسبيا لتشغيل المعدات الميكانيكية اللازمة للوصول إلى درجات الحرارة المتدنية لحفظ الأغذية عندها.

١,٣ مخازن التبريد

مخازن التبريد هي مستودعات يتم التحكم في ظروف مناخها الداخلي من حيث درجات الحرارة والرطوبة وتوزيع الهواء بالمناطق المختلفة بها. وتُبنى هذه المستودعات بأحجام مختلفة، فقد تكون أقل من عدة أقدام مكعبة أو ما يعرف بالثلاجات المنزلية، أو تزيد إلى عشرات الآلاف من الأمتار المكعبة، تبعاً للغرض التي بنيت من أجله.

تُستخدم مخازن التبريد في العديد من التطبيقات، من أهمها حفظ الأغذية في حالتها المختلفة، سواء الطازجة أو المصنعة، بالإضافة إلى التطبيقات الأخرى مثل حفظ الأدوية واللقاحات والدم، وحفظ الأعضاء البشرية، وغيرها. ويعنى الكتاب الحالي بمخازن التبريد الخاصة بحفظ الأغذية فقط.

ومن ضمن التطبيقات المهمة والمفيدة التي استخدمت فيها مخازن التبريد، مشروع حفظ لحوم الهدي والأضاحي في أيام التشريق في موسم الحج بالمملكة العربية السعودية، حيث يتم تخزين لحوم هذه الأضاحي ثم الاستفادة منها لإطعام المحتاجين في العالم الإسلامي. ويعتبر مشروع الإفادة من مشروع الأضاحي الذي يشرف عليه البنك الإسلامي للتنمية في جدة مشروع اقتصادي اجتماعي

تكافلي من الدرجة الأولى، حيث يتم سنوياً ذبح الماشية (أغنام وأبقار وجمال) في مشعر منى ثم تجمد هذه اللحوم في الحال وتحفظ في مخازن تبريد ذات ساعات كبيرة جداً تم إنشاؤها في منى لهذا الغرض.

١,٤ تاريخ مخازن التبريد

يرجع تاريخ مخازن التبريد إلى بداية القرن الثامن عشر مع بدأ حفظ اللحوم في شمال الولايات المتحدة الأمريكية، وفي بعض البلاد الأوربية التي تتوفر بها الثلوج الطبيعية شتاءً، حيث قام البعض ببناء مخازن حفظ اللحوم باستخدام الثلج مع استخدام نشارة الخشب كعازل حراري للمحافظة على الثلج لأطول فترة ممكنة دون الذوبان. ولم يصل القرن التاسع عشر إلى منتصفه إلا واستطاع بنيامين نيس (Benjamin Nyce) في ولاية أنديانا بالولايات المتحدة الأمريكية عام ١٨٥٨م من بناء أول مخزن تبريد يعمل بالثلج الطبيعي، مع استخدام مراوح لتدوير وتوزيع الهواء البارد في جميع أنحاء المخزن. ويعتبر دكتور هنري هورد ((Henry Howard) بمدينة سان أنطونيو بولاية تكساس بالولايات المتحدة الأمريكية في عام ١٨٦٨م أول من قام ببناء مخزن لتجميد اللحوم وحفظها بالثلج الطبيعي (Hallowell, 1980).

تم بناء مخازن التبريد التي تعمل بالتبريد الميكانيكي بالولايات المتحدة ابتداءً من عام ١٩٣٠م مع بداية تطور التبريد الصناعي والاستفادة منه تجارياً، حيث بُنيت غرف حفظ اللحوم ملحقة بمصانع إنتاج الثلج. وقد صاحب تحسين أداء معدات التبريد الميكانيكي وتطورها بشكل كبير إلى زيادة التوسع في بناء مخازن التبريد بهدف حفظ الأغذية وإمداد الأسواق القريبة أو البعيدة من مناطق إنتاج بهذه الأغذية. وشهد النصف الثاني من القرن العشرين بناء مخازن التبريد بأحجام مختلفة ولتطبيقات متنوعة في العديد من دول العالم. فتم بناء مخازن التبريد التي تضم العديد من المستودعات الداخلية التي يمكن التحكم في درجة حرارتها، سواء كانت

درجة الحرارة تحت درجة التجمد أو فوقها، أو مخازن التبريد التي تستخدم لتخزين منتج واحد فقط له احتياج محدد من درجات الحرارة والرطوبة النسبية. أيضاً، عرفت مخازن التبريد العامة التي يتم تأجير غرفها حسب الطلب، هذا بالطبع بالإضافة إلى مخازن التبريد الخاصة بالشركات التي لا يتم تأجيرها لآخرين.

١,٥ السلسلة الباردة

تتكون السلسلة الباردة (cold chain) من مجموعة من الأماكن أو المخازن الباردة التي يتم التحكم في درجة حرارتها في مدى معين (عادة بين ٢ إلى ٨ درجة مئوية)، وبدون أن تشمل هذه السلسلة أي مكان لا يتم فيه التحكم في درجة الحرارة. وتستخدم هذه السلسلة لحفظ، وتوزيع وبيع المنتجات الغذائية سواء الطازجة أو المصنعة، والخضراوات والفاكهة، واللحوم والأسماك.. الخ، والأدوية والمواد الكيميائية، وخام أفلام التصوير وغيرها. تعمل السلسلة الباردة على إبطاء نمو الفطريات والبكتيريا التي تؤدي إلى فساد المنتجات وقصر عمرها، و بذلك يتم ضمان وصول المنتج من مركز إنتاجه إلى المستهلك مروراً بعملية النقل والتحميل والتخزين دون أن يتعرض للتلف.

ويبين شكل ١,١ تغير درجة الحرارة مع الوقت خلال سلسلة باردة بدأت بعملية نقل، ثم تفريغ إلى مخزن تبريد حيث تحفظ لمدة زمنية ثم يتم التحميل إلى وسائل نقل مرة أخرى.



شكل ١,١ تغير درجة الحرارة مع الزمن خلال سلسلة باردة.

تتكون السلسلة الباردة تبعا للاحتياج من مخازن التبريد، ووسائل النقل المبردة (عربات نقل وقطارات للنقل البري، وطائرات للنقل الجوي، ومراكب وسفن للنقل البحري) وثلاجات العرض. وتعرف كفاءة السلسلة الباردة بكفاءة أضعف نقطة بها. فمثلا تتأثر كفاءة السلسلة الباردة بعدة عناصر تؤثر في كل مرحلة من مراحل السلسلة الباردة، ومن هذه العناصر على سبيل المثال لا الحصر الآتي: درجة الحرارة، والتغليف، والمناولة. ويمكن بسهولة التعرف على مدى كفاءة عنصري التغليف والمناولة في كل مرحلة من مراحل السلسلة والتعرف على أي ضرر قد يكون ألم بهما، إلا أن تعرض المنتج لدرجة حرارة خارج المدى المسموح به قد يسبب تلف المنتج. لذا يجب وضع الأجهزة اللازمة لمراقبة تغير دراجة الحرارة مع الزمن خلال جميع مراحل السلسلة الباردة للتأكد من سلامة المنتج. ويعتبر ذلك شرط أساسي لشركات التأمين على نقل المنتجات التي تحتاج إلى تحكم في درجة الحرارة، مثل نقل الفاكهة على سبيل المثال في حالة نقل المواد الغذائية، أو نقل اللقاحات الطبية المختلفة. ومن أهم الأسباب التي قد تؤدي إلى عدم التحكم في درجة الحرارة في المدى المحدد خلال وسائل النقل المبردة الآتي:

- توقف معدات التبريد لبعض الوقت نتيجة انقطاع مفاجئ بالكهرباء أو لوجود عطل بهذه المعدات، أو الإيقاف المتعمد لمعدات التبريد بواسطة السائق لتوفير الوقود.
- سوء توزيع الهواء في المكان المبرد.
- تلف العازل الحراري في كل أو بعض الأماكن.
- تسرب هواء خارجي إلى المكان المبرد نتيجة وجود بعض الفتنحات التي تعمل على دخول هواء خارجي، أو قيام السائق بترك الباب الخارجي للمكان المبرد مفتوحا لفترة طويلة.

وتؤدي نفس الأسباب السابقة إلى عدم التحكم في درجة الحرارة لتكون في حدود المسموح به خلال عملية التخزين والتبريد، ويضاف إلى ذلك الآتي:

- ترك المنتجات لفترات طويلة في منطقة التفريغ أو التحميل.

للأسباب السابقة يجب مراقبة تغير درجة حرارة الجو المحيط بالمنتجات مع الزمن خلال جميع مراحل السلسلة الباردة للتأكد من عدم تعرض المنتجات لدرجات حرارة عالية قد تؤدي إلى تلف المنتجات. ولقد قام العديد من المصنعين بتصميم أجهزة لقياس درجة الحرارة وتسجيل تغيرها مع الزمن باستخدام التقنيات الرقمية الحديثة عن طريق موجات صوتية كموجات الراديو على سبيل المثال.

وتعتبر ثلاجات العرض لبيع المنتجات الغذائية هي أضعف نقاط السلسلة الباردة. ويلزم أن تكون ثلاجات العرض من نوعية جيدة تعمل على المحافظة على درجة حرارة المنتجات المعروضة بها. أيضاً، يجب أن تعمل هذه الثلاجات بدون السماح بدخول هواء ساخن من المناطق المحيطة إليها.

ويعتبر التغليف من العناصر المهمة التي تعمل على حفظ المنتجات خلال النقل في السلسلة الباردة. فيجب أن يكون من المتانة بالدرجة الكافية لحماية المنتج أثناء عملية النقل والتحميل والتفريغ. أيضاً يجب وجود طبقة من مانع تسرب بخار الماء لمنع فقد نسبة من محتوى الرطوبة بالمنتجات التي يكون محتوى الرطوبة بها مهماً. كما يجب أن تكون صناديق التعبئة بمقاسات وأشكال قياسية تساعد على تخزين أكبر عدد من الصناديق في الحجم المتاح للتخزين. ولقد تم تطوير وتنمية نظم التغليف بشكل مرضٍ عبر السنين.

أيضاً، يجب أن يكون هناك توزيع جيد للهواء في وسيلة النقل لضمان المحافظة على درجة حرارة مناسبة بجميع المنتجات المنقولة. كما تحتاج المنتجات الزراعية الطازجة والفواكه الطازجة إلى تجديد الهواء بشكل مستمر

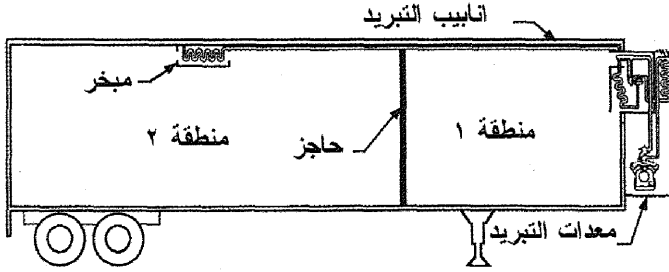
نتيجة لتنفس هذه المنتجات أثناء تخزينها، ويجب توضيح المعدل المطلوب لكل شحنه قبل بدء عملية النقل.

١,٦ وسائل النقل المبردة

تستخدم العديد من وسائل النقل لنقل المنتجات من أماكن تحضير المنتج إلى مخازن التبريد أو إلى أماكن العرض للبيع. ويلزم في هذه الوسائل العمل على حفظ درجة حرارة المنتج عند استلامه في المدى المسموح به، وكما أن ارتفاع درجة الحرارة في مخزن التبريد يؤدي إلى تلف المنتج فذلك الحال انخفاض درجة الحرارة عن الحد المسموح.

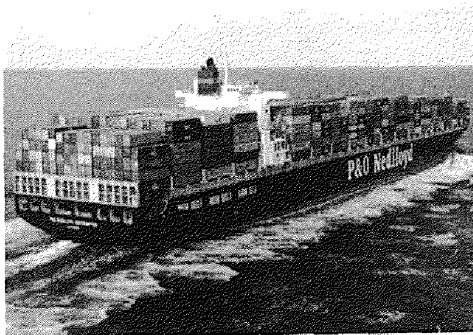
وتتضمن وسائل النقل عربات النقل بمقاساتها المختلفة والمراكب والسفن والطائرات بالإضافة إلى الحاويات المبردة. وقد يؤدي عدم المحافظة على درجة الحرارة إلى تلف المنتج. وفي حالة نقل المواد الغذائية والخضراوات والفواكه، فإن عدم المحافظة على درجة الحرارة عند القيمة الموصى بها قد يؤدي ذلك إلى الإسراع في نضج الفواكه والخضراوات، وفقد في الوزن، وتغير في الشكل والإصابة بالفطريات والعفن. كما يجب تأمين المنتجات على الأرفف للتأكد من عدم حركتها أثناء عملية النقل لمنع تلف مكونات التغليف والمنتجات.

الحاويات المبردة (انظر شكل ١,٢) عبارة عن حاوية يتم تبريدها ميكانيكياً لنقل البضائع التي تتطلب التحكم في درجة حرارة حفظها. وتبرد هذه الحاويات بماكينات تبريد ملحقة بها تغذى بمصدر كهربائي من السفن التي تنقلها أو من نقاط تغذية أرضية بالمواقع الأرضية لشحن وتفريغ السفن، أما عند نقلها برّاً بسيارات النقل، فيتم تغذيتها بمولدات الديزل الملحقة بسيارات النقل. وتعزل جدار الحاويات جيداً باستخدام البوليوريثان الرغوي بسمك ٧٥ مم للحوائط والأرضية، و١٠٢ مم للسقف (ASHRAE 2006). ويوضح شكل ١,٣ سفينة شحن محملة بالحاويات.



شكل ١,٢ حاوية مبردة لنقل البضائع [ASHRAE 2011].

وتأتي الحاويات عادة بمقاسات قياسية محددة، فتكون بمقاس ٨ قدم مكعب (أي ٢,٤٣٨ متر مكعب)، أو بأطوال ١٠ قدم (٣,٠٥ متر)، أو ٢٠ قدم (٦,١ متر)، أو ٤٠ قدم (١٢,٢ متر). وتكون سعة الحاويات بمضاعفات السعة القياسية والتي يعطى لها الرمز TEU وهي الاختصار للمصطلح Total Equivalent Unit والتي تعني الوحدة المكافئة الكلية لحاوية بطول ٢٠ قدم وعرض ٨ قدم، ويكون الارتفاع أما ٩,٥ قدم وهو ما يعرف بحاوية بارتفاع كامل، أو ٤,٢٥ قدم وهو ما يعرف بحاوية بنصف ارتفاع. وتساعد الأبعاد القياسية للحاويات على الاستفادة القصوى من حجم تخزينها بالسفن ومواقع التحميل والتفريغ الأرضية للسفن وكذلك توفير المعدات.



شكل ١,٣ سفينة شحن محملة بالحاويات.

وتأتي عربات السكة الحديد بأطوال تتراوح من ١٥ إلى ٢٠ متراً، وتكون هذه العربات معزولة حرارياً وتحوي كل عربة معدات التبريد الخاصة بها في أحد أطرافها.

ويقتصر النقل الجوي في السلسلة الباردة عادة على البضائع المبردة (أي غير المجمدة) أو عند درجة حرارة الجو. بينما يستخدم النقل البحري في جميع التطبيقات عادة ما لم يكن عنصر الزمن هو العنصر المتحكم في أخذ القرار. وتستخدم السفن والمراكب المبردة لنقل الأحجام الكبيرة من البضائع والمنتجات. كما تستخدم سفن البضائع لنقل الحاويات المبردة (انظر شكل ١,٣). ويستخدم النقل البري المبرد (بالسيارات أو القطارات) لنقل البضائع بأي أحجام. ويوضح شكل ١,٤ أحد عربات النقل المبردة التي تقوم بنقل حاوية، ويوضح شكل ١,٥ عربة نصف نقل مبردة لنقل البضائع المبردة. يمكن في بعض وسائل نقل المواد المبردة كالشاحنات استخدام المواد المتغيرة الطور (phase change materials) في حفظ المواد المبردة، حيث يمكن تخزين البرودة (إذا صح التعبير) في هذه المواد وتحويلها عند التبريد من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة. خلال عملية النقل ودخول الحرارة إلى الشاحنة فإن المادة تمتص الحرارة وتتحول من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة. ويمكن استخدام هذه المواد في نقل المواد المبردة لمسافات قصيرة، وقد يؤدي استخدام هذه المواد إلى اختيار معدات تبريد أصغر حجماً. ويوضح الشكل ١,٦ شاحنة تم تغطيتها سقفها بالمادة متغيرة الطور.

زاد في الآونة الأخيرة استخدام النقل الجوي في نقل المواد المبردة. معظم طائرات نقل الركاب لها القدرة أو هي مهيأة لنقل البضائع والمواد المبردة. ولأن نقل الركاب من مكان إلى آخر يتم حسب جدول محدد، فإنه أيضاً يمكن الاستفادة من ذلك في نقل المواد المبردة في حاويات خاصة للطائرات على متن طائرة الركاب ذاتها في أماكن مخصصة للمواد المبردة. ويبين الشكل (١,٧) جسم

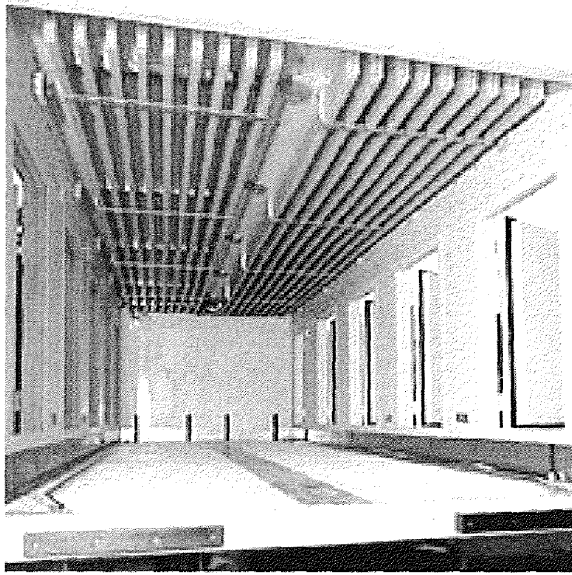
طائرة، حيث تم تقسيم الطائرة إلى جزأين أحدهما للركاب والآخر كمستودع للمواد.



شكل ١,٤ عربة نقل حاوية بها بضائع مبردة.



شكل ١,٥ عربة نصف نقل مبردة.



شكل ١,٦ شاحنة لنقل المواد المبردة تم تغطية سقفها بشرايح بها مادة متغيرة الطور
(www.frigoblock.com).

طائرة بـ ٦ منصات



طائرة بـ ٨ منصات



طائرة بـ ١٠ منصات



شكل ١,٧ أنواع من الطائرات العريضة الحاملة للركاب والمواد المبردة (ASHRAE 2006).

من المعلوم أنه كلما زاد ارتفاع الطائرة عن سطح البحر فإن درجة الحرارة تقل، ويمكن الاستفادة من ذلك في التحكم في درجات الحرارة في المكان المخصص لتخزين المواد حسب نوعها ورغبة المشغل.

وبطبيعة الحال، فإن المستوى المتدني من درجات الحرارة غير متوفر على الأرض، ولذلك لا بد من المحافظة على درجة حرارة المواد المخزنة على الأرض باستخدام وسيلة أخرى مثل استخدام الثلج الجاف أو التبريد الأولي. وقد يتوفر في بعض المطارات أماكن خاصة لتخزين المواد المبردة.

من المواد التي يتم نقلها عن طريق الجو: الفواكه والخضراوات، والورود والأزهار، واللحوم، وصغار الطيور، والمأكولات البحرية، والأجزاء البشرية، والمواد الطبية، وغيرها.

و يمكن نقل المواد المبردة بسرعة قبل فسادها، وخصوصا إذا كان نقلها بالبر أو البحر قد يسبب تلفها، كما أن العامل الاقتصادي يلعب دوراً مهماً في اختيار النقل الجوي كوسيلة لنقل المواد المبردة، خصوصا عند قلة المعروض وارتفاع الأسعار، ويعتبر مثال نقل الورود والأزهار أفضل مثال على ذلك، حيث تصل الأزهار إلى المستهلك وكأنها قطفت للتو.

وطبقا للتقرير الذي أعده هيب في عام ٢٠٠٦ (Heap 2006)، فإن أعداد السفن المبردة المستخدمة في العالم تقدر بحوالي ١٣٠٠ سفينة، بينما يقدر عدد عربات السكة الحديد المبردة بحوالي ٨٠,٠٠٠ عربة، وحوالي ٦٥٠,٠٠٠ حاوية مبردة، وحوالي ١,٢ مليون سيارة نقل مبردة. ولقد أفاد تقرير هيب أيضا بأن تلف المنتجات المبردة أو المجمدة نتيجة مشاكل بمخازن التبريد تمثل حوالي أربعة أضعاف التلف نتيجة مشاكل وسائل النقل. يبين الشكل ١,٨ إحدى وسائل عرض المواد المبردة في الأسواق الكبيرة، حيث تم تصميم ثلاثة العرض على

شكل رفوف وشكل جذاب وفي نفس الوقت المحافظة على درجة حرارة المواد المبردة (أو المجمدة) حتى تصل إلى يد المستهلك.



شكل ١,٨ ثلاثة عرض للمنتجات المبردة (www.coolfast.com).

١,٧ التبريد الأولي

تحتاج المنتجات إلى تبريد أولي قبل حفظها ثم نقلها إلى المستهلك، ولكن متى وأين يتم التبريد الأولي؟ يفضل في العموم تبريد المنتجات أولياً قبل بدء عملية الشحن، ويتم ذلك في أنفاق التبريد لضمان سرعة عملية التبريد وجودتها، نظراً لصغر معدات التبريد في وسائل الشحن، حيث تعمل هذه المعدات فقط على تعويض الحرارة المكتسبة أثناء عملية الشحن. ويختلف الوضع في بعض الحالات الخاصة. فمثلاً، يتم عملياً نقل الموز والليمون بدرجة حرارة الجو مباشرة إلى وسيلة النقل، حيث يتم التبريد أثناء عملية الشحن.

١,٨ الجمعيات والهيئات الدولية

هناك عدة جمعيات وهيئات دولية تعمل على وضع التشريعات والقواعد لعمل مخازن التبريد لضمان الأداء الأمثل لمكونات سلسلة التبريد. ومن هذه الجمعيات والهيئات على سبيل المثال وليس الحصر الآتي:

الاتحاد الدولي للمخازن المبردة International Association of Refrigerated Warehouses (IARW) ومقره مدينة الإسكندرية بولاية فيرجينيا بالولايات المتحدة الأمريكية. (<http://www.iarw.org>)

المنظمة العالمية لإمداد الغذاء The World Food Logistics Organization (WFLO) ومقرها مدينة الإسكندرية بولاية فيرجينيا بالولايات المتحدة الأمريكية. (<http://www.iarw.org/wflo>)

المعهد الدولي لتبريد الأمونيا The International Institute of Ammonia Refrigeration (IIAR) ومقره مدينة الإسكندرية بولاية فيرجينيا بالولايات المتحدة الأمريكية. (<https://www.iiar.org>)

الاتحاد الدولي للنقل المبرد The International Refrigerated Transportation Association (IRTA) ومقره مدينة الإسكندرية بولاية فيرجينيا بالولايات المتحدة الأمريكية. (<http://www.irta.org>)

الاتحاد الدولي لبناء مخازن التبريد The International Association for Cold Storage Construction (IACSC) ومقره مدينة الإسكندرية بولاية فيرجينيا بالولايات المتحدة الأمريكية. (<http://www.iacsc.org>)

الاتحاد الأوروبي لمخازن التبريد والإمداد European Cold Storage and Logistics Association (ECSLA) ومقره بروكسل في بلجيكا. (<http://www.ecsla.be>)

الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) ومقرها مدينة أتلانتا بولاية جورجيا بالولايات المتحدة الأمريكية. (www.ashrae.org)

المعهد العالمي للتبريد International Institute of Refrigeration، باريس، فرنسا.

التحالف العالمي لسلسلة التبريد Global Cold Chain Alliance.
(<http://iarw.org/gcca>)

وتقوم بعض هذه الجمعيات أيضا بتنظيم المؤتمرات الدولية والمعارض التي تهدف إلى التعرف على أحدث التقنيات المستخدمة في سلسلة التبريد، والتوعية بالمشاكل والتحديات التي تواجه صناعاتها المختلفة ووضع التوصيات اللازمة للتغلب عليها.

الفصل الثاني

مبادئ هندسة التبريد بانضغاط البخار

٢,١ الدورة المثالية للتبريد بانضغاط البخار

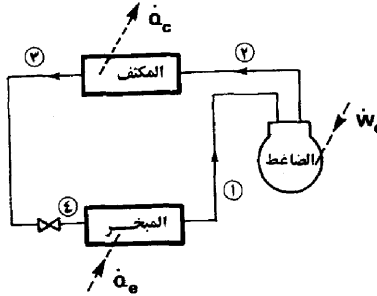
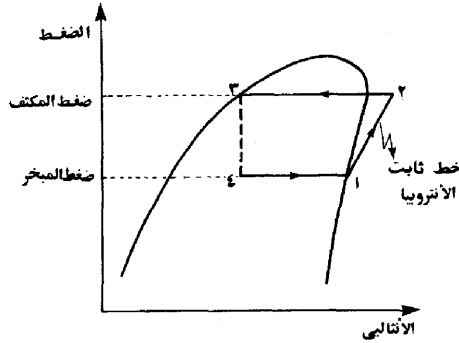
تتكون الدورة المثالية البسيطة للتبريد بانضغاط البخار من أربعة مكونات أساسية هي: المبخر، والضاغط، والمكثف، وصمام التمدد، كما هو مبين بشكل ٢,١. تعمل الدورة بمائع يعرف بالمبرد. ويتغير ضغط المبرد بين الضغط المنخفض بالمبخر والضغط العالي بالمكثف، وعليه تكون وظيفة الضاغط هي رفع ضغط بخار المبرد الخارج من المبخر عند الضغط المنخفض إلى الضغط العالي بالمكثف، بينما يقوم صمام التمدد بالعملية العكسية أي خفض الضغط لسائل المبرد الخارج من المكثف إلى ضغط المبخر. يعطي المبخر التأثير التبريدي للدورة عن طريق تبخير سائل المبرد الداخل إلى المبخر، مما ينتج عنه سحب حرارة من الحمل الحراري. أما المكثف فيعمل على طرد الحرارة وتكثيف بخار المبرد الخارج من الضاغط.

تتكون الدورة البسيطة المثالية للتبريد بانضغاط البخار من أربع عمليات مثالية. ويبين شكل ٢,١ تمثيل هذه العمليات على خريطة الضغط- الإنثالبي للمبرد المستخدم بالدورة. ويفرض أن النقاط ١ و ٢ و ٣ و ٤ تمثل حالات اتزان ثرموديناميكي بين المكونات المختلفة بالدورة، فإن العمليات الأربعة بالدورة تكون عندئذ كما يلي :

العملية ١-٢: انضغاط رجعي (انعكاسي) بدون انتقال حرارة، أي انضغاط إيزنتروبي أو انضغاط ثابت الأنثروبيا.

العملية ٢-٣: طرد حرارة (لتكثيف بخار المبرد) مع ثبات الضغط.

العملية ٣-٤: خنق سائل المبرد (وتعرف أيضًا هذه العملية بتمدد سائل المبرد)، أي خفض الضغط مع ثبات الإنثالبي.



شكل ٢،١ الدورة المثالية البسيطة للتبريد بانضغاط البخار (مكوناتها الرئيسية وتمثيلها على خريطة الإنثالبي - الضغط).

العملية ٤-١: تبخير المبرد مع تبريد الوسط المحيط مع ثبات الضغط، وبالتالي الحصول على التأثير التبريدي.

لإيجاد قدرة الضاغط والحرارة المسحوبة في المبخر والحرارة المطرودة من المكثف، يتم عمل أتران للطاقة (أي تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية) لكل من الضاغط و المبخر و المكثف).

تقدر قدرة الضاغط تبعًا للعملية ١-٢ عالية كما يلي

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2.1)$$

حيث $\dot{m}$ هي معدل سريان المبرد بالدورة، و h هي إنثالبي المبرد عند الحالة المعنية. أيضًا يقدر معدل الحرارة المطرودة بالمكثف ومعدل الحرارة المكتسبة بالمبخر كما يلي، على التوالي

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (2.2)$$

$$\dot{Q}_e = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (2.3)$$

ومن القانون الأول للديناميكا الحرارية يلزم تحقق الآتي

$$\dot{W}_c = \dot{Q}_c - \dot{Q}_e \quad (2.4)$$

أو ما يعرف باتزان الطاقة للدورة. ويقيم أداء الدورة بمعامل الأداء COP الذي يعرف كنسبة معدل تبريد الحمل بالمبخر إلى قدرة الضاغط، أي إن

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_c} \quad (2.5)$$

وباستخدام معادلة (2.4) يمكن أيضًا أن يكتب معامل الأداء كما يلي:

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_c - \dot{Q}_e} \quad (2.6)$$

ويفضل عادة مقارنة معامل أداء الدورة بمعامل أداء دورة كارنوت (Carnot) العكسية، وهي دورة مثالية، تعمل عند نفس ظروف دورة التبريد بانضغاط البخار

(أي عند نفس درجتي حرارة التبخر T_e والتكثف T_c) ولها أعلى معامل أداء يسمح به القانون الثاني للديناميكا الحرارية. ويعرف معامل أداء دورة كارنوت العكسية كما يلي

$$COP_c = \frac{T_e}{T_c - T_e} \quad (2.7)$$

حيث T_c و T_e هما على التوالي درجات الحرارة بالمبخر والمكثف بالدرجة المطلقة. عندئذ تعرف الكفاءة النسبية لدورة التبريد بانضغاط البخار بأنها النسبة بين COP للدورة و COP_c لدورة كارنوت العكسية التي تعمل عند نفس ظروف التشغيل، أي إن

$$\eta_r = \frac{COP}{COP_c} \quad (2.8)$$

٢,٢ موانع التبريد (المبردات)

تحتاج دورة التبريد بانضغاط البخار التي قدمناها في الجزء السابق إلى مائع تبريد يسري بين مكوناتها المختلفة، ويكون بمثابة الدم في الكائن الحي، فيقوم بالعمليات المختلفة في الدورة، وسنشير إلى مائع التبريد هذا باسم المبرد. ويعتمد اختيار نوع المبرد بنظام التبريد على التطبيق المستخدم به. ولقد قامت الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء بتحديد حوالي أكثر من ٨٥ مبردًا تستخدم في صناعة التبريد [ASHRAE 2009] وتم وضع رقم مرجعي (كودي) لكل مبرد. وأكثر المبردات شيوعًا في صناعة التبريد هي مبردات الهالوكربونات، وهي الموائع التي أصلها هيدروكربونات ويدخل في تركيبها الكيميائي ذرة أو أكثر من الكلور، و/أو الفلور و/أو البرومين. وفي هذه المبردات يُحدد الرقم الكودي من ثلاثة أرقام: الرقم الأول على اليمين يمثل عدد ذرات الفلور في المبرد، والرقم

الثاني من اليمين يزيد بواحد عن عدد ذرات الهيدروجين في المبرد، أما الرقم الثالث من اليمين فيقل واحدًا عن عدد ذرات الكربون في المبرد، ويُهمل الرقم الثالث إذا كانت قيمته صفرًا. فمثلاً أحادي كلوريد- ثنائي فلوريد الميثان ويرمز له كيميائيًا بالرمز CHClF_2 يكون رقمه المرجعي هو ٢٢، وعليه يعرف بمبرد ٢٢، أما ثلاثي كلوريد- ثلاثي فلوريد الميثان ويرمز له كيميائيًا بالرمز CCl_3F فيكون رقمه المرجعي هو ١١٣ ويعرف عندئذ بمبرد ١١٣. كما تستخدم في صناعة التبريد أيضًا بعض الموائع غير العضوية، ومن أهمها: الأمونيا، وثنائي أكسيد الكربون، وثنائي أكسيد الكبريت، والماء، والهواء، وغيرها. ويحدد الرقم المرجعي لهذه المبرّدات بطريقة مختلفة عن الهالوكربونات، حيث يضاف رقم ٧٠٠ إلى الوزن الجزيئي للمبرد. فمثلاً الوزن الجزيئي للأمونيا هو ١٧، فيكون رقمها المرجعي هو ٧١٧، وتعرف الأمونيا عندئذ بمبرد ٧١٧، أما الماء فيعرف بمبرد ٧١٨ حيث إن وزنه الجزيئي يساوي ١٨.

وتعطى الخواص الحرارية للمبرّدات عادة في جداول بدلالة درجة الحرارة أو الضغط في منطقة التشبع، وبدلالة كليهما في منطقة التحميص (التسخين الفوقي). أيضًا تعطى هذه الخواص في خرائط الضغط - الإنثالبي لسهولة توقيع العمليات المختلفة لدورة التبريد على هذه الخرائط. ويعطي ملحق أ جداول الخواص وخرائط الضغط - الإنثالبي لمبرد ٢٢ ومبرد ١٣٤ ومبرد ٧١٧ (الأمونيا) الشائعة الاستخدام في مخازن التبريد [ASHRAE 2009]. كما توجد برامج كمبيوتر لإيجاد خواص المبرّدات، مثل: إيبز [EES]، و برنامج رف بروب (Ref Prop) من نيست [NIST 2007].

مثال ٢,١

تعمل دورة للتبريد بانضغاط البخار، وتستخدم مبرد ٢٢، بين درجة حرارة مكثف قدرها 30°C ودرجة حرارة مبخر قدرها -10°C . بفرض حالة التشبع للسائل

عند الخروج من المكثف وحالة التشبع عند الخروج من المبخر، احسب الآتي لكل كيلووات واحد تبريد في المبخر:

(أ) معدل سريان حجم البخار الداخل إلى الضاغط.

(ب) معدل طرد الحرارة من المكثف.

(ج) معامل أداء الدورة.

(د) الكفاءة النسبية للدورة.

الحل

ملحق أ يحتوي على خواص المبردات. باستخدام برنامج REFPROP8 من [NIST 2007] وباستخدام شكل ٢،١ والمعطيات المعطاة عاليه، نجد خواص مبرد ٢٢ عند النقاط المختلفة بالدورة كما يلي:

الحالة	درجة الحرارة مئوية	الضغط كيلوبيسكال	الإنثالبي كيلوجول/كجم	الحجم النوعي م ^٣ /كجم
١	١٥-	٢٩٦,٢	٣٩٩,٢	٠,٠٧٧٥
٢	٥٣	١١٩١,٩	٤٣٤	
٣	٣٠	١١٩١,٩	٢٣٦,٦	
٤	١٥-	٢٩٦,٢	٢٣٦,٦	

ويمكن استخدام الجداول لتحديد جميع الخواص ما عدا الإنثالبي لنقطة ٢ والتي يمكن الحصول عليها من خريطة الضغط - الإنثالبي لمبرد ٢٢.

(أ) يحسب معدل سريان كتلة المبرد في الدورة من معادلة (2.3) كما يلي

$$\dot{m} = \frac{1}{399.2 - 236.6} = 0.00615 \text{ kg/s}$$

وعليه يحسب معدل سريان حجم البخار عند دخول الضاغط كما يلي

$$\dot{V} = \dot{m} \times v_1 = 0.00615 \times 0.0775 = 4.77 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

(ب) يحسب معدل الحرارة المطرودة من المكثف كما يلي:

$$\dot{Q}_c = 0.00615 \times (434. - 236.6) = 1.214 \text{ kW}$$

تحسب القدرة اللازمة لعملية الانضغاط كما يلي

$$\dot{W}_c = 0.00615 (434. - 399.2) = 0.214 \text{ kW}$$

(ج) ويقدر معامل أداء الدورة عندئذ كما يلي

$$\text{COP} = \frac{1}{0.214} = 4.67$$

لدورة كارنوت تعمل بين -15°C و 30°C فإن معامل أداء الدورة

$$\text{COP}_c = \frac{-15 + 273}{30 - (-15)} = 5.73$$

(د) تحسب الكفاءة النسبية للدورة من معادلة (2.8) كما يلي

$$\eta_r = \frac{4.67}{5.73} = 0.815$$

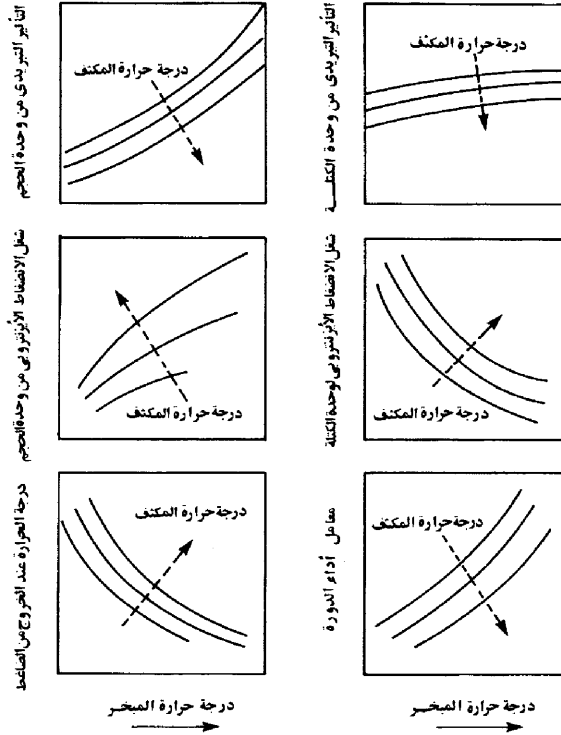
٢,٣ تأثير درجتي حرارة المكثف والمبخر على أداء الدورة المثالية

تؤثر درجتا حرارة المكثف والمبخر إلى حد كبير على أداء الدورة المثالية للتبريد بانضغاط البخار. وتتغير هاتان الدرجتان تبعاً للظروف الخارجية والداخلية لدورة التبريد. فتتغير درجة حرارة المكثف تبعاً لدرجة حرارة الهواء المحيط / الماء المستخدم في تبريد المكثف، وتتغير درجة حرارة المبخر تبعاً لدرجة حرارة الحمل الحراري للمبخر.

من شكل ٢,١ يقدر التأثير التبريدي لوحدة كتلة المبرد بالمبخر كما يلي

$$q_e = h_1 - h_3 \quad (2.9)$$

ومن خرائط الضغط - الإنثالبي للمبردات يتضح زيادة قيمة التأثير التبريدي لوحدة الكتلة بزيادة درجة حرارة المبخر (نظراً لزيادة قيمة h_1) و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف (نظراً لانخفاض قيمة h_3)، انظر شكل ٢،٢.



شكل ٢،٢ تغير أداء دورة التبريد المثالية مع تغير درجة حرارة المكثف والمبخر بالدورة.

ويهتم مهندس التبريد عادة بحساب قيمة التأثير التبريدي لوحدة حجم البخار عند دخوله الضاغط، حيث يعتمد حجم الضاغط على حجم بخار المبرد الداخل إليه. عندئذ يقدر التأثير التبريدي لوحدة الحجم كما يلي

$$q_{e,v} = (h_1 - h_3) / v_1 \quad (2.10)$$

حيث v_1 هي الحجم النوعي للمبرد عند دخول الضاغط. وبحساب قيمة $q_{e,v}$ من العلاقة السابقة لمبردات مختلفة، وجد أيضًا أن هذه القيمة تزيد بزيادة درجة حرارة المبخر و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف، انظر شكل ٢,٢، إلا أن الزيادة مع ارتفاع درجة حرارة المبخر تكون كبيرة نسبيًا نتيجة صغر قيمة v_1 كلما ارتفعت درجة حرارة المبخر.

يعتبر شغل الانضغاط الأيزنتروبي عاملاً آخر من العوامل التي تؤخذ في الاعتبار عند دراسة الدورة المثالية، حيث يمثل هذا الشغل تكلفة التشغيل. ويقدر شغل الانضغاط الأيزنتروبي لكل وحدة كتلة من المبرد، ولكل وحدة حجم عند دخول الضاغط، على التوالي، كما يلي

$$w = h_2 - h_1 \quad (2.11A)$$

$$w_v = (h_2 - h_1) / v_1 \quad (2.11B)$$

وبين شكل ٢,٢ انخفاض قيمة w بزيادة درجة حرارة المبخر و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف. وبين الشكل أيضًا أن w_v يقل بانخفاض درجة حرارة المكثف ويزيد بزيادة درجة حرارة المبخر (التي تسبب صغر الحجم النوعي v_1).

يمثل معامل أداء دورة التبريد، المعرف بالمعادلة (2.5)، مقدار التبريد الذي تعطيه الدورة لكل وحدة من شغل الانضغاط. وبين شكل ٢,٢ تغير معامل أداء الدورة مع تغير درجتي حرارة المبخر والمكثف، وكما هو مبين بالشكل يتحسن معامل الأداء بزيادة درجة حرارة المبخر و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف.

أيضًا يهتم مهندسو التبريد بدرجة حرارة الخروج من الضاغط، حيث تمثل هذه الدرجة أعلى درجة حرارة بالدورة. وتعمل هذه الدرجة إذا زادت عن حد

معين على تحلل زيت التزييت بالضاغط. ويبين شكل ٢,٢ انخفاض هذه الدرجة بارتفاع درجة حرارة المبخر و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف. ويعني هذا ارتفاع درجة الحرارة عند الخروج من الضاغط بشكل كبير إذا انخفضت درجة المبخر. لذا يلزم في تطبيقات التبريد التي تعمل عند درجة حرارة منخفضة نسبياً، استخدام أكثر من مرحلة واحدة بالضاغط، مع تبريد البخار بين هذه المراحل، للحد من ارتفاع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من المرحلة العليا بالضاغط.

مما سبق يتبين تحسن أداء دورة التبريد - بصفة عامة - بارتفاع درجة حرارة المبخر و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف. لذا يجب على مهندسي التبريد تصميم نظام التبريد عند أعلى درجة حرارة ممكنة بالمبخر تبعاً للتطبيق المستخدم. كذلك، يجب العمل دائماً على خفض درجة حرارة المكثف، ما أمكن، للحصول على أفضل أداء لدورة التبريد.

٢,٤ الحيود عن الدورة المثالية للتبريد بانضغاط البخار

تحديد الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار عن الدورة المثالية لعدة أسباب منها الآتي:

(أ) انتقال الحرارة إلى المبرد في المواسير الواصلة بين المكونات المختلفة، بينما يفترض في الدورة المثالية استخدام عازل حراري مثالي لهذه الأنابيب.

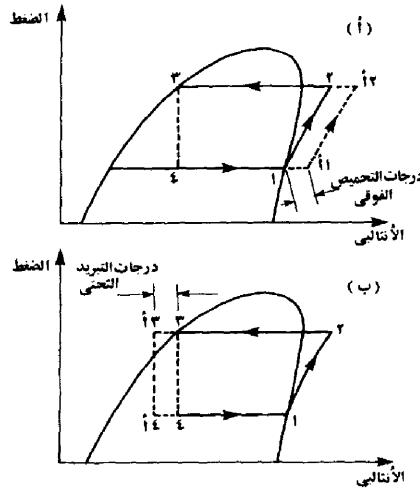
(ب) فقد الضغط خلال سريان المبرد في الأنابيب الواصلة بين المكونات المختلفة، وخلال السريان داخل المكونات المختلفة للدورة.

(ج) حيود عملية الانضغاط في الضاغط عن عملية الانضغاط المثالية.

وفي الأجزاء التالية نقدم حيود الدورة الفعلية للتبريد عن الدورة المثالية نتيجة كل سبب من الأسباب السابقة على حدة، ثم نتيجة الأسباب الثلاثة مجتمعة معاً.

٢,٤,١ انتقال الحرارة بين الجو المحيط وخطوط المبرد

يخرج بخار المبرد من المبخر عند درجة حرارة أقل من الجو المحيط مما يؤدي إلى انتقال الحرارة من الجو المحيط إلى بخار المبرد في خط السحب. وبفرض خروج بخار المبرد في حالة التشبع، فإن انتقال الحرارة إلى البخار يعمل على رفع درجة حرارته كما هو مبين بشكل ٢,٣ (الحالة أ). ويؤدي تسخين البخار قبل دخول الضاغط إلى العيوب الآتية:



شكل ٢,٣ مقارنة الدورة الفعلية للتبريد بالضغط البخار بالدورة المثالية: (أ) تأثير التبريد الفوقى للبخار قبل دخول الضاغط، (ب) تأثير التبريد التحتى للسائل قبل دخول صمام التمدد.

أ) زيادة حجم البخار المسحوب بالضاغط، مما يعنى انخفاض معدل سريان كتلة المبرد التي ينالها الضاغط، أي انخفاض قيمة $\dot{m}$.

ب) زيادة قيمة شغل الانضغاط في الضاغط.

ج) ارتفاع درجة حرارة البخار الخارج من الضاغط (انظر الحالة أ بشكل ٢,٣) مما قد يؤدي إلى تحلل زيت التزييت المحمول مع بخار المبرد الخارج من الضاغط.

(د) انخفاض سعة التبريد التي يعطيها الضاغط نظراً لانخفاض قيمة m كما
 بينا في البند أ عاليه، وذلك بفرض أن انتقال الحرارة تم في خط السحب
 خارج المكان المطلوب تبريده.
 (هـ) انخفاض معامل أداء الدورة نتيجة البندين (ب) و(د) عاليه.

ويفضل عادة تحميل البخار قبل دخوله للضاغط، مما يعمل على حماية
 الضاغط من دخول بعض سائل المبرد إليه، فيسبب تلفه ميكانيكياً. وعموماً، يجب
 عزل خط السحب حرارياً لمنع انتقال الحرارة إليه للعيوب التي بينهاها سابقاً.
 ويفضل أن يتم تحميل البخار بعدد محدود من درجات التحميص الفوقية داخل
 المبخر نفسه، لحماية الضاغط من دخول قطرات سائل المبرد إليه.

يتعرض خط الطرد من الضاغط إلى فقد حرارة من بخار المبرد الساخن
 (الغاز الساخن) إلى الجو المحيط. ويعمل هذا الفقد على تقليل الحمل الحراري
 للمكثف، مما يساعد على تصغير الحجم للمكثف. لذا يفضل عادة ترك هذا الخط
 عازياً دون عزل حراري، إلا إذا خشي من حدوث أي ضرر نتيجة لمس السطح
 الساخن لخط الطرد.

يمكن أيضاً للحرارة أن تنتقل بين الجو المحيط وسائل المبرد بخط السائل بين
 المكثف وصمام التمدد. وهناك احتمالان لانتقال الحرارة: إما أن تنتقل من سائل
 المبرد إلى الجو المحيط أو من الجو المحيط إلى سائل المبرد تبعاً لدرجة حرارة
 سائل المبرد ودرجة حرارة الجو المحيط. ففي حالة استخدام المكثفات المبردة
 بالهواء، تكون درجة حرارة سائل المبرد الخارج من المكثف أعلى عادة من درجة
 حرارة الجو المحيط بعدة درجات مئوية، مما يساعد على انتقال الحرارة من سائل
 المبرد بخط السائل إلى الجو المحيط، فيتم تبريده بعدة درجات من التبريد التحتي،
 كما هو مبين بشكل ٢،٣ (الحالة ب). ويؤدي هذا التبريد إلى زيادة قيمة التأثير

التبريدي بالمبخر مع المحافظة على معدل سريان المبرد ثابتاً، أي تحسين سعة التبريد بالدورة، وبالتالي تحسين معامل أداء الدورة. لذا يفضل في مثل هذه الحالة ترك خط السائل دون عزل حراري. أما في حالة استخدام المكثفات المبردة بالماء، فهناك احتمالان: الاحتمال الأول أن تكون درجة حرارة ماء التبريد مقاربة لدرجة حرارة الجو فيؤدي هذا إلى ارتفاع درجة حرارة سائل التبريد عن درجة حرارة الجو المحيط، وتنتقل الحرارة عندئذ من سائل المبرد إلى الجو المحيط، وينتج عن ذلك نفس النتائج التي قدمناها سابقاً عند استخدام المكثفات المبردة بالهواء. أما الاحتمال الثاني فينتج إذا كانت درجة حرارة ماء التبريد تقل، بدرجة ملحوظة، عن درجة حرارة الجو المحيط، مما يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة سائل المبرد عند الخروج من المكثف عن درجة حرارة الجو المحيط. وتنتقل الحرارة حينئذ من الجو المحيط إلى سائل المبرد، مما يعمل على تبخير جزء منه. ويؤدي هذا، بالتالي، إلى العيوب الآتية:

- أ) اضطراب أداء صمام التمدد حيث يعمل الصمام بصورة مرضية فقط إذا كان السريان لا يحوي بخاراً.
- ب) تآكل مقعد صمام التمدد نتيجة مرور البخار به.
- ج) انخفاض قيمة التأثير التبريدي بالمبخر نظراً لتبخير جزء من المبرد قبل دخول المبخر.
- د) انخفاض سعة التبريد بالدورة نتيجة البند (ج)، وبالتالي انخفاض قيمة معامل أداء الدورة.

في الأجزاء السابقة قدمنا تأثير انتقال الحرارة بين الجو المحيط وخطوط المبرد المختلفة، ويلاحظ هنا عدم الإشارة لخط المبرد الواصل بين صمام التمدد والمبخر نظراً لقصر هذا الخط، حيث يوضع صمام التمدد أقرب ما يمكن من

المبخر، وفي بعض الأحيان يلغى هذا الخط كلياً، فيوضع صمام التمدد مباشرة عند وصلة دخول المبخر.

٢،٤،٢ فقد الضغط في خطوط المبرد وفي المكونات المختلفة للدورة

ينتج عن سريان المبرد في الخطوط الواصلة بين المكونات المختلفة، وداخل المكثف والمبخر، فقداً في الضغط نتيجة احتكاك السريان مع الأسطح المختلفة، ويؤدي هذا الفقد إلى حيود دورة التبريد عن الدورة المثالية، التي قدمناها فيما سبق. ويبين شكل ٢،٤ دورة التبريد الفعلية بعد أخذ فقد الضغط في الاعتبار (الرسم لا يعبر عن الفقد الفعلي لمقدار الضغط، وفقد الضغط بالرسم مبالغاً فيه للتوضيح فقط).

بسريان بخار المبرد خلال خط السحب ينخفض الضغط كما هو مبين بالشكل من الضغط P_1 إلى الضغط P_{1A} ، كما يبين الشكل ٢،٤ فقد الضغط بسبب صمام السحب من أ إلى ب، ويتسبب هذا في العيوب الآتية:

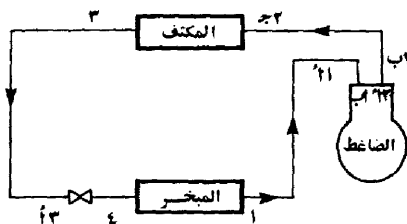
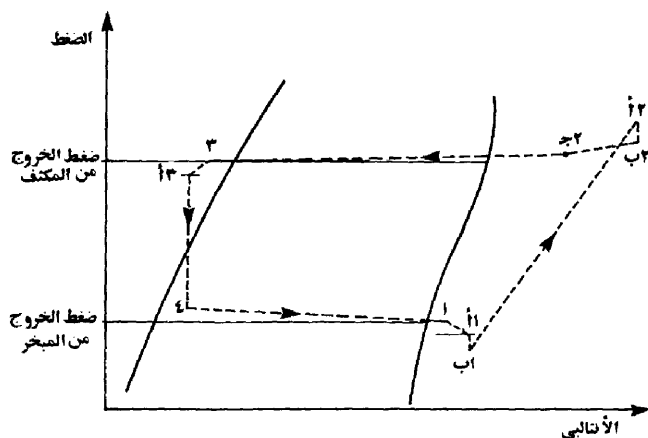
(أ) ارتفاع قيمة الحجم النوعي لبخار المبرد عند دخول الضاغط، مما يعني انخفاض معدل السريان الذي يناوله الضاغط.

(ب) انخفاض سعة تبريد الضاغط نتيجة السحب (أ) سابقاً.

(ج) ارتفاع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من الضاغط، مما قد يؤدي إلى تحلل زيت التزييت المحمول مع بخار الماء.

لذا يجب على المصمم العمل على خفض فقد الضغط في خط السحب للتخلص من العيوب السابقة. ويتم هذا بخفض سرعة بخار المبرد في خط السحب، إلا أن هذا يؤدي إلى عدم تمكن بخار المبرد من حمل زيت التزييت إلى الضاغط، مما يتطلب مرة أخرى رفع السرعة بخط السحب. ويعمل المصمم عندئذ على التوفيق بين مطلبي خفض فقد الضغط بخط السحب ورفع سرعة البخار بخط

السحب لحمل زيت التزييت، ويمكن الرجوع إلى جداول تصميم خطوط السحب لمزيد من التفصيل حول هذا الموضوع [ASHRAE 1986, 1990].



شكل ٢, ٤ فقد الضغط في خطوط المبرد في المكونات المختلفة بدورة التبريد بانضغاط البخار.

يفقد الضغط قبل خروجه من الضاغط بسبب صمام الطرد من ٢ إلى ٢، كما يفقد الضغط في خط الطرد من ٢ إلى ٢، انظر الشكل ٢, ٤.

يُفقد الضغط أيضًا في خط الغاز الساخن بين الضاغط والمكبث (انظر شكل ٢, ٤). ويُهمل هذا الفقد في معظم نظم التبريد، حيث يوضع المكثف مباشرة بالقرب من الضاغط، مما يعني قصر طول هذا الخط. إلا أن بعض النظم تحوي مكثفات

على مسافة بعيدة نسبياً من الضاغط مما يستلزم أخذ فقد الضغط بهذا الخط في الاعتبار. ويسبب فقد الضغط في خط الغاز الساخن العيوب الآتية:

(أ) رفع ضغط الطرد بالضاغط مما يؤدي إلى زيادة الشغل اللازم لعملية الانضغاط، دون تغيير معدل سريان المبرد خلال الضاغط.

(ب) خفض معامل الأداء لدورة التبريد.

(ج) رفع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من الضاغط.

لهذه الأسباب يجب العمل على خفض فقد الضغط في خط الغاز الساخن ما أمكن، وإن كان هذا يتعارض عادة مع سرعة الغاز اللازمة لحمل زيت التزييت معه. لذا، ينصح أيضاً عند تصميم هذا الخط الرجوع إلى الجداول الخاصة بذلك [ASHRAE 1986, 1990].

يتعرض سريان المبرد في المكثف إلى فقد بالضغط، وإن كانت المكثفات تصمم عادة لخفض هذا الفقد، ويسبب فقد الضغط بالمكثف نفس العيوب السابقة التي يسببها فقد الضغط بخط الغاز الساخن. ويتراوح فقد الضغط في المكثف عادة بين ١٠ إلى ٢٠ كيلوبسكال.

يتعرض سريان المبرد أيضاً لفقد ضغط في خط السائل من المكثف (أو المستقبل) إلى صمام التمدد. ويسبب هذا انخفاض مقدار التبريد التحتي لسائل المبرد أو تبخر جزء منه، وذلك تبعاً لحالة المبرد الخارج من المكثف، وتبعاً لمقدار فقد الضغط. ففي الحالة المبينة بشكل ٢،٤ تسبب فقد الضغط بخط السائل في خفض الضغط من P_3 إلى P_{3A} ، مسبباً تبخر جزء من السائل (انظر حالة المبرد عند الحالة ٣ مقارنة بالحالة ٣). ويسبب فقد الضغط في خط السائل العيوب الآتية:

(أ) انخفاض ضغط دخول صمام التمدد، مما يؤدي إلى اضطراب أداء الصمام.

(ب) في حالة تبخر جزء من المبرد قبل دخول صمام التمدد، يسبب البخار اضطراب أداء صمام التمدد، كما يسبب تآكل مقعد فتحة الصمام.

ولا يؤدي انخفاض الضغط بخط السائل إلى خفض معدل السريان إلى المبخر، حيث إن هذا الفقد كان سيحدث على أية حال في صمام التمدد إذا لم يحدث في خط السائل. لذا لا يهتم المصمم بفقد الضغط في خط السائل إذا كانت درجات التبريد التحتي للسائل الخارج من المكثف أو المستقبل كافية للتغلب على هذا الفقد، ومنع تبخر جزء منه.

يتعرض سريان المبرد أخيراً لفقد في المبخر نفسه. بالطبع يُهمل عادة فقد الضغط في وصلة الأنابيب بين صمام التمدد والمبخر، نظراً لقصر هذه الوصلة، ما لم يوجد موزع مبرد بين صمام التمدد والمبخر، عندئذٍ يعتبر فقد الضغط في الموزع مكملًا لفقد الضغط في صمام التمدد، ولا يؤثر بأيّة حال على أداء دورة التبريد. ويسبب فقد الضغط في المبخر رفع درجة الحرارة المؤثرة في المبخر، وبالتالي يعمل هذا على رفع درجة حرارة الحمل الحراري. بمعنى آخر يجب على الضاغط العمل عند ضغط سحب أقل من ضغط السحب المناظر للدورة المثالية للحصول على نفس درجة الحرارة المؤثرة للمبخر (أي نفس درجة الحرارة للحمل الحراري)، مما يؤدي إلى زيادة شغل الانضغاط، وبالتالي انخفاض معامل أداء الدور. أيضاً، يؤدي هذا إلى زيادة حجم بخار المبرد عند سحب الضاغط، فينخفض معدل سريان المبرد بالضاغط، وبالتالي تنخفض سعة تبريده، وينخفض معامل أداء الدورة مرة أخرى. لذلك يجب تصميم المبخرات عند الحد الأدنى لفقد الضغط بها. ويقدر فقد الضغط بالمبخرات عادة بحوالي من ١٠ إلى ٢٠ كيلوبسكال.

٢,٤,٣ حيود عملية الانضغاط عن عملية الانضغاط المثالية

تتم عملية الانضغاط بالدورة المثالية بعملية أيزونترودية، أي عملية أدياباتية انعكاسية. ويصعب عملياً إجراء مثل هذه العملية لعدة أسباب، منها:

(أ) وجود فقد ضغط بالسريان خلال صمامات السحب و/أو الطرد بالضاغط.

(ب) وجود احتكاك بين السريان والسطح الداخلي بالضاغط، مما يمنع حدوث عملية انضغاط انعكاسية.

ويؤدي فقد الضغط في صمامي السحب والطرْد بالضاغط، كما هو مبين بشكل ٢,٥ إلى:

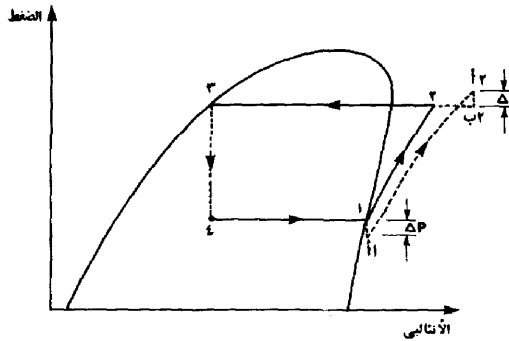
(أ) زيادة حجم البخار الداخل إلى الضاغط (نتيجة كبر الحجم النوعي لبخار المبرد عند الحالة أ مقارنة بالحالة ١) وبالتالي خفض معدل سريان المبرد الذي ينالوه الضاغط، أي خفض سعة تبريد الضاغط.

(ب) زيادة شغل الانضغاط لكل وحدة كتلة ينالوها الضاغط.

(ج) ارتفاع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من الضاغط.

ولقد ناقشنا تأثير هذه العيوب من قبل على أداء دورة التبريد في أجزاء سابقة من الفصل الحالي.

ويسبب الانضغاط اللانعكاسي الأدياباتي، مقارنة بالانضغاط الانعكاسي الأدياباتي (قارن الخط ١-٢ والخط ١١-٢٠ في شكل ٢,٥)، إلى نفس العيبين (ب) و (ج) في الجزء السابق. ويحاول مصممو الضواغط الحد ما أمكن من فقد الضغط في صمامي السحب والطرْد، ويمكن في بعض الضواغط الاستغناء كلياً عن صمام السحب (كما هو الحال في الضواغط الدورانية والضواغط اللولبية وضواغط الطرد المركزي)، و/أو صمام الطرد (كما هو الحال في الضواغط الدورانية متعددة الريش، والضواغط اللولبية، وضواغط الطرد المركزي أيضاً). كذلك يجتهد المصممون في العمل على اقتراب عملية الانضغاط من العملية الأيزونترودية ما أمكن لتحسين أداء دورة التبريد.



شكل ٢,٥ حيود عملية الانضغاط عن العملية المثالية.

٢,٤,٤ الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار

بعد أخذ جميع الاعتبارات السابقة مجتمعة، يبين شكل ٢,٦ الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار موقعة على خريطة الضغط - الإنثالبي. من الشكل نلاحظ الآتي:

أ) انتقال الحرارة بين المبرد والجو المحيط خلال العمليات ١-١' و ٢-٢' - ج ٢ و ٣-٣'.

ب) فقد الضغط في خطوط المبرد المختلفة، وكذلك في المكثف والمبخر.

ج) فقد الضغط في صمامي السحب والطرء بالضاغط، وكذلك حيود عملية الانضغاط عن العملية الانعكاسية.

ويوضح المثال التالي التحليل الحراري للدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار.

مثال ٢,٢

أعد حل مثال ٢,١ بعد أخذ الآتي في الاعتبار:

(أ) فقد ضغط قدره ٣٠ كيلوباسكال في كل من خط السحب، وصمام السحب، وصمام الطرد.

(ب) فقد الضغط في خط الغاز الساخن = ٨٠ كيلوباسكال، ودرجة حرارة دخول الغاز الساخن = ٦٠°م.

(ج) فقد الضغط في المكثف = ٦٠ كيلوباسكال.

(د) فقد الضغط في خط السائل = ١٢٠ كيلوباسكال.

(هـ) فقد الضغط في المبخر = ٣٥ كيلوباسكال.

(و) درجة حرارة بخار المبرد عند دخول الضاغط = -٥°م.

افرض خروج سائل المبرد وبخار المبرد من المكثف والمبخر على التوالي في حالتي التشبع، وافرض عزل خط السائل بين المكثف وصمام التمدد جيدا. أيضا، افرض أن ضغط المكثف عند الخروج = ١١٩١,٩ كيلوباسكال، وضغط المبخر عند الخروج = ٢٩٦,٢ كيلوباسكال، وأن عملية الانضغاط أيزوننتروبية.

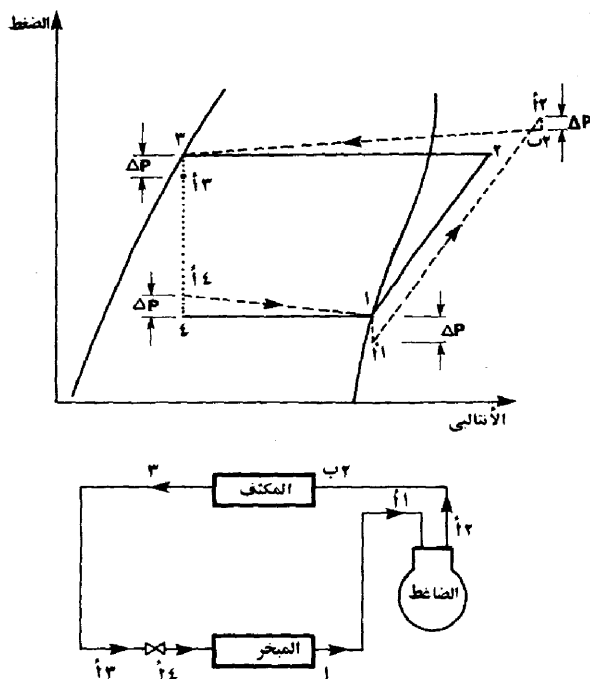
الحل

من المعلومات المعطاة، ومن جداول الضغط - الإنثالبي لمبرد ٢٢ في ملحق "أ"، يمكن رسم دورة التبريد الفعلية كما هو مبين في شكل ٢,٧، و لقد تم إيجاد الخواص عند الحالات المختلفة بالدورة كما هو مبين بجدول ٢,١. باستخدام برنامج REFPROP8 من [NIST 2007].

(أ) يحسب معدل سريان كتلة المبرد في المبخر كما يلي

$$\dot{m} = \frac{1}{399.2 - 236.6} = 0.00615 \text{ kg/s}$$

وهي نفس القيمة المعطاة بمثال ٢,١. يحسب معدل حجم البخار المسحوب بالضاغط كما يلي:



شكل ٢,٦ الدورة الفعلية للتبريد بالضاغط البخار.

$$\dot{V} = \dot{m}v_{1B} = 0.00615 \times 0.1032 = 6.347 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

وهو يزيد بحوالي ٣٦٪ عن الحجم المسحوب بالضاغط في الدورة المثالية بمثال ٢,١. لذا يلزم استخدام ضاغط أكبر بالدورة الفعلية للحصول على نفس سعة التبريد في المبخر.

ب) يحسب معدل طرد الحرارة من المكثف كما يلي

$$\dot{Q}_c = 0.00615(439 - 236.6) = 1.245 \text{ kW}$$

أي بزيادة قدرها ٣٪ فقط، وذلك نظراً لتبريد خط الغاز الساخن بالجو المحيط. لاحظ هنا ارتفاع درجة حرارة الغاز الخارج من الضاغط إلى ٨٠ °م بدلاً

من ٥٣°م بالدورة البسيطة بمثال ٢,١. لذا يفضل في مثل هذه الدورة تبريد الضاغط أثناء التشغيل. ويتم هذا التبريد أما بالماء أو بالهواء.

جدول ٢,١ حل مثال ٢,٢ .

الحالة	درجة الحرارة °م	الضغط كيلوبيسكال	الإنثالبي كيلوجول/كجم	الحجم النوعي م ^٣ /كجم
١	١٥-	٢٩٦,٢	٣٩٩,٢	
أ١	٥-	٢٦٦,٢	٤٠٦,٦	
ب١		٢٣٦,٢	٤٠٦,٦	٠,١٠٣٢
أ٢	٨٠	١٣٦١,٩	٤٥٤,٣	
ب٢		١٣٣١,٩	٤٥٤,٣	
ج٢	٦٠	١٢٥١,٩	٤٣٩	
٣	٣٠	١١٩١,٩	٢٣٦,٦	
أ٣	٢٦	١٠٧١,٩	٢٣٦,٦	
٤	١١,٩-	٣٣١,٢	٢٣٦,٦	

(ج) تحسب قدرة الانضغاط كما يلي

$$\dot{W}=0.00615(454.3-406.6)=0.294 \text{ kW}$$

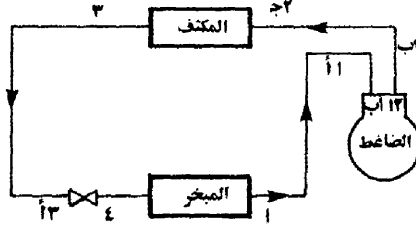
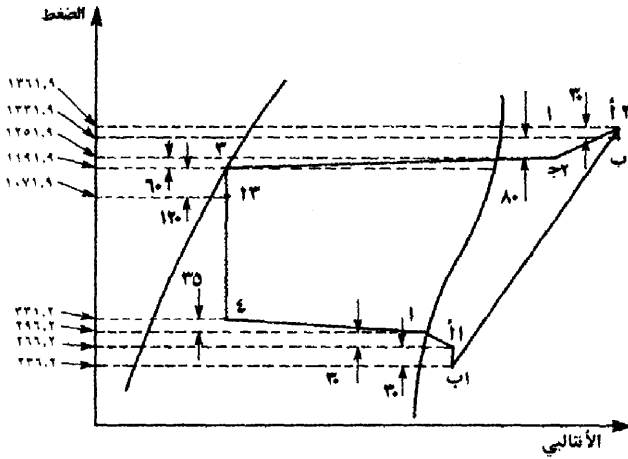
أي بزيادة قدرها حوالي ٥٢٪ عن الدورة المثالية للحصول على نفس سعة التبريد بالمبخر. ويقدر معامل الأداء عندئذ كما يلي

$$\text{COP}=\frac{1}{0.294}=3.401$$

أي بنقص قدره ٢٨٪ عن الدورة المثالية. وتحسب الكفاءة النسبية كما يلي

$$\eta_r=3.401 \times \frac{(30+15)}{(273-15)}=0.594$$

ويلاحظ في الدورة الحالية وجود بخار عند دخول صمام التمدد عند الحالة "٣". ويعمل هذا البخار كما بينا سابقاً على اضطراب أداء صمام التمدد، وعلى تأكل مقعد الصمام. ولتفادي ذلك وجب تبريد المبرد تحتياً بعد الخروج من المكثف لضمان دخول المبرد إلى الصمام في الحالة السائلة.



شكل ٢,٧ توضع نقاط الحالات على خريطة الضغط - الإنثالبي لمثال ٢,٢.

٢,٥ الأثر البيئي للمبردات

المبردات أو وسائط التبريد هي الموائع التي تعمل في دائرة التبريد فتتبخر في المبخر، ويتم ضغطها في الضاغط، وتتكثف في المكثف، وتتمدد في صمام التمدد، وتستمر هذه العملية طالما كانت دورة التبريد تعمل. ولذلك كان لزاماً أن

يكون لهذه المبردات بعض الخصائص والميزات حتى تتم العمليات المختلفة بأعلى كفاءة، وأقل تكاليف ودون تأثيرات سلبية. ومن ضمن الخصائص التي يتطلع لها مهندس التبريد أن تكون متوفرة في مائع التبريد الآتي:

- ١- ألا تتغير خواص المبرد، سواء الفيزيائية أو الثيرموديناميكية أو غيرها، مع العمليات المختلفة من تبخير وتكثيف.
 - ٢- أن تكون خواص المبرد ممتازة في نقل الحرارة، سواء في المكثف أو المبخر.
 - ٣- أن يكون مأمون الاستخدام، فلا يحترق أو يساعد على الاشتعال، كما ألا يكون سامًا.
 - ٤- أن يسهل اكتشاف تسربه.
 - ٥- أن يكون متوفر ورخيص الثمن.
 - ٦- ألا يسبب أي تفاعلات كيميائية أو غيرها مع أي من أجزاء مكونات الدائرة.
- إن أكثر أنواع المبردات المستخدمة في دوائر التبريد هي المواد التي في أصلها مواد مركبات هيدروكاربونية (hydrocarbons) مثل الميثان (CH_4) والإيثان (C_2H_6) وغيرهما بعد استبدال كل أو بعض ذرات الهيدروجين بذرات كلور (chlorine) أو فلور (fluorine). وتسمى المركبات الهيدروكاربونية التي يتم إحلال جميع ذرات الهيدروجين فيها بذرات كلور أو فلور بـ CFC أي (chlorofluorocarbons). وإذا استبدلت بعض ذرات الهيدروجين في المركب الهيدروكاربوني بذرات كلور أو فلور، فإن هذه المواد تسمى HCFC أي (hydrochlorofluorocarbons). أما إذا استبدلت بعض ذرات الهيدروجين في المركب الهيدروكاربوني بذرات فلور فقط فإن المركب يسمى بـ HFC أي (hydrofluorocarbon). وهناك مجموعات كثيرة من المبردات ناتجة عن خليط من مركب أو أكثر من CFC، و/أو HCHC، و/أو HFC.

فعلى سبيل المثال المبرد ١٢ (R-12) هو مركب CFC وصيغته الكيميائية هي CCl_2F_2 ، أما المبرد ٢٢ (R-22) فهو مركب HCFC وصيغته الكيميائية CHClF_2 والمبرد ١٣٤ أ هو مبرد من نوع HFC وصيغته الكيميائية هي CH_2FCF_3 . يبين جدول ٢،٢ بعضاً من المبردات المشهورة وبعضاً من خصائصها. يظهر في الجدول ٢،٢ مجموعة الأمان لكل مبرد. وقد اتفق على أن تكون مجموعة الأمان من حرف ورقم. فالحرف إما أن يكون A أو B. فالحرف A يعني أن المبرد غير سام، والحرف B يعني أن المبرد سام. أما الرقم فهو يعطي مستوى الاحتراق، بحيث الرقم ١ يعني أن المبرد لا يحترق، والرقم ٢ يعني أن مستوى الاحتراق للمبرد قليل، والرقم ٣ يعني أن مستوى الاحتراق عال. انظر الجدول ٢،٣.

جدول ٢،٢ بعضاً من خواص بعض المبردات [ASHRAE 2009].

المبرد	النوع	الصيغة الكيميائية	درجة الغليان عند الضغط الأمان الجوي (°م)	مجموعة
مبرد ١١	CFC	CCl_3F	٢٤	A1
مبرد ١٢	CFC	CCl_2F_2	٣٠-	A1
مبرد ٢٢	HCFC	CHClF_2	٤١-	A1
مبرد ١٣٤ أ	HFC	CH_2FCF_3	٢٦-	A1
مبرد ٧١٧	غير عضوي	NH_3	٣٣-	B2
مبرد ٤٠١	خليط	R22/R152a/R124 (53%,13%,34%)	-	A1
مبرد ٤٠٧	خليط	R32/R125,R134a (20%,40%,40%)	-	A1
مبرد ٥٠٠	خليط	R12/R152a (73.8%,26.2%)	٣٣-	A1
مبرد ٥٠٢	خليط	R22/R115 (48.8%,51.2%)	٤٥-	A1

جدول ٢,٣ مجموعات الأمان للمبردات [ASHRAE 2005].

لا يحترق	A1	B1
مستوى الاحتراق ضعيف	A2	B2
مستوى الاحتراق عالٍ	A3	B3
	غير سام	سام

ويضاف إلى هذه الميزات المرغوبة في المبرد و المذكورة أعلاه أن يكون المبرد صديقاً للبيئة.

ومنذ الستينيات الميلادية، كانت تستخدم المبردات CFC، و HCFC بكثرة، غير أنه في السنوات الأخيرة (الثمانينيات الميلادية) وجد أن المبردات التي تحتوي على ذرات الكلور هي أحد الأسباب التي تؤدي إلى تآكل طبقة الأوزون، وهذه الطبقة تعتبر حزام أمان من الأشعة الضارة (فوق البنفسجية) حتى لا تصل إلى الأرض (<http://ozone.unep.org>). وفكرة تآكل طبقة الأوزون تتمحور حول أن ذرة واحدة من الكلور تحول الآلاف من ذرات الأوزون (O_3) إلى أكسجين، وتحدث ما يسمى بثقب الأوزون، مما يعني وصول الأشعة الضارة إلى جو الأرض، مما يؤثر على الحياة عموماً والإنسان والحيوان والنبات. وقد تم بالفعل الاتفاق على حظر المواد المسببة لثقب الأوزون وعمل جداول مجدولة زمانياً للحد تدريجياً، ومن ثم منع استخدام المواد الضارة بطبقة الأوزون. وأصبحت بروتوكولات مونتريال (١٩٨٩م) علامة فارقة في اتفاق دول العالم على المحافظة على البيئة في ما يخص المواد الضارة على طبقة الأوزون. وهناك ملاحق مختلفة من بروتوكولات مونتريال وتحديث للجداول الزمنية وخلافه تحت مظلة الأمم المتحدة (<http://ozone.unep.org>) كما يمكن الحصول على مزيد من المعلومات من وكالة حماية البيئة الأمريكية (<http://www.epa.gov/ozone/index.html>).

كما يندرج تحت التأثير البيئي أن بعض المواد تسبب الاحتباس الحراري تماماً، مثل ثاني أكسيد الكربون، ولذلك فإن مبرد التبريد كي يكون صديقاً للبيئة يجب ألا يكون له تأثير سيئ على طبقة الأوزون وألا يسبب احتباساً حرارياً. ولسهولة تحديد تأثير مادة ما على طبقة الأوزون والاحتباس الحراري تم تطوير معامل تناقص الأوزون (ODP=Ozone Depletion Potential) ومعامل الاحتباس الحراري (GWP=Global Warming Potential). الجدول ٢،٤ يبين بعضاً من المبرّدات المستخدمة في التبريد وقيمة المعاملين السابقين.

جدول ٢،٤ معامل التأثير على طبقة الأوزون ومعامل الاحتباس الحراري

(www.epa.gov/ozone/index.html)

المبرد	معامل التأثير على طبقة الأوزون (ODP)	معامل الاحتباس الحراري (GWP)
مبرد ١١	١	٤٠٠٠
مبرد ١٢	١	٨٥٠٠
مبرد ٢٢	٠,٠٥	١٧٠٠
مبرد ١٣٤	٠,٠	١٣٠٠
مبرد ٤٠١	٠,٣٧	١١٠٠
مبرد ٤٠٧	٠,٠	١٦١٠
مبرد ٥٠٠	١,٠	٢٤٠٠
مبرد ٥٠٢	٠,٢٧٣	٤١

ونظراً لأن المعاهدات الدولية تحظر استخدام بعض المبرّدات وتصنيعها، فإن على مهندس التبريد والتكييف أن يكون على علم ببدائل المبرّدات التي يتم حظرها. إضافة للإحاطة بالطرق الصحيحة والمتبعة لسحب وشحن المبرد عموماً، وخصوصاً تلك التي لها تأثير سيئ على البيئة. يعتمد اختيار بديل المبرد على التطبيق (درجات الحرارة في المبخّر)، وعمّا إذا كان الهدف شراء نظام

جديد أم استبدال المبرد الموجود في مكائن التبريد الموجودة أصلاً. الجدول ٢,٥ يبين بعضاً من المبرّدات وبدائلها (الوكالة الأمريكية لحماية البيئة).

جدول ٢,٥ بعض من بدائل المبرّدات المشهورة (الوكالة الأمريكية لحماية البيئة).

المبرد	البديل
مبرد ١٢	مبرد ١٣٤أ، مبرد ٤٠١أ، مبرد ٤٠١ب
مبرد ٢٢	مبرد ٤١٠أ، مبرد ٤١٠ب، أمونيا
مبرد ٥٠٠	مبرد ٤٠٦أ، ٤٢٠أ، GHG-X4، GHG-X5
مبرد ٥٠٢	مبرد ٤٠٧أ، مبرد ٤٠٧ب

الرموز ومعانيها للفصل الثاني

COP	معامل أداء الدورة [-]
h	الانثالبي [كجول/كجم] ، معامل انتقال الحرارة بالحمل [وات/(م ^٢ .كلفن)]
$\dot{m}$	معدل التدفق [كجم/ث]
q	كمية الحرارة النوعية [كجول/كجم]
$\dot{Q}$	معدل انتقال الحرارة [وات]
T	درجة الحرارة [كلفن]
v	الحجم النوعي [م ^٣ /كجم]
$\dot{V}$	معدل السريان الحجمي [م ^٣ /كجم]
$\dot{W}$	القدرة [وات]

التذييل

e	المبخر
c	المكثف أو الضاغط أو كارنوت
r	تبريد

الحروف الإغريقية

η	الكفاءة [-]

الفصل الثالث

خواص الهواء الرطب

٣،١ الهواء الجاف والهواء الرطب

يتكون الهواء الجوى من عدة غازات (نتروجين بنسبة ٥٣,٧٥ % وأوكسجين بنسبة ٢٣,١٤ %، وأرجون بنسبة ١,٢٨ % وكميات ضئيلة جدًا من الميثان وثاني أكسيد الكبريت، والهيدروجين وغازات أخرى)، بالإضافة إلى بخار ماء وعدة مواد ملونة كالغبار والأدخنة وغيرهم.

والهواء الرطب هو مزيج ثنائي من الهواء الجاف وبخار الماء (المزيج الثنائي لا يمكن فصل مكوناته بالطرق الميكانيكية). وتتراوح كمية بخار الماء فى الهواء من صفر (يقال عندها أن الهواء جاف) إلى كمية قصوى تعتمد على درجة حرارة الهواء والضغط (يقال عندها أن الهواء مشبع بالرطوبة)، وفي حالة التشبع يكون الهواء فى حالة تعادل طبيعي مع سطح الماء. وحالة التعادل الطبيعي بين الهواء الرطب المشبع وسطح الماء المتكاثف الملامس له، تعنى أن ناتج تبادل البخار بينهما يساوي صفرًا، وأن الضغط الجزئي لبخار الماء فى الهواء يساوي ضغط بخار الماء الموجود فى طبقة رقيقة فوق سطح الماء.

٣،٢ نسبة الرطوبة ودرجة التشبع والرطوبة النسبية

تعرف نسبة الرطوبة W لعينة هواء رطب بأنها نسبة كتلة بخار الماء m_v الموجودة في عينة من الهواء الرطب إلى كتلة الهواء الجاف m_a في العينة، أي إن

$$W = \frac{m_v}{m_a} \quad (3.1)$$

بفرض أن الهواء الرطب عبارة عن خليط من غازين مثاليين هما الهواء الجاف وبخار الماء وأن ثابت الغاز للهواء الجاف ($R_a=0.287 \text{ kJ/kg.K}$) وثابت الغاز لبخار الماء ($R_v=0.462 \text{ kJ/kg.K}$)، فإنه يمكن التعويض في معادلة الغاز المثالي ($pV=mRT$) مرتين لحساب نسبة الرطوبة (كجم ماء/كجم هواء جاف) بدلالة الضغط الجزئي p_v (كيلو بسكال) لبخار الماء في الهواء الرطب، ويكون الناتج كما يلي

$$W = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (3.2)$$

حيث p هو الضغط الكلي للهواء الرطب (كيلو بسكال). وعليه تعرف نسبة رطوبة التشبع W_s بأنها نسبة الرطوبة عند تشبع الهواء ببخار الماء، أي عندما يكون الهواء في حالة تعادل طبيعي مع سطح الماء، مما يؤدي إلى عدم انتقال بخار الماء إلى الهواء. ويكون الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء هو ضغط التشبع p_{ws} . ويعطى هذا الضغط (كيلو بسكال) بدلالة درجة الحرارة t (درجة مئوية) بالعلاقة الآتية (السيد وآخرون، ١٩٩٤م):

$$\log_{10} p_{ws} = -0.21254 + 3.13619 \times 10^{-2} t - 1.22512 \times 10^{-4} t^2 + 3.6384 \times 10^{-7} t^3 - 5.6707 \times 10^{-10} t^4 \quad (3.3)$$

وعليه يمكن إيجاد W_s باستخدام معادلة (3.2) كما يلي

$$W_s = 0.622 \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} \quad (3.4)$$

تعرف درجة التشبع μ للهواء الرطب بأنها نسبة رطوبة الهواء W مقسومة على نسبة رطوبة التشبع W_s عند نفس درجة الحرارة t والضغط الكلي p ، أي إن

$$\mu = \frac{W}{W_s} \Big|_{t,p} \quad (3.5)$$

وتعرف الرطوبة النسبية ϕ بأنها عبارة عن حاصل قسمة نسبة مولات بخار الماء في الهواء على نسبة مولات بخار الماء في الهواء عندما يكون الهواء مشبعًا أي إن

$$\phi = \frac{x_v}{x_{vs}} \quad (3.6)$$

حيث x_v هي نسبة مولات بخار الماء في الهواء، ويمكن إعادة كتابة المعادلة السابقة بفرضية أن كل من الهواء الجاف وبخار الماء عبارة عن غازين مثاليين، لنحصل على أن الرطوبة النسبية عبارة عن نسبة الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء إلى الضغط الجزئي لبخار الماء عند تشبع الهواء عند نفس درجة الحرارة t والضغط الكلي p ، أي إن

$$\phi = \frac{p_v}{p_{ws}} \Big|_{t,p} \quad (3.7)$$

حيث يمكن أن تحسب p_{ws} من معادلة (3.3).

٣,٣ درجات حرارة الهواء الرطب

تعرف درجة الحرارة t التي يمكن قياسها بثرمومتر جاف البصيلة، بدرجة حرارة البصيلة الجافة، وهي درجة الحرارة المعتادة. فإذا قيل إن هناك هواء رطباً عند 30°C ، كان المقصود أن درجة حرارة البصيلة الجافة هي 30°C . وتعرف درجة حرارة نقطة الندى t_{dp} لهواء رطب بنسبة رطوبة W بأنها درجة حرارة الهواء المشبع ببخار الماء الذي له نفس نسبة الرطوبة W والضغط الكلي p ، أي إن

$$W_s(p, t_{dp}) = W \quad (3.8)$$

وتحسب درجة حرارة نقطة الندى t_{dp} (درجة مئوية) من العلاقة الرياضية

الآتية [ASHRAE 1993]:

$$0^\circ C < t_{dp} < 93^\circ C :$$

$$t_{dp} = 6.54 + 14.526 \ln p_v + 0.7389 (\ln p_v)^2 + 0.09486 (\ln p_v)^3 + 0.4569 (p_v)^{0.1984}$$

$$t_{dp} < 0^\circ C :$$

$$t_{dp} = 6.09 + 12.668 \ln p_v + 0.4959 (\ln p_v)^2 \quad (3.9)$$

حيث p_v (كيلو بسكال) هو الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء ويحسب من معادلة (3.2) بدلالة الضغط الكلي p للهواء الرطب ونسبة الرطوبة به W .

وتعرف درجة حرارة البصيلة المبتلة t^* لهواء رطب بأنها درجة الحرارة التي يسجلها ثرمومتر مبلل البصيلة. وتعتمد هذه الدرجة على نسبة الرطوبة W بالهواء ودرجة حرارته t (أي درجة حرارة البصيلة الجافة). وتكون درجة حرارة البصيلة المبتلة t^* دائما أقل من درجة الحرارة t ، وتقترب t^* من t بارتفاع نسبة الرطوبة W . أما إذا أصبح الهواء مشبعًا، أي عندما تكون نسبة الرطوبة W_s تساوت t^* و t .

٣,٤ كثافة وانتالبي الهواء الرطب

تعرف كثافة الهواء الرطب ρ (كجم/م^٣) بأنها الوزن الكلي لعينة من الهواء الرطب مقسوما على الحجم الكلي للعينة، أي إن

$$\rho = \frac{m_a + m_v}{V} = \rho_a (1 + W) \quad (3.10)$$

حيث ρ_a هي كثافة الهواء الجاف (كجم/م^٣) و تحسب كما يلي

$$\rho_a = \frac{(p - p_v)}{R_a (t + 273)} \quad (3.11)$$

حيث R_a هي ثابت الغاز للهواء (= ٢٨٧، كيلوجول/كم. درجة مطلقة) و t هي درجة حرارة البصيلة الجافة للهواء (درجة مئوية) و p_v و p كما سبق تعريفهما.

يمكن التعبير عن انتالبي الهواء الرطب باستخدام علاقات الغاز المثالي كما يلي:

$$h = t + W(2501 + 1.805t) \quad (3.12)$$

٣,٥ خريطة السيكروميترى

لتسهيل حسابات خواص الهواء الرطب تم رسم خريطة تربط هذه الخواص بعضها مع البعض تسمى خريطة السيكروميترى (شكل ٣,١). ويمكن استخدام هذه الخريطة بطريقة أسرع وأيسر لإيجاد قيم خواص الهواء الرطب، كما تتيح فهما أكثر للعمليات التي يتم إجرائها على الهواء. لاحظ أنه تم إعداد كل خريطة سيكروميترى لضغط جوي معين، لذلك يجب اتخاذ الحيلة عند استخدام خريطة السيكروميترى من أن تكون للضغط المناسب. يمكن أيضا ملاحظة وجود منقطة على يسار خريطة السيكروميترى. ويوجد لهذه المنقطة تدرجان أحدهما داخلي والآخر خارجي. والتدرج الداخلي هو عبارة عن نسبة الحرارة المحسوسة إلى الحرارة الكلية، والتدرج الخارجي هو عبارة عن نسبة تغير الانتالبي Δh إلى تغير نسبة الرطوبة ΔW . ويتم استخدام هذان التدرجان كثيرا في تحليل ودراسة العمليات المختلفة لمعالجة الهواء الرطب. فمثلا لتحديد ورسم خط على خريطة السيكروميترى له قيمة تساوي ٠,٧ لنسبة الحرارة المحسوسة إلى الحرارة الكلية، يتم استخدام التدرج الداخلي يرسم خط من قيمة ٠,٧ إلى مركز المنقطة. ويمثل هذا الخط نسبة حرارة المحسوسة إلى حرارة كلية قدره ٠,٧. وباستخدام مثلث قائم الزاوية ومسطرة يمكن نقل هذا الخط إلى أي مكان على خريطة السيكروميترى. وكذلك الحال لمن أراد استخدام التدرج الخارجي لرسم خط له ميل معين — $\Delta h / \Delta W$. يلاحظ وجود تدرج آخر لنسبة الحرارة المحسوسة إلى الحرارة الكلية على يمين تدرج نسبة الرطوبة W وهذا التدرج يستخدم فقط مع نقطة واحدة تظهر كدائرة صغيرة عند درجة حرارة ٢٤ °م ورطوبة نسبية ٥٠٪، وتسمى هذه النقطة بنقطة المحاذاة.

٣,٦ العمليات الأساسية المستخدمة في تكييف الهواء

فيما يلي نقدم أهم العمليات الأساسية المستخدمة في تكييف الهواء:

يمثل شكل ٣,٢ أولى العمليات، وهي عملية الخلط الادياباتي للهواء الرطب. ويلاحظ أن تيار الهواء الأول عند نقطة ١ بمعدل سريان $\dot{m}_1$ ونسبة رطوبة W_1 وانثالي h_1 يختلط بتيار الهواء الثاني عند نقطة ٢ ومعدل سريانه $\dot{m}_2$ ونسبة الرطوبة به W_2 وقيمة الانثالي له h_2 لينتج من عملية الخلط تيار ثالث معدل سريانه $\dot{m}_3$ ونسبة الرطوبة به W_3 وقيمة الانثالي له h_3 . ويمكن كتابة المعادلات الخاصة بتوازن كتلة الهواء وتوازن كتلة بخار الماء وتوازن الطاقة للهواء كالاتي

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_3 W_3 = \dot{m}_1 W_1 + \dot{m}_2 W_2$$

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2$$

ويمكن اختزال المعادلات السابقة إلى الصورة الآتية:

$$W_3 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} W_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} W_2 \quad (3.13)$$

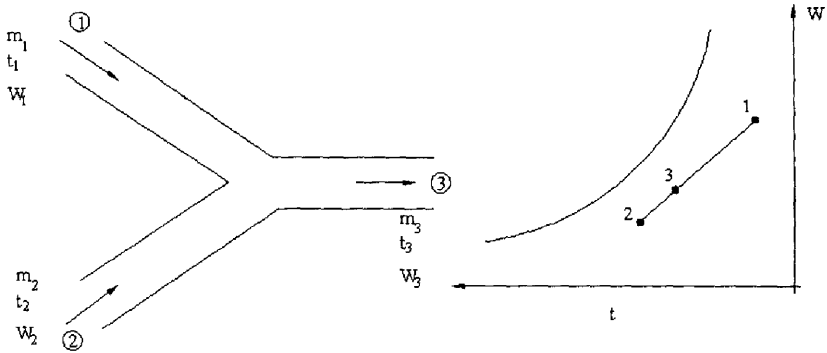
$$h_3 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} h_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} h_2 \quad (3.14)$$

وهي تعني أن النقطة ٣ تقسم المسافة بين النقطتين ١ و ٢ بالنسبة العكسية لمعدلات السريان كما هو واضح من شكل ٣,٢.

تمثل العملية أ بشكل ٣,٣ حالة تسخين محسوس، بينما تمثل العملية ب بالشكل حالة تبريد محسوس. وخلال عملية التبريد أو التسخين المحسوس تكون نسبة الرطوبة ثابتة، وتزيد كل من درجة الحرارة الجافة والمبتلة والانثالي وتقل الرطوبة النسبية في حالة التسخين المحسوس، والعكس في حالة التبريد المحسوس.

ويمكن حساب كمية الحرارة المضافة إلى الهواء أو المسحوبة منه من المعادلة الآتية

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (3.15)$$



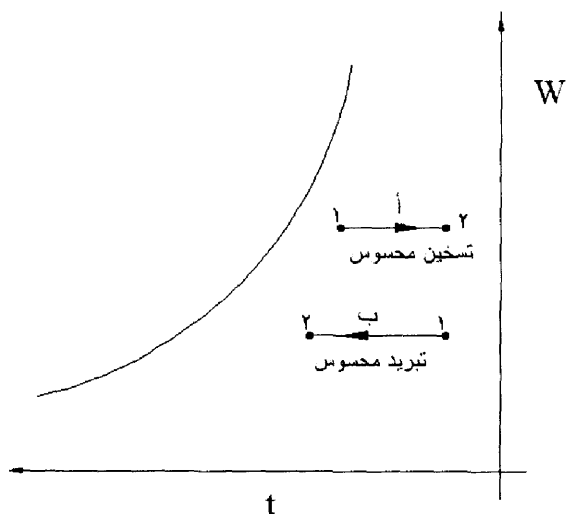
شكل ٣، ٢ عملية الخلط ادياباتيًا وتمثيلها على خريطة الهواء الرطب.

في العملية الثالثة ندرس تبريد الهواء مع إزالة الرطوبة. عند مرور الهواء الرطب على سطح ملف تبريد يتكثف بخار الماء منفصلاً عن الهواء إذا كان متوسط درجة حرارة سطح ملف التبريد أقل من درجة حرارة نقطة الندى للهواء الرطب. وتمثل عملية إزالة الرطوبة بالتبريد على خريطة الهواء الرطب بالخط ١-٢ في شكل ٣، ٤. وعند مد هذا الخط ليقابل خط التشبع (١٠٠٪ رطوبة نسبية) في خريطة الهواء الرطب فإن نقطة التقاطع - النقطة ٣ - تمثل متوسط درجة حرارة سطح ملف التبريد، ويطلق عليها أيضاً اسم نقطة الندى لملف التبريد. ويعرف معامل التلامس للملف بالمعادلة الآتية:

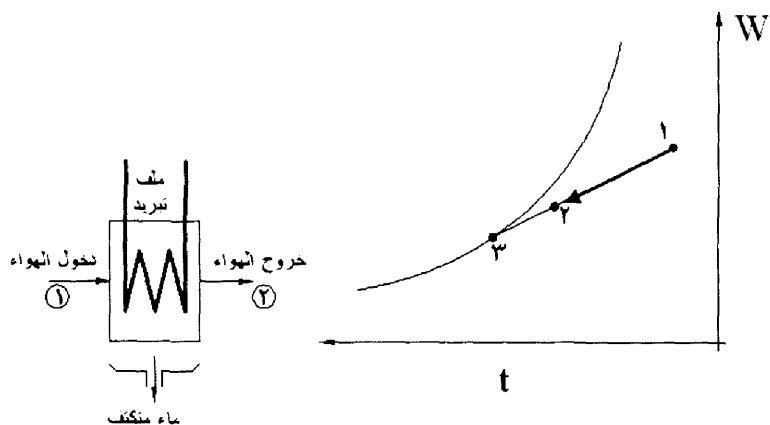
$$C = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_3} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_3} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \quad (3.16)$$

وتعرف القيمة $(1 - C)$ بمعامل التجنيب لملف التبريد B ، وتقع هذه القيمة

بين ٠,١ إلى ٠,٢ لملفات التبريد المستخدمة في صناعة التبريد.



شكل ٣,٣ عمليتي تسخين وتبريد محسوس.



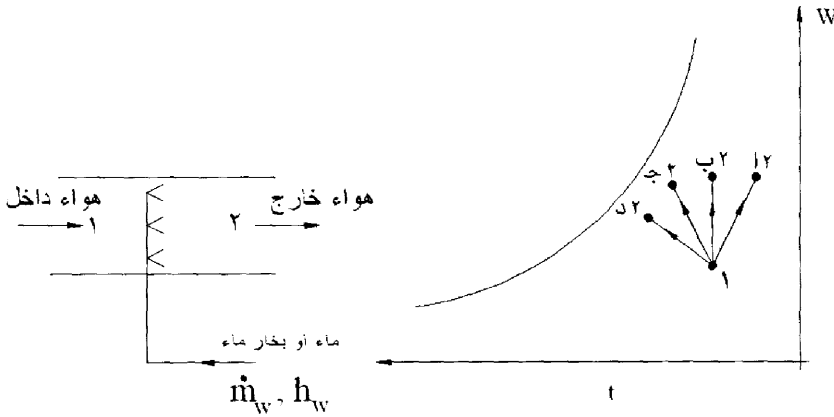
شكل ٣,٤ عملية تبريد ونزع رطوبة وتمثيلها على خريطة السيكرومتري.

في العملية الرابعة ندرس ترطيب الهواء، أي زيادة رطوبته. ويمكن ترطيب الهواء بإضافة الماء أو بإضافة بخار الماء إليه (انظر شكل ٣,٥). ويعطي اتزان كتلة الماء للعملية بالمعادلة الآتية:

$$\dot{m}W_2 = \dot{m}W_1 + \dot{m}_w$$

حيث $\dot{m}_w$ هي معدل كتلة الماء أو بخار الماء المضاف للهواء، و $\dot{m}$ هي معدل سريان كتلة الهواء، ويمكن كتابة المعادلة السابقة كالآتي:

$$\dot{m}_w = \dot{m}(W_2 - W_1) \quad (3.17)$$



شكل ٣,٥ عملية ترطيب الهواء بماء أو ببخار ماء.

أيضا يعطي ائزان الطاقة للهواء أثناء عملية الترطيب المعادلة الآتية

$$\dot{m}h_2 = \dot{m}h_1 + \dot{m}_w h_w$$

بالتعويض باستخدام المعادلة (3.17) في المعادلة السابقة ينتج

$$h_w = \frac{h_2 - h_1}{W_2 - W_1} \quad (3.18)$$

حيث h_w هي انثالبي الماء أو بخار الماء المضاف للهواء. أي إن نسبة تغير الانثالبي إلى تغير نسبة الرطوبة (أو ميل هذا الخط) بين نقطة دخول الهواء وخروجه يعتمد على قيمة h_w . فكلما زادت قيمة h_w كلما زاد ميل الخط، وهذا يستوجب ان تقع النقطة (٢) على يمين نقطة (١). ولذلك يمكن القول أن قيمة h_w

لها تأثير أساسي في تحديد نقطة (٢)، (انظر التدرج الخارجي للمنقلة الموجودة على يسار خريطة السيكرومتري).

وهناك حالة خاصة لترطيب الهواء، وهي استخدام ماء متوفر في البيئة المحيطة لترطيب الهواء تسمى هذه العملية بالتكييف الصحراوي (desert cooling) أو التبريد التبخيري (evaporative cooling)، في هذه الحالة يتم ترطيب الهواء باستخدام ماء متوفر من البيئة المحيطة، وفي هذه الحالة تكون h_w هي انثالبي الماء عند درجة حرارة الماء، وفي الغالب يمكن اعتبار هذه العملية بأنها عملية ثابتة درجة حرارة البصيلة المبتلة، أي إن درجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء الداخل والخارج واحدة ($t_1^* = t_2^*$). ويوضح الشكل ٣،٦ هذه العملية، حيث يتم ترطيب الهواء من نقطة (١) إلى نقطة (٢) على خط ثابت درجة حرارة البصيلة المبتلة، وفي هذه الحالة فإن أقصى نقطة يصل لها الهواء الخارج هي عند التقاء خط ثابت درجة حرارة البصيلة المبتلة مع خط التشبع (أي نقطة ٣) كما يظهر من الشكل. ويمكن أيضاً تقريب عملية ترطيب الهواء في حالة إضافة بخار ماء مشبع على أساس أنها عملية ثابتة درجة حرارة البصيلة الجافة، انظر شكل ٣،٦. ويمكن تعريف كفاءة الترطيب η_H في هاتين الحالتين كالآتي:

$$\eta_H = \frac{W_2 - W_1}{W_3 - W_1} \quad (3.19)$$

مثال ٣،١

تم خلط أدياباتيا هواء أحدهما عند حالة ١ لها درجة ٤٠ °م و ٦٠٪ رطوبة نسبية ومعدل سريان حجمي قدره ٢٠٠٠ لتر/ث مع هواء عند حالة ٢ لها درجة حرارة ٢٥ °م و ٥٠٪ رطوبة نسبية ومعدل سريان حجمي قدره ٤٠٠٠ لتر/ث. يمر ناتج الخلط عند حالة ٣ على ملف تبريد متوسط درجة حرارة سطحه ١٠ °م وله معامل تجنيب B قدره ٠،٢. يخرج الهواء من ملف

الحل

باستخدام خريطة السيكرومتري عند ضغط واحد جوي (١.٠١,٣٢٥ كيلوباسكال) يمكن توقع الحالة ١ عند درجة حرارة ٤٠ °م و ٦٠٪ رطوبة نسبية، وكذلك بالنسبة للحالة ٢ عند درجة حرارة ٢٥ °م و ٥٠٪ رطوبة نسبية. كما يمكن من الخريطة قراءة جميع خصائص هاتين الحالتين، مثل الانثالبى ونسبة الرطوبة وغيرهما. تم تلخيص بعض الخصائص في الجدول الآتي:

الحالة	درجة حرارة الجافة البسيطة (°م)	درجة حرارة الرطوبة المبتلة النسبية (%)	الحجم النوعي م ^٣ /كيلوجرام	نسبة الرطوبة (جرام ماء/كيلوجرام هواء)
١	٤٠	٦٠	٠,٩٢٨	٢٨,٥
٢	٢٥	٥٠	٠,٨٥٨	٩,٨
٣	٢٩,٨	٢٣,٥		١٥,٧٢
٤	١٤	١٣,٣		٩,٣

يمكن حساب معدل سريان الكتلة عند الحالة ١ و ٢ باستخدام المعادلة

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v}$$

حيث $\dot{V}$ هو معدل سريان الهواء الحجمي، أي إن معدل سريان الكتلة يساوي معدل السريان الحجمي على الحجم النوعي. بتطبيق ذلك على الحالتين ١ و ٢ ينتج

$$\dot{m}_1 = \frac{2.0}{0.928} = 2.16 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_2 = \frac{4.0}{0.858} = 4.66 \text{ kg/s}$$

و ينتج أن معدل سريان الهواء خلال ملف التبريد $\dot{m}_1 + \dot{m}_2$ ، أي إن

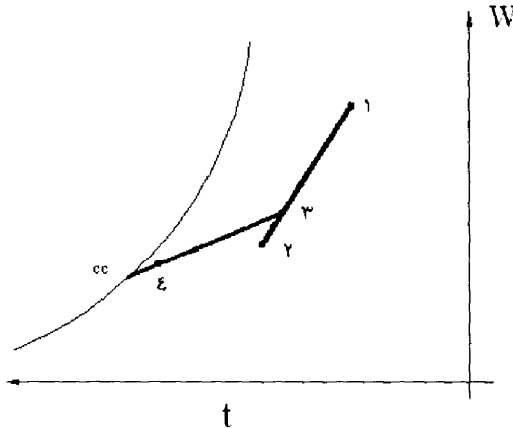
$$\dot{m} = 6.82 \text{ kg/s}$$

يمكن توقع الحالة ٣ (ناتج الخلط) باستخدام العلاقات التي تم شرحها في بداية هذا الفصل والخاصة بالخلط وهي

$$W_3 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} W_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} W_2$$

ومنها ينتج أن نسبة الرطوبة عند الحالة (٣) تساوي ١٥,٧٢ جرام ماء لكل كجرام هواء. ويمكن توقع الحالة ٣ بإيصال نقطتي ١ و ٢ ثم على تدريج نسبة الرطوبة وعند نسبة رطوبة W_3 (من المعادلة السابقة) يمكن رسم خط ليقاطع مع الخط الواصل بين الحالة ١ والحالة ٢ ويتم إيقاع الحالة ٣. وعندها تكون درجة حرارة البصيلة الجافة $t_3 = 29.8^\circ \text{C}$ ودرجة حرارة نقطة الندى حوالي 23.5°C ، كما هو مبين على شكل ٣,٨ للخريطة.

يمر ناتج الخلط (أي الهواء عند الحالة ٣) على ملف التبريد، حيث درجة حرارة سطح الملف 10°C ، ولأن هذه الدرجة هي أقل من درجة حرارة نقطة الندى للهواء الداخل على الملف (وهي 29.8°C) ، لذلك يتم تكثف جزء من الماء الموجود في الهواء عند مروره على الملف.



شكل ٣,٨ تمثيل العمليات في مثال ٣,١ على خريطة السيكرومترية.

ولتوقع الحالة ٤ يتم إيصال خط بين النقطة ٣ ونقطة على خط التشبع عند درجة حرارة 10°C . وحسب تعريف معامل التجنيب بالمعادلة

$$B = \frac{t_4 - t_{cc}}{t_3 - t_{cc}}$$

حيث t_{cc} هي درجة حرارة الملف = ١٠ °م، والتذييل cc يعني ملف تبريد (cooling coil). من المعادلة السابقة ينتج أن درجة الحرارة عند الحالة ٤ تساوي ١٤ °م، ولذلك يمكن إيقاع الحالة ٤ على الخط الواصل بين الحالة ٣ ودرجة الحرارة ١٠ °م على خط التشبع وعند درجة حرارة بصيلة جافة تساوي ١٤ °م. يمكن قراءة الانثالبي عند نقطة ٣ ونقطة ٤ من خريطة السيكرومتري ($h_3=70.5, h_4=37.5$ kJ/kg).

يمكن حساب معدل تكثف الماء بسبب مروره على ملف التبريد باستخدام المعادلة

$$\dot{m}_w = \dot{m}(W_3 - W_4)$$

بالتعويض ينتج أن معدل ماء التكثف

$$\dot{m}_w = 6.82 * (15.72 - 9.3) * 10^{-3} = 0.044 \text{ kg/s}$$

يمكن حساب كمية الحرارة التي تم انتزاعها من الهواء عند مروره على الملف باستخدام

$$\dot{Q}_{cc} = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

$$\dot{Q}_{cc} = 6.82 * (70.5 - 37.5) = 225 \text{ kW}$$

الرموز ومعانيها للفصل الثالث

B	معامل التجنيب لملف التبريد [-]
C	معامل التلامس لملف التبريد [-]
P	الضغط [كيلوباسكال]
p_a	الضغط الجزئي للهواء الجاف [كيلوباسكال]
p_v	الضغط الجزئي لبخار الماء [كيلوباسكال]
p_{ws}	ضغط التشبع لبخار الماء [كيلوباسكال]
t	درجة حرارة البصيلة الجافة [°م]
t^*	درجة حرارة البصيلة المبتلة [°م]
t_{dp}	درجة حرارة نقطة الندى [°م]
W	نسبة الرطوبة [جم ماء/كجم هواء]
W^*	نسبة الرطوبة للهواء المشبع عند درجة حرارة بصيلة مبتلة t^* [جم ماء/كجم هواء]
v	الحجم النوعي [م ^٣ /كجم]

التذييل

cc	ملف التبريد
dp	درجة حرارة نقطة الندى
H	الرطوبة
s	التشبع
v	البخار

الحروف الإغريقية

φ	الرطوبة النسبية [-]
η	الكفاءة [-]
μ	درجة التشبع [-]
ρ	الكثافة [كجم/م ^٣]

الفصل الرابع

مبادئ سريان الموائع وانتقال الحرارة

٤,١ مقدمة

يضم الفصل الحالي عرضًا موجزًا لمبادئ سريان الموائع وانتقال الحرارة، حيث يلزم أن يلم مهندسي التصميم والتشغيل والصيانة لمخازن التبريد بهذه المبادئ، لضمان التصميم والتشغيل الأمثلين لهذه المخازن.

هناك كتب متخصصة لأكثر من مستوى في سريان الموائع وانتقال الحرارة، وليس المجال هنا لدراسة متعمقة ومكثفة في هذين الموضوعين، ولكن يهدف هذا الفصل إلى مراجعة القوانين الأساسية فيهما. يبدأ الفصل الحالي بعرض سريع لقانوني بقاء الكتلة وبقاء الطاقة. يتبع هذا تقديمًا لحساب فقد ضغط السريان داخل الأنابيب. يقدم الفصل بعد ذلك مبادئ انتقال الحرارة بالصور المختلفة: التوصيل والحمل والإشعاع، بعد ذلك يعرض الفصل حساب المعامل الكلي لانتقال الحرارة ثم استخدام الزعانف لتحسين عملية انتقال الحرارة. وأخيرًا يقدم الفصل المبادئ الأولية لأداء وتصميم المبادلات الحرارية.

٤,٢ قانون بقاء الكتلة

يعتبر قانون بقاء الكتلة واحدًا من أهم القوانين الأساسية التي تحكم سريان الموائع. وينص هذا القانون في شكله العام على أن الكتلة لا تفنى ولا تستحدث، ما لم يكن هناك تفاعل نووي، حيث تحول الكتلة إلى طاقة، ويمكن التعبير رياضياً عن قانون بقاء الكتلة عند تطبيقه على نظام مفتوح (control volume) ما بالآتي:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o + \frac{dM}{dt} \quad (4.1)$$

ويمثل الطرف الأيسر مجموع معدل السرينات الداخلة إلى النظام، ويمثل الحد الأول بالطرف الأيمن مجموع معدل السرينات الخارجة من النظام، ويمثل الحد الثاني بالطرف الأيمن معدل تغير كتلة النظام مع الزمن، ويكون هذا الحد موجباً إذا زادت كتلة النظام مع الزمن، وسالباً إذا قلت هذه الكتلة مع الزمن. وتؤول المعادلة السابقة عند حالة الاستقرار إلى الآتي:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (4.2)$$

ويقدر معدل السريان لمائع ما خلال أي مساحة مقطع A عمودية على اتجاه سريان يمر بسرعة منتظمة V بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\dot{m} = \rho VA \quad (4.3)$$

حيث ρ هي كثافة المائع و V هي السرعة المتوسطة للسريان خلال مساحة المقطع. ويعرف معدل السريان الحجمي $\dot{V}$ بأنه حاصل ضرب السرعة في المساحة.

مثال ٤،١

مخزن تبريد عند درجة حرارة قدرها -20°C ورطوبة نسبية قدرها 90% . عند فتح باب المخزن يتسرب الهواء الخارجي عند 10°C و 50% رطوبة نسبية إلى داخل المخزن بمعدل قدره $6,000$ لتر/ث. احسب معدل الهواء المتسرب من داخل المخزن إلى خارجه بفرض تساوي مساحة مدخل ومخرج الهواء.

الحل

بفرض حالة الاستقرار، تعطي المعادلة (4.2) الآتي:

$$\rho_o \dot{V}_o = \rho_i \dot{V}_i$$

حيث تمثل $\dot{V}$ معدل السريان الحجمي للهواء، ويمثل التذييل i و o الدخول والخروج من المخزن على التوالي. وبفرض ضغط جوى واحد خارج وداخل المخزن، فإن يمكن إيجاد كثافة الهواء باستخدام القانون المثالي للغازات كما يلي:

$$\rho_i = \frac{p_i}{R_a T_i} = \frac{101.325 \times 10^3}{287 \times (273 + 10)} = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_o = \frac{p_o}{R_a T_o} = \frac{101.325 \times 10^3}{287 \times (273 - 20)} = 1.40 \text{ kg/m}^3$$

وعليه يقدر معدل سريان الهواء الخارج من المخزن كما يلي:

$$\dot{V}_o = \frac{\rho_i}{\rho_o} \dot{V}_i = \frac{1.40}{1.25} 6000 = 6720 \text{ l/s}$$

لاحظ اختلاف معدل سريان حجم الهواء الداخل إلى المخزن عن الخارج منه نتيجة اختلاف الكثافة.

٤,٣ معادلة الطاقة لسريان الموائع

يحكم القانون الأول للديناميكا الحرارية ائزان الطاقة للسريانات المختلفة خلال نظام ما. وينص هذا القانون على أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث ما لم يكن هناك تفاعل نووي، وأن الطاقة تتغير من صورة إلى أخرى. وبتطبيق هذا القانون على نظام مفتوح عند حالة الاستقرار، فإنه يأخذ الشكل الآتي:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_o \left(\frac{1}{2} V_o^2 + gz_o + \frac{p_o}{\rho_o} + u_o \right) - \sum \dot{m}_i \left(\frac{1}{2} V_i^2 + gz_i + \frac{p_i}{\rho_i} + u_i \right) \quad (4.4)$$

حيث $\dot{Q}$ هي معدل انتقال الحرارة إلى النظام (وتكون سالبة في الاتجاه العكسي)، و $\dot{W}$ هي القدرة الميكانيكية التي يعطيها النظام (وتكون سالبة إذا أخذها النظام)، و V هي سرعة السريان، و z هي ارتفاع مستوى السريان عن المستوى المرجعي (موجب ضد الجاذبية الأرضية وسالب في اتجاه الجاذبية الأرضية)، و p هو ضغط السريان و u هي الطاقة الداخلية للسريان. ويمثل التذييلان i و o حالة الدخول والخروج إلى ومن النظام، على التوالي.

وهناك العديد من النظم التي تحوي سريانات ثابتة درجة الحرارة (أي $u_i = u_o$) وبدون تبادل حراري ($\dot{Q} = 0$) أو قدرة ميكانيكية ($\dot{W} = 0$) مع مصادر خارجية، فإذا فرضنا سريانا غير لزج (أي بإهمال الاحتكاك الداخلي)، تؤول المعادلة (4.4) إلى ما يعرف بمعادلة برنولي التي تنص على الآتي

$$\frac{1}{2} V_i^2 + gz_i + \frac{p_i}{\rho_i} = \frac{1}{2} V_o^2 + gz_o + \frac{p_o}{\rho_o} \quad (4.5)$$

وتمثل الحدود الثلاثة بالطرف الأيسر أو الأيمن، على الترتيب: طاقة الحركة، وطاقة الوضع، وطاقة السريان لوحدة الكتلة من السريان. عندئذ تنص معادلة برنولي للسريانات غير اللزجة على أن مجموع طاقة الحركة وطاقة الوضع وطاقة السريان يكون ثابتاً للسريان تحت الشروط التي قدمناها سابقاً (أي بدون تبادل حراري وقدرة مع مصادر خارجية).

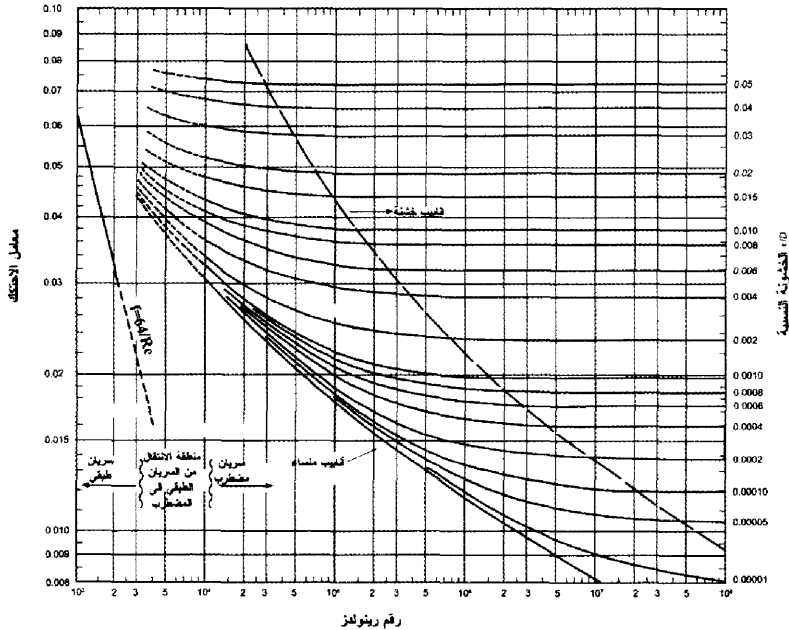
٤،٤ فقد الضغط للسريان داخل الأنابيب

يمثل السريان داخل الأنابيب قطاعاً كبيراً من التطبيقات الهندسية المستخدمة في صناعة التبريد. وتضم معظم التطبيقات مضخات تعمل على دفع

السريان خلال شبكة الأنابيب والمواسير. وبفرض إمكانية إهمال انتقال الحرارة بين السريان داخل الأنابيب والجو الخارجي، فإن المعادلة (4.4) تؤول إلى الآتي:

$$|\dot{W}_p| = \dot{m}_o \left(\frac{1}{2} V_o^2 + gz_o + \frac{p_o}{\rho} \right) - \dot{m}_i \left(\frac{1}{2} V_i^2 + gz_i + \frac{p_i}{\rho} \right) + \sum \dot{m} \left(\frac{\Delta p'}{\rho} + \frac{\Delta p''}{\rho} \right) \quad (4.6)$$

حيث $\Delta p'$ تمثل فقد الضغط الرئيسي في الأنابيب، بينما تمثل $\Delta p''$ فقد الضغط الثانوي. ويعرف الضغط الرئيسي بأنه الضغط بسبب احتكاك سريان المائع بجدار الأنبوب، أما الضغط الثانوي فهو نتيجة المكونات الأخرى في الأنبوب مثل الأكواع، والمحابس وتغيير الضغط.



شكل ٤,١ خريطة مودي لحساب معامل الاحتكاك f [ASHRAE 2009].

ويعبر عن فقد الضغط الرئيسي بالمعادلة الآتية:

$$\frac{\Delta p'}{\rho} = f \frac{L}{d} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (4.7)$$

حيث f هي معامل الاحتكاك داخل الأنبوب و L و d هما على الترتيب طول الأنبوب وقطره، و $\bar{V}$ هي السرعة المتوسطة للسريان داخل الأنبوب. ويقدر معامل الاحتكاك f من خريطة مودي (Moody diagram) (شكل ٤,١) بدلالة رقم رينولدز (Reynolds) والخشونة النسبية لسطح الأنبوب، اللتان تعرفان على التوالي كما يلي:

$$Re = \rho \bar{V} d / \mu \quad (4.8)$$

$$\varepsilon = e/d \quad (4.9)$$

حيث μ هي اللزوجة الديناميكية للمائع داخل الأنبوب و e هي متوسط خشونة سطح الأنبوب. ويعطي جدول ٤,١ قيم e لمواد مختلفة.

جدول ٤,١ الخشونة المتوسطة لبعض المواد [Fox & McDonald 2006].

المادة	الخشونة (مم)
حديد زهر	٠,٢٦
صلب تجارى	٠,٠٤٦
خرسانة	٣,٠ - ٠,٣
أنابيب مسحوبة	٠,٠٠١٥
نحاس أحمر أو أصفر	٠,٠٠١٥
صاج مجلفن	٠,١٥
زجاج أو بلاستيك	ملساء

ويقدر فقد الضغط الثانوي من المعادلة الآتية:

$$\frac{\Delta p''}{\rho} = \frac{1}{2} K \bar{V}^2 \quad (4.10)$$

حيث K هي معامل فقد الضغط للجزء المتسبب في الفقد الثانوي، مثل المحابس والأكواع وغيرها. وبين جدول ٤,٢ قيم K لبعض الأجزاء المستخدمة في نظم الأنابيب. ويلاحظ أن القيم المعطاة للمعامل K هي قيم تقريبية، حيث تتغير قيم K عادة مع قطر الأنبوب المستخدم معه المحبس أو الكوع.

مثال ٤,٢

يتكون خط من الأنابيب من أنبوب من الحديد الزهر بقطر ٥ سم وطول ٢٠ مترًا ومحبس كروي مفتوح وكوع ٩٠° قياسي. احسب فقد الضغط خلال هذا الخط لسريان من الماء بسرعة متوسطة قدرها ٣ م/ث. افرض أن درجة حرارة الماء هي ٥°م.

الحل

من جداول خواص الماء، نجد أن كثافة الماء عند ٥°م هي ١٠٠٠ كجم/م^٣ وأن لزوجته الديناميكية هي 1.0×10^{-3} باسكال. ثانية. من معادلة ٤,٨ يقدر رقم رينولدز كما يلي:

$$Re = \frac{\rho \bar{V} d}{\mu} = \frac{1000 \times 3 \times 0.05}{1.519 \times 10^{-3}} = 9.9 \times 10^4$$

من جدول ٤,١ نجد أن خشونة سطح الأنبوب هي ٠,٠٠٠٢٦ متر أي إن:

$$\varepsilon = \frac{e}{d} = \frac{0.00026}{0.05} = 0.0052$$

من خريطة مودي بشكل ٤,١ نجد أن قيمة معامل الاحتكاك f هي ٠,٠٣١ ومن جدول ٤,٢ نجد أن قيمة معامل فقد الضغط K لمحبس كروي مفتوح هي

١٠، ولكوع °٩٠ قياسي هي ١,٥ ومن معادلة ٤,٧ ومعادلة ٤,١٠ يحسب فقد الضغط خلال خط الأنابيب كما يلي:

$$\Delta p = f \frac{L}{d} \frac{\rho \bar{V}^2}{2} + \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2 (K_1 + K_2)$$

$$\Delta p = \left(0.031 \times \frac{20}{0.05} + 10 + 1.5 \right) \times 0.5 \times 1000 \times (3^2) = 107550. \text{ Pa}$$

جدول ٤,٢ قيم معامل فقد الضغط K لبعض الأجزاء المستخدمة في نظم الأنابيب

[Munson et al. 1998].

معامل فقد الضغط	البند
٠,٤٠	كوع °٤٥ (قياسي)
١,٥	كوع °٩٠ (قياسي)
٠,٧٠	كوع °٩٠ (نصف قطر طويل)
٠,٠٨	ازدواج
٠,٠٨	وصلة توصيل أنبوبين
٠,١٥	محبس بوابي (مفتوح)
٠,٢٦	٣/٤ مفتوح
٢,١	١/٢ مفتوح
١٧,٠	١/٤ مفتوح
١٠,٠	محبس كروي مفتوح
١,٥	تحويلة °١٨٠
٠,٩٠	تى - خط السريان الرئيسي
٢,٠	تى - خط التفريع

٤,٥ انتقال الحرارة بالتوصيل

تنتقل الحرارة من سطح ما بوحدة أو أكثر من الطرق الآتية: التوصيل، والحمل، والإشعاع. تنتقل الحرارة بالتوصيل خلال جزيئات مادة صلبة ما، دون انتقال الجزيئات من مكانها. ويعطى معدل انتقال الحرارة $\dot{Q}$ في مكان ما لأحد المواد، عند حالة الاستقرار، باستخدام معادلة فوريير (Fourier) التي تنص على ما يلي:

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (4.11)$$

حيث k هي الموصلية الحرارية و A مساحة المقطع العمودي على اتجاه سريان الحرارة، و dT/dx هي معدل تغير درجة الحرارة في الاتجاه x الذي تسري فيه الحرارة.

وباستخدام العلاقة السابقة، يمكن استنباط المعادلات الخاصة بانتقال الحرارة في بعض التطبيقات الهندسية المهمة. فمثلاً إذا كان هناك حائطاً سمكه δ وكانت درجتى حرارة سطحيه هما T_1 و T_2 ، فإن معدل انتقال الحرارة خلال السطح عند حالة الاستقرار يعطى بالمعادلة الآتية:

$$\dot{Q} = kA \frac{T_1 - T_2}{\delta} \quad (4.12)$$

حيث فرض أن T_1 أكبر من T_2 ، وحيث A هي مساحة الحائط و k هي الموصلية الحرارية لمادة الحائط.

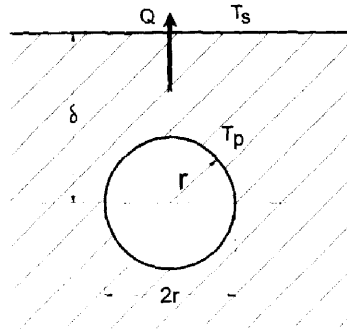
كما يمكن انتقال الحرارة بالتوصيل في شكل أسطواني، بفرض أنبوب قطره الداخلي d_i وقطره الخارجي d_o وله درجة حرارة سطح داخلي قدرها T_i ودرجة حرارة سطح خارجي قدرها T_o وكانت T_i أكبر من T_o ، فإن معدل انتقال الحرارة من السطح الداخلي إلى السطح الخارجي في حالة الاستقرار تعطى كما يلي:

$$\dot{Q} = 2\pi kL \frac{T_i - T_o}{\ln(d_o/d_i)} \quad (4.13)$$

حيث L هي طول الأنبوب.

ومن التطبيقات الأخرى المهمة لانتقال الحرارة بالتوصيل، انتقال الحرارة من سطح أنبوب داخل حائط، كما هو موضح بشكل ٤,٢. فإذا كانت درجة

حرارة سطح الأنبوب هي T_p وكانت درجة حرارة السطح الخارجي للحائط هي T_s وكان الأنبوب على مسافة δ من سطح الحائط، عندئذ يقدر معدل انتقال الحرارة من الأنبوب إلى سطح الحائط، بفرض أن T_p أكبر من T_s كما يلي [ASHRAE 2001,1986].



شكل ٤,٢ انتقال الحرارة بالتوصيل من سطح أنبوب مدفون داخل حائط على عمق δ من سطح الحائط.

$$\dot{Q} = 2\pi kL \frac{(T_p - T_s)}{\ln[(\delta + \sqrt{\delta^2 - r^2})/r]} \quad (4.14)$$

حيث r هي نصف قطر الأنبوب و L هي طوله. ويلاحظ أن المعادلة السابقة صحيحة فقط عندما تكون δ أكبر من r وتكون L أكبر بكثير من قطر الأنبوب.

مثال ٤,٣

أنبوب بقطر ١٥ سم يحمل ماء ساخن عند درجة ٤٠°م، مدفونة في بلاطة من الأسمنت المسلح عند عمق قدره ٣٠ سم من سطح البلاطة. بفرض أن سطح الأسمنت محفوظ عند درجة حرارة قدرها ١٥°م، وأن الموصلية الحرارية

للأسمنت المسلح هي ١,٥ وات/م.°م. احسب معدل الحرارة المنتقلة من الماء إلى سطح البلاطة، لكل وحدة طول من الأنبوب.

الحل

بفرض أن سطح الأنبوب عند ٤٠°م ، باستخدام معادلة ٤,١٤ ينتج أن:

$$\frac{\dot{Q}}{L} = 2\pi k \frac{T_p - T_s}{\ln[(\delta + \sqrt{\delta^2 - r^2})/r]}$$

$$\frac{\dot{Q}}{L} = \frac{2\pi \times 1.5 \times (40 - 15)}{\ln[(0.3 + \sqrt{0.3^2 - 0.075^2})/0.75]}$$

$$= 114 \text{ W/m}$$

٤,٦ انتقال الحرارة بالحمل

يلزم لانتقال الحرارة بالحمل وجود مائع يتحرك بالقرب من جسم أو سطح. وتنتقل الحرارة من السطح إلى المائع أو بالعكس خلال جزيئات المائع التي تتحرك وتحمل معها الحرارة من مكان إلى آخر. نلاحظ هنا أنه إذا لم تتمكن هذه الجزيئات من الحركة كان انتقال الحرارة بالتوصيل وليس بالحمل.

ينقسم انتقال الحرارة بالحمل إلى قسمين: انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي (أو ما يعرف أيضا بالحمل الحر)، وانتقال الحرارة بالحمل القسري. في حالة انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي تتحرك جزيئات المائع نتيجة تغير كثافتها بسبب انتقال الحرارة إليها أو منها. أما في حالة الحمل القسري، فإن جزيئات المائع تتحرك بفعل عامل خارجي، كمروحة أو مضخة مثلاً، وليس كنتيجة تغير كثافة المائع. يقدر معدل انتقال الحرارة من سطح ما إلى مائع بجواره، بالمعادلة الآتية:

$$\dot{Q} = hA\Delta T \quad (4.15)$$

حيث h هي معامل انتقال الحرارة بين السطح والمائع، و A هي المساحة العمودية على اتجاه انتقال الحرارة (مساحة المسطح)، و ΔT هي فرق درجات الحرارة بين السطح والمائع. ويعتمد حساب قيمة المعامل h على:

- أ) نوع الحمل أن كان حملاً طبيعياً أم حملاً قسرياً.
- ب) نوع السريان إن كان سرياناً طبقيّاً أم سرياناً مضطرباً.
- ج) الشكل الهندسي للسطح.
- د) الخواص الحرارية للسريان.

ففي حالة انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي تقدر عادة قيمة h من العلاقة الآتية

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (4.16)$$

حيث Nu هو رقم نوسلت (Nusselt)، و Gr هو رقم جراشوف (Grashof)، و Pr هو رقم برانتل (Prandtl) وهذه الأرقام غير بعدية وتعرف على التوالي كما يلي:

$$Nu = hL/k \quad (4.17)$$

$$Gr = g\beta\Delta T L^3/\nu^2 \quad (4.18)$$

$$Pr = \mu c_p/k \quad (4.19)$$

حيث k هي الموصلية الحرارية للمائع الحامل للحرارة، و β هي معامل التمدد الحراري للمائع، و c_p هي الحرارة النوعية للمائع عند ثبات الضغط، و ν و μ هي على التوالي اللزوجة الكينماتيكية واللزوجة الديناميكية، و g هي عجلة الجاذبية الأرضية. وتعرف L بأنها الطول المميز لعملية انتقال الحرارة، وتعتمد قيمة L على الشكل الهندسي لسطح انتقال الحرارة. أيضاً، يعتمد شكل الدالة f في معادلة (4.16) على نوع السريان. ومن الأشكال الهندسية المستخدمة في

العديد من التطبيقات الهندسية، انتقال الحرارة بين الأسطح المستوية وأسطح الأنابيب، ولهذه الأسطح تؤول المعادلة (4.16) إلى الآتي إذ كان السريان طبقيًا [ASHRAE 1997].

$$Nu = 0.56(Gr Pr)^{0.25}, \quad 10^4 \leq Gr Pr < 10^8 \quad (4.20)$$

أو إلى المعادلة الآتية إذا كان السريان مضطربًا

$$Nu = 0.13(Gr Pr)^{0.33}, \quad 10^8 \leq Gr Pr < 10^{12} \quad (4.21)$$

وبين جدول ٤,٣ الطول المميز لبعض الأشكال الهندسية التي تستخدم مع المعادلتين السابقتين.

جدول ٤,٣ الطول المميز لانتقال الحرارة بالحمل الطبيعي من بعض الأسطح.

الشكل الهندسي للسطح	الطول المميز
سطح مستوى رأسي	الارتفاع
السطح الخارجي لأنبوب رأسي	الطول
سطح مستوى أفقي	
(السطح الساخن متجه لأعلى والسطح البارد متجه لأسفل)	الطول
السطح الخارجي لأنبوب أفقي	القطر

يقدر معامل انتقال الحرارة بالحمل القسري عادة من معادلة تأخذ الشكل الآتي:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (4.22)$$

حيث Re هو رقم رينولدز الذي يعرف لطول مميز L كما يلي

$$Re = VL/\nu \quad (4.23)$$

حيث V هي السرعة، و L هو الطول المميز لانتقال الحرارة. ولقد أورد ماك أدمز [McAdams 1954] العلاقة الآتية لحساب معامل انتقال الحرارة لسريان مضطرب داخل أنبوب قطره d (حيث يجب أن يكون قيمة رقم رينولدز أكبر من ٢١٠٠).

$$\frac{hd}{k} = 0.023 \left(\frac{Vd}{\nu} \right)^{0.8} \left(\frac{\mu C_p}{k} \right)^{0.4} \quad (4.24)$$

حيث تقدر خواص المائع عند درجة حرارته. ومن التطبيقات الهندسية المهمة انتقال الحرارة بالحمل القسري بين أسطح مستوية في الهواء، ولقد أورد ماك أدمز (١٩٥٤) [McAdams 1954] العلاقات المعملية الآتية لحساب h عند هذه الحالة:

$$\left. \begin{aligned} h &= 7.2V^{0.78} , & 5 \leq V \leq 30 \text{ m/s} \\ &= 5.62 + 3.9V , & V \leq 5 \text{ m/s} \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

حيث V هي سرعة الهواء (م/ث) و h بوحدة (وات/م^٢).

مثال ٤,٤

غرفة ارتفاعها الداخلي ٣ متر ومكيفة الهواء عند ٢٤°م. احسب معامل انتقال الحرارة بالحمل بين هواء الغرفة والحائط الجنوبي بها إذا كانت درجة حرارة سطح الحائط هي ٣٠°م. احسب أيضا الحمل الحراري المنتقل إلى الغرفة من الحائط إذا كان عرض الحائط ٤ أمتار.

الحل

تحتسب خواص الهواء عند درجة الحرارة المتوسطة، أي عند ٢٧°م من ملحق ج كما يلي:

$$k = 0.0262 \quad \text{W /m K}$$

$$\nu = 1.57 \times 10^{-5} \quad \text{m}^2/\text{s}$$

$$\beta = 0.18 \times 10^{-3} \quad 1/\text{K}$$

$$\text{Pr} = 0.708$$

من جدول ٤,٣ نجد أن الطول المميز للحائط هو ارتفاع الحائط، أي ٣ أمتار.
من معادلة (4.18) يحسب قيمة Gr كما يلي:

$$\text{Gr} = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} = \frac{9.81 \times 0.18 \times 10^{-3} \times (30 - 24) \times 27}{(1.57 \times 10^{-5})^2}$$

$$= 1.17 \times 10^9$$

$$\text{Gr Pr} = 1.17 \times 10^9 \times 0.708 = 8.28 \times 10^8$$

$$\text{Nu} = 0.13 \left(8.28 \times 10^8 \right)^{0.33} = 114$$

$$h = \frac{0.026 \times 114}{3} = 1 \quad \text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ويكون الحمل الحراري من الحائط كما يلي:

$$\dot{Q} = hA\Delta T = 1 \times 3 \times 4 \times (30 - 24) = 72 \text{ W}$$

٤,٧ انتقال الحرارة بالإشعاع

لا يحتاج انتقال الحرارة بالإشعاع إلى وسط مادي لنقل الحرارة، كما هو الحال في انتقال الحرارة بالتوصيل وبالحمل. تنتقل الحرارة بالإشعاع بين الأسطح المختلفة كموجات كهرومغناطيسية. وتقدر الحرارة المنتقلة بالإشعاع من سطح ما بطرق ومعادلات رياضية أكثر تعقيدا من المعادلات المستخدمة لحساب الحرارة المنتقاة بالتوصيل والحمل. ويعزى هذا إلى أن المعدل الإجمالي للحرارة المنتقلة من سطح بالإشعاع يعتمد على الشكل الهندسي لهذا السطح والشكل الهندسي لجميع الأسطح الأخرى الموجودة حول هذا الشكل وكذلك وضعها النسبي بالنسبة للسطح تحت الدراسة. فمن المعروف أن أي سطح يبث حرارة بالإشعاع، ويقدر معدل هذه الحرارة بالمعادلة الأساسية الآتية:

$$Q = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (4.26)$$

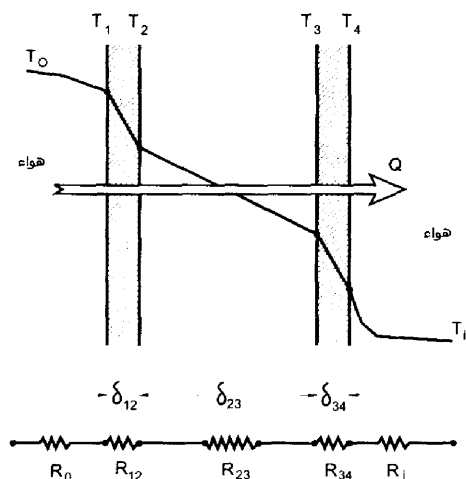
حيث A مساحة السطح، و T درجة حرارته (درجة مطلقة)، و ε هي الانبعاثية المتوسطة للسطح، و σ هي ثابت ستيفان وبولتزمان (Stefan-Boltzmann) = 5.67×10^{-8} وات/م². درجة مطلقة^٤). فإذا أشير إلى هذا السطح بالرقم ١، وكان هناك سطحًا آخر أشير إليه بالرقم ٢ فإن معدل الحرارة المنتقلة من السطح ٢ إلى السطح ١ يقدر بالعلاقة التالية

$$\dot{Q}_{21} = \varepsilon_2 \sigma A_2 F_{21} T_2^4 \quad (4.27)$$

حيث F_{21} معامل الشكل الهندسي للسطح ٢ بالنسبة للسطح ١. ويمثل المعامل F_{21} نسبة الإشعاع المنبعث من السطح ٢ وتم وصوله إلى السطح ١، إلى إجمالي الإشعاع المنبعث من السطح ٢. وتعتمد قيمة المعامل F_{21} على الشكل الهندسي للسطحين ١ و ٢ وموقع كل منهما بالنسبة للآخر، وتعطي مراجع انتقال الحرارة قيم F_{21} للعديد من الأشكال الهندسية للأسطح (انظر: 1997، ASHRAE، 1993، Kreith, & Bohn، 2002، Incropera & Dewitt، 1989، Ozisik، Cengel، 1998، وغيرهم).

٨،٤ المعامل الكلي لانتقال الحرارة

بينا فيما سبق انتقال الحرارة بالتوصيل وبالحمل وبالإشعاع في نظم هندسية بسيطة، تختلف في معظم الأحيان عن التطبيقات الهندسية العملية. دعنا الآن ندرس انتقال الحرارة في حائط مكون من ثلاث طبقات من مواد مختلفة ومعرض لهواء عند درجات حرارة مختلفة من جهتي الحائط، كما هو مبين بشكل ٤،٣. في هذا الشكل، تسرى الحرارة من الهواء عند T_o إلى السطح T_1 بالحمل، ثم تسرى بالتوصيل بين الحوائط الثلاث حتى تصل إلى السطح الداخلي عند T_4 ، فتنتقل الحرارة مرة أخرى بالحمل إلى الهواء عند درجة الحرارة T_i . ويمكن عندئذ حساب معدل الحرارة المنتقلة خلال الحائط بالعلاقة التالية:



شكل ٤,٣ انتقال الحرارة بالحمل والتوصيل في حائط.

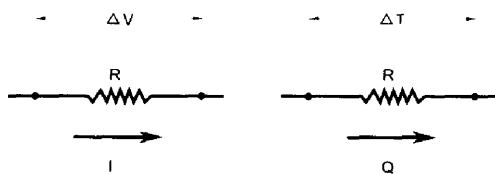
$$Q = UA (T_o - T_i) \quad (4.28)$$

حيث U هي المعامل الكلي لانتقال الحرارة بين الهواء عند درجتي الحرارة T_o و T_i من جهتي الحائط، ولحساب قيمة U تتبع عادة طريقة التماثل بين سريان الحرارة وسريان التيار الكهربائي في الدوائر الكهربائية. فمن المعروف في الدوائر الكهربائية التعبير عن التيار الكهربائي بالعلاقة التالية (انظر شكل ٤,٤)

$$I = \Delta V / R \quad (4.29)$$

عندئذ يمكن التعبير عن سريان الحرارة بالعلاقة التالية:

$$Q = \Delta T / R$$



شكل ٤,٤ التماثل بين الدوائر الكهربائية والحرارية.

في العلاقتين السابقتين يناظر سريان الحرارة سريان التيار الكهربائي، ويناظر فرق الجهد فرق درجات الحرارة، بينما تتناظر المقاومة الحرارية المقاومة الكهربائية (انظر شكل ٤,٤). من هذا المنطلق يمكن كتابة المعادلة السابقة في الصورة التالية:

$$\dot{Q} = \frac{T_o - T_i}{R_{eq}} = \frac{(T_o - T_i)}{1/UA} \quad (4.30)$$

حيث R_{eq} هي المقاومة الحرارية المكافئة للنظام الموضح بشكل ٤,٤. وبالرجوع إلى المعادلات الأساسية لحساب سريان الحرارة بالتوصيل وبالحمل، ونظراً لأن المقاومة الحرارية على التوالي، عندئذ تحسب قيمة U من العلاقة التالية:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_o A} + \frac{\delta_{12}}{k_{12} A} + \frac{\delta_{23}}{k_{23} A} + \frac{\delta_{34}}{k_{34} A} + \frac{1}{h_i A}$$

أي إن

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{\delta_{12}}{k_{12}} + \frac{\delta_{23}}{k_{23}} + \frac{\delta_{34}}{k_{34}} + \frac{1}{h_i} \quad (4.31)$$

ويمكن استخدام فكرة التماثل بين الدوائر الكهربائية والحرارية لحساب قيمة U في العديد من النظم الهندسية الأخرى غير تلك الموضحة بشكل ٤,٣.

٤,٩ الزعانف

تستخدم الزعانف أو الأسطح الممتدة لتحسين معدل انتقال الحرارة بين سطح ما ومائع. ولمعرفة كيف يتم ذلك دعنا ندرس انتقال الحرارة من سطح أنبوب إلى هواء يسرى خارجها. يقدر معدل الحرارة المنتقلة في هذه الحالة كما يلي:

$$\dot{Q} = hA \Delta T \quad (4.32)$$

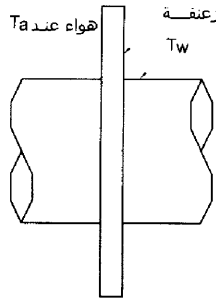
حيث h هي معامل انتقال الحرارة بالحمل بين السطح الخارجي للأنبوب والهواء، و A هي المساحة الخارجية للأنبوب، و ΔT هي فرق درجات الحرارة بين سطح الأنبوب والهواء. لزيادة معدل الحرارة المنتقلة دعنا نضع زعانف على السطح الخارجي للأنبوب (انظر شكل ٤,٥). يقدر معدل الحرارة المنتقلة من سطح الزعنفه عندئذ كما يلي:

$$\dot{Q}_f = h \int_0^{A_f} (T - T_a) dA_f \quad (4.33)$$

حيث T هي درجة حرارة سطح الزعنفه، و T_a هي درجة حرارة الهواء، و A_f مساحة سطح الزعانف. ونلاحظ هنا تغير درجة حرارة سطح الزعنفه مع الموقع على السطح. وتكتب المعادلة السابقة عادة في الشكل التالي:

$$\dot{Q}_f = \eta_f h A_f (T_w - T_a) \quad (4.34)$$

حيث η_f هي كفاءة الزعنفه، T_w هي درجة حرارة قاعدة الزعنفه عند الحائط. وتعطي كتب انتقال الحرارة قيم η_f لأشكال مختلفة من الزعانف (على سبيل المثال لا الحصر انظر: ASHRAE , 2009 ، Kreith, & Bohn, 1993 ، Incropera & Dewitt, 2002 ، Cengel, 1998 ، Ozisik, 1989 وغيرهم).



شكل ٤,٥ استخدام الزعانف على أنبوب لتحسين انتقال الحرارة بين سطح الأنبوب والهواء المحيط.

في المثال السابق، تنتقل الحرارة من سطح الأنبوب بالإضافة إلى انتقالها من سطح الزعانف. ويمكن إيجاد معدل الحرارة المنتقلة من السطح بجمع الحرارة المنتقلة من سطح الأنبوب Q_p والحرارة المنتقلة من الزعانف Q_f كما يلي:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \dot{Q}_p + \dot{Q}_f \\ &= hA_p(T_w - T_a) + \eta_f A_f(T_w - T_a)\end{aligned}\quad (4.35)$$

حيث A_p هي مساحة سطح الأنبوب التي لا توجد عليها زعانف، و A_f هي مساحة سطح الزعانف. وتؤول المعادلة السابقة إلى:

$$\dot{Q} = \eta_s A(T_w - T_a) \quad (4.36)$$

حيث A هي المساحة الإجمالية للأنبوب والزعانف وتساوي $(A_p + A_f)$ ، و η_s هي كفاءة السطح التي تقدر كما يلي:

$$\eta_s = 1 - \frac{A_f}{A}(1 - \eta_f) \quad (4.37)$$

ويمكن إيجاد كفاءة السطح إذا كانت كفاءة الزعنف ونسبة مساحة الزعانف إلى مساحة السطح الكلية معلومة. وتوجد في كتب انتقال الحرارة معادلات وأشكال لإيجاد كفاءة الزعنف حسب نوعها [انظر: 2009، ASHRAE ، Kreith, & Bohn, 1993، Incropera & Dewitt, 2002، Ozisik, 1989، Cengel, 1998].

وتستخدم الزعانف بكثرة في المبادلات الحرارية لتحسين معدل انتقال الحرارة بين السوائل والغازات، حيث توضع الزعانف من جهة الغاز نظراً لأن معامل انتقال الحرارة للغاز أقل كثيراً من مثيله من جهة السوائل.

٤,١٠ المبادلات الحرارية

تستخدم المبادلات الحرارية بكثرة في مخازن التبريد، فهي مبردات الهواء التي تعمل على تبريد الهواء داخل مخازن التبريد، أو المكثفات الخاصة بنظام التبريد، أو وحدات استرجاع الطاقة في بعض النظم لتوفير الطاقة. والمبادل الحراري هو وحدة لتبادل الحرارة بين مائعين أحدهما ساخن والآخر بارد. ويبين شكل ٤,٦ رسمًا تخطيطيًا لمبادلين حراريين بسيطين. ونلاحظ من الشكل وجود نمطين لسريان المائعين بالنسبة لبعضهما البعض. في النمط الأول يسري المائعان البارد والساخن في نفس الاتجاه ويعرف هذا النمط بالسريان الموازي، أما في النمط الثاني، فيسري المائعان في اتجاهين متعاكسين، ويعرف هذا النمط بالسريان المعاكس. ويبين الشكل أيضًا، تغير درجة حرارة المائعين البارد والساخن مع تغير المسافة من دخول المائع إلى المبادل الحراري، وقد تبقى درجة حرارة أحد المائعين ثابتة خلال مروره داخل المبادل الحراري، إذا تعرض هذا المائع للغليان أو التكثيف داخل المبادل الحراري.

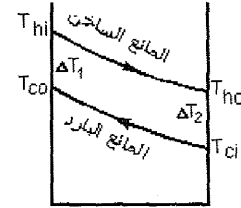
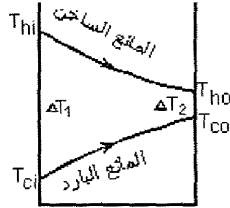
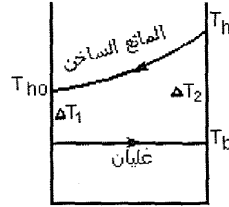
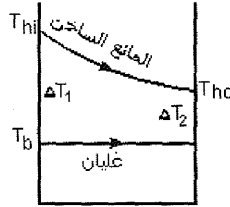
يحسب معدل انتقال الحرارة من المائع الساخن إلى المائع البارد، بوحدة من المعادلتين الأساسيتين الآتيتين، وذلك بفرض أن المبادل معزول جيدًا عن الجو المحيط:

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_h (T_{hi} - T_{ho}) \quad (4.38)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C_c (T_{co} - T_{ci}) \quad (4.39)$$

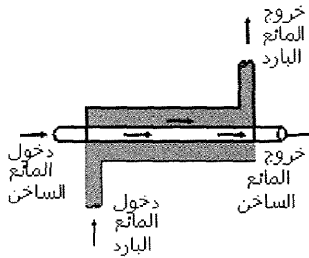
حيث $\dot{m}$ هي معدل سريان المائع، و C هي الحرارة النوعية للمائع عند ثبات الضغط، و T هي درجة الحرارة، ويعني التذييل h المائع الساخن، والتذييل c المائع البارد، والتذييل i الدخول، والتذييل o الخروج. كما يوجد نمط آخر

لسريان الموائع في المبادلات وهو نمط تعامد سريان المائع البارد مع المائع الساخن.

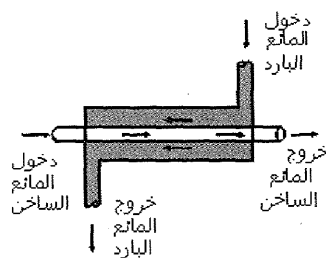


المسافة من الدخول

المسافة من الدخول



سريان موافق



سريان معاكس

شكل ٤, ٦ تغير درجات الحرارة للمائع الساخن والمائع البارد في المبادلات الحرارية عند سريان مواز أو سريان معاكس.

أيضاً، يحسب معدل انتقال الحرارة من أي من المعادلتين الآتيتين:

$$\dot{Q} = U_i A_i \Delta T_m \quad (4.40)$$

$$\dot{Q} = U_o A_o \Delta T_m \quad (4.41)$$

حيث U_i هو المعامل الكلي لانتقال الحرارة مسندة إلى المساحة الداخلية للمبادل الحراري (جهة المائع الساخن بشكل ٤,٦)، و U_o هو المعامل الكلي لانتقال الحرارة مسندة إلى المساحة الخارجية للمبادل الحراري (جهة المائع البارد بشكل ٤,٦) و ΔT_m هي الفرق اللوغاريتمي لدرجات الحرارة بين المائعين وتحسب U_i و U_o كما يلي:

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} + R_i + R_o \quad (4.42)$$

حيث d_o و d_i هما على التوالي القطر الداخلي والقطر الخارجي للأنبوب و L هي طول الأنبوب، k هي الموصلية الحرارية لمادة الأنبوب، و R_i و R_o هي المقاومة الحرارية للأوساخ على السطح الداخلي والسطح الخارجي للأنبوب على التوالي.

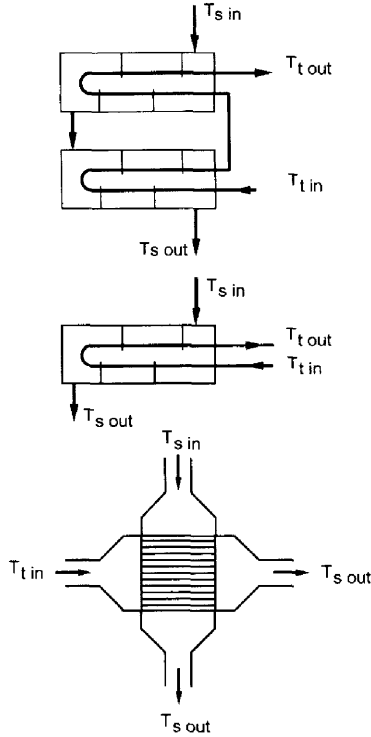
ويقدر الفرق اللوغاريتمي لدرجات الحرارة للمبادلين الحراريين بشكل ٤,٦ من العلاقة الرياضية الآتية:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (4.43)$$

حيث ΔT_1 و ΔT_2 هما فرق درجات الحرارة بين المائع الساخن والمائع البارد عند طرفي المبادل الحراري (انظر شكل ٤,٦).

ويمثل المبادلان الحراريان بشكل ٤,٦ شكلاً بسيطاً للمبادلات الحرارية، ويختلف شكل هذه المبادلات في العديد من التطبيقات عن هذين الشكلين. ويبين شكل ٤,٧ رسماً تخطيطياً لأشكال بعض المبادلات الحرارية الأخرى. ونلاحظ وجود أنواع أخرى للمبادلات الحرارية غير المبادلات ذات السريان الموازي وذات السريان المعاكس. وتعتبر العلاقات السابقة صحيحة لجميع أنواع

المبادلات الحرارية ما عدا العلاقة الخاصة بحساب ΔT_m . ولقد اقترح العديد من الباحثين حساب ΔT_m لأي شكل من المبادلات الحرارية من العلاقة الآتية:



(التدليل t يعني السريان داخل الأنابيب، والتدليل s يعني السريان داخل الغلاف)

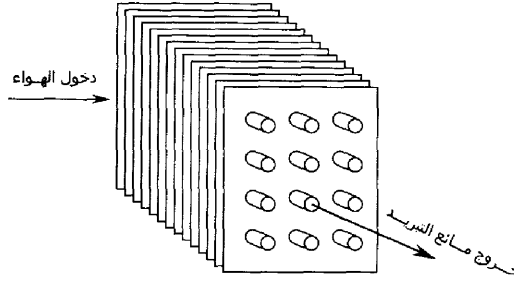
شكل ٧، ٤ توضيح لبعض أنواع المبادلات الحرارية.

$$\Delta T_m = F(\Delta T_m)_c \quad (4.44)$$

حيث $(\Delta T_m)_c$ هي الفرق اللوغاريتمي لدرجات الحرارة بفرض سريان معاكس، و F هي معامل تصحيح. وتعطي مراجع المبادلات الحرارية قيم F للعديد من الأشكال المختلفة للمبادلات الحرارية [على سبيل المثال. انظر: 2009].

Ozisik, Incropera & Dewitt, 2002, Kreith, & Bohn, 1993, ASHRAE
[Cengel, 1998, 1989].

يستخدم العديد من المبادلات الحرارية أيضاً زعانف لتحسين معدل انتقال الحرارة. عندئذ يصبح حساب مساحة انتقال الحرارة والمعامل الكلي لانتقال الحرارة أكثر تعقيداً من الحالة البسيطة المعطاة بشكل ٤,٦. ومن أهم المبادلات الحرارية المستخدمة للزعانف ملف تبريد الهواء في مخازن التبريد. ويبين شكل ٤,٨ رسماً تخطيطياً لملف تبريد هواء. لاحظ بالشكل وجود الزعانف من جهة الهواء، ولاحظ أيضاً أن نمط السريان عمودي على اتجاه سريان مائع التبريد داخل الأنابيب.



شكل ٤,٨ تبريد الهواء باستخدام سريان عمودي من نوع الأنبوب والزعنفة.

ومن الطرق الأخرى لحساب معدل الحرارة المنتقلة خلال سطح المبادل الحراري، طريقة الفاعلية. وتعرف الفاعلية لمبادل حراري بأنها نسبة كمية الحرارة المنتقلة فعليا على أكبر كمية حرارة ممكنة في المبادل الحراري كما يأتي:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} \quad (4.45)$$

وتعرف $\dot{Q}_{\max}$ بأنها تساوي حاصل ضرب أعلى فرق درجة حرارة للمبادل وهو $(T_{hi} - T_{ci})$ في أقل القيمتين $(\dot{m}_h C_h)$ أو $(\dot{m}_c C_c)$. أي إن

$$\dot{Q}_{\max} = (\dot{m}C)_{\min} (T_{hi} - T_{ci}) \quad (4.46)$$

فلو فرضنا أن $(\dot{m}C)_{\min} = \dot{m}_h C_h$ فإن الفاعلية تصبح

$$\varepsilon = \frac{(\dot{m}C)_h (T_{hi} - T_{ho})}{(\dot{m}C)_{\min} (T_{hi} - T_{ci})} = \frac{(\dot{m}C)_c (T_{co} - T_{ci})}{(\dot{m}C)_h (T_{hi} - T_{ci})} \quad (4.47)$$

وتعرف $(\dot{m}C)_{\min}$ في المعادلتين السابقتين بأنها القيمة الصغرى من $\dot{m}_h C_h$ و $\dot{m}_c C_c$.

كما يُعرف عدد وحدات الانتقال (NTU = number of transfer unit) بأنه نسبة UA على $(\dot{m}C)_{\min}$ ، أي أن

$$NTU = \frac{UA}{(\dot{m}C)_{\min}} \quad (4.48)$$

كما يمكن تعريف نسبة السعة الحرارية C_r بالمعادلة الآتية:

$$C_r = \frac{(\dot{m}C)_{\min}}{(\dot{m}C)_{\max}} \quad (4.49)$$

وتوجد في كتب انتقال الحرارة العديد من الخرائط التي تعطي تغير الفاعلية مع NTU و C_r . بل توجد معادلات للفاعلية كدالة في هذين المتغيرين أي إن

$$\varepsilon = f(NTU, C_r) \quad (4.50)$$

وتحسب قيمة ε من خرائط خاصة بذلك في العديد من المراجع [مثلاً، انظر: Ozisik 1989, Kreith & Bohn 1993، وغيرهما]. وبمعرفة قيمة ε ، يُحسب معدل الحرارة المنتقلة في المبادل الحراري كما يلي:

$$\dot{Q} = \varepsilon(\dot{m}c)_{\min} (T_{hi} - T_{ci}) \quad (4.51)$$

وهي المعادلة البديلة للمعادلة التي تستخدم الفرق اللوغاريتمي لدرجات الحرارة لحساب معدل انتقال الحرارة في المبادل الحراري.

الرموز ومعانيها للفصل الرابع

A	المساحة [م ^٢]
C_c	الحرارة النوعية للمائع البارد [كجول/كجرام.كلفن °م]
C_h	الحرارة النوعية للمائع البارد [كجول/كجرام.كلفن °م]
d	القطر [م]
f	معامل الاحتكاك [-]
F	معامل التصحيح لفرق درجات الحرارة اللوغارتمي [-]
Gr	رقم جراشوف [-]
h	معامل انتقال الحرارة بالحمل [وات/(م ^٢ .كلفن)]
k	معامل الموصلية [وات/(م.كلفن)]
K	معامل فقد الضغط [-]
$\dot{m}$	معدل السريان [كجم/ث]
NTU	عدد وحدات الانتقال [-]
Nu	رقم نوسولت [-]
P	الضغط [باسكال أو كيلو باسكال]
Pr	رقم برانتل [-]
$\dot{Q}$	معدل انتقال الحرارة [وات]
R	المقاومة الحرارية [°م/وات]
Re	رقم رينولدز [-]
U	معامل انتقال الحرارة الكلي [وات/(م ^٢ .كلفن)]
u	الطاقة الداخلية النوعية [كجول/كجم]
V	السرعة [م/ث]
$\dot{V}$	معدل السريان الحجمي [م ^٣ /ث]

التذييل

c	المائع البارد
h	المائع الساخن
i	عند الدخول
max	القيمة العليا
min	القيمة الدنيا
o	عند الخروج
s	الغلاف
t	الأنبوب

الحروف الإغريقية

ΔT_m	الفرق اللوغارتمي لدرجات الحرارة [$^{\circ}\text{م}$]
β	معامل التمدد الحجمي [كلفن $^{-1}$]
δ	السُمك [م]
ε	معامل الانبعاثية الإشعاعية لجسم [-] أو فعالية المبادل الحراري [-]
η_f	كفاءة الزعنف [-]
η_s	كفاءة السطح [-]
μ	اللزوجة الدينامكية [باسكال.ث]
ν	اللزوجة الكينماتية [م ^{2} /ث]
ρ	الكثافة [كجم/م ^{3}]
σ	ثابت ستيفان وبولتزمان [= 5.67×10^{-8} وات/(م ^{2} .كلفن ^{4})]

الفصل الخامس

متطلبات ومواصفات التبريد لحفظ الأغذية

٥,١ مقدمة

نعالج في الفصل الحالي العوامل التي تؤدي إلى تلف وفساد الأغذية وكيفية التغلب على هذه العوامل لحفظ الأغذية لفترات طويلة. نتعرض بعد ذلك لظاهرتي فقد الماء من المواد الغذائية الطازجة والحرارة المصاحبة لتتفسها. وفي نهاية الفصل نقدم الخواص الحرارية للمواد الغذائية، ثم الشروط المثلى (درجة حرارة ورطوبة نسبية) اللازمة لتخزين هذه المواد.

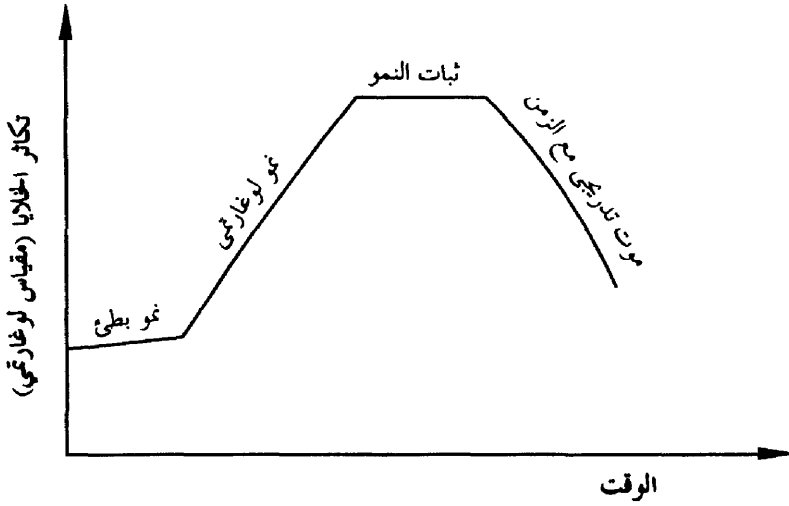
٥,٢ أسباب تلف الأغذية

يقصد بتلف أو فساد المواد الغذائية أن يتغير مظهر هذه المواد ومذاقها ورائحتها، وقد تصبح سامة أو ضارة للاستخدام الآدمي. وتظهر هذه التغيرات نتيجة عمليات فسيولوجية وكيميائية بالأغذية يسببها نمو بعض الكائنات المجهرية في هذه الأغذية ونتيجة نشاط بعض الأنزيمات بها. وتشمل الكائنات المجهرية التي تؤدي إلى فساد الأغذية البكتيريا والفطريات والخمائر، وإن كانت البكتيريا هي أهم الكائنات المجهرية التي تؤدي إلى فساد المأكولات، وتصل الكائنات المجهرية إلى المواد الغذائية من عدة مصادر: محمولة بالهواء و/أو الحشرات الطائرة والزاحفة، أو بالحيوانات أو الإنسان.

تنمو الكائنات المجهرية على المواد الغذائية مسببة تلفها، إلا أن معدل هذا النمو يعتمد بدرجة كبيرة على الظروف البيئية المحيطة من درجة حرارة ورطوبة ونسبة أكسجين بالهواء المحيط. وبالطبع توجد ظروف بيئية مثلى يصل عندها نمو

هذه الكائنات إلى أقصى معدل للنمو. كما توجد أيضا ظروف أخرى مثلى يقف عندها معدل هذا النمو إلى أدنى قيمة له، أو ينعدم هذا النمو كليا.

يمر نمو الكائنات المجهرية في المادة الغذائية بأربع مراحل متتالية هي كما يلي (انظر شكل ٥,١):



شكل ٥,١ مراحل نمو الكائنات المجهرية مع الزمن [ASHRAE 1994].

أولا مرحلة النمو البطيء، وهي أولى مراحل نمو الكائنات المجهرية في المنتج الغذائي ويعزى بطء النمو في هذه المرحلة إلى تأقلم هذه الكائنات مع الظروف البيئية الجديدة التي وجدت بها. بانتهاء هذه المرحلة تبدأ المرحلة الثانية وهي النمو اللوغاريتمي لهذه الكائنات، ويزداد معدل النمو باضطراد مع مرور الزمن حتى تصل هذه المرحلة إلى نهايتها. تبدأ المرحلة الثالثة بعد ذلك، وتتميز هذه المرحلة بثبات نمو هذه الكائنات المجهرية مع الزمن. وتستمر المرحلة الثالثة

لفترة زمنية تبدأ بعدها المرحلة الرابعة والأخيرة، وهي المرحلة التي تموت فيها الكائنات المجهرية تدريجياً مع الزمن.

ويلزم التتويه هنا أنه يجب عدم السماح للكائنات المجهرية بالنمو في المرحلة اللوغاريتمية، حيث يصعب التحكم في نموها في هذه المرحلة، ويجب اتخاذ الأسباب للمحافظة على نمو هذه الكائنات فقط في المرحلة الأولى، أي مرحلة النمو البطيء.

٥,٣ حفظ الأغذية بالتبريد

يوجد ثلاث وسائل يفضل العمل بها مجتمعة (إذا أمكن) للمحافظة على المواد الغذائية في حالة جيدة. وتتلخص هذه الوسائل في الآتي:

أ) الحيلولة دون تلوث المواد الغذائية بالكائنات المجهرية الضارة، أو الإقلال ما أمكن من هذا التلوث.

ب) منع أو إبطاء معدل نمو الكائنات المجهرية بالمواد الغذائية.

ج) إبادة الكائنات المجهرية الموجودة بالمواد الغذائية.

في أولى الوسائل السابقة، تتخذ الاحتياطات والسبل لمنع تلوث المواد الغذائية بالكائنات المجهرية. في هذا السياق يجب استخدام مرشحات هواء (فلتر) دقيقة وعدم السماح ببلل هذه المرشحات، وأن تكون دائماً جافة. أيضاً يجب تصميم غرف التخزين عند ضغط هواء أعلى من ضغط الهواء خارجها لمنع تسرب الهواء الخارجي الذي قد يحمل ثلوثاً إلي داخل غرف التخزين. كما يجب عدم السماح بأي تكثيف لبخار الماء داخل غرف التخزين لمنع وجود أي بلل داخل هذه الغرف (يساعد البلل على نمو الكائنات المجهرية). كما يوصى بالحيلولة دون تجمع الماء المتكثف من ملفات التبريد أسفل هذه الملفات وإنما يجب صرفه فور تساقطه إلى شبكة الصرف.

لمنع أو إبطاء نمو الكائنات المجهرية طبقاً للوسيلة الثانية لحفظ المواد الغذائية، دعنا نتعرف أولاً على العوامل التي تؤثر في نمو هذه الكائنات. تنقسم هذه العوامل إلى قسمين: ذاتي وخارجي. تشمل العوامل الذاتية نوع المادة الغذائية والتكوين البيولوجي لهذه المادة، ونشاط الماء والأس الهيدروجيني بها، إضافة إلى الكائنات المجهرية الموجودة بالمادة الغذائية. ويقصد بنشاط الماء في المادة الغذائية بأنه مدى توفر الماء بالمادة الغذائية لنمو الكائنات المجهرية الدقيقة بها. لهذا يعرف نشاط الماء a_w بأنها نسبة ضغط بخار المادة الغذائية إلى ضغط بخار الماء الموجود بها. وبالطبع هناك حد أدنى لنشاط الماء ليسمح بنمو كل نوع على حدة من الأنواع المختلفة للكائنات المجهرية. ويعتمد هذا الحد الأدنى على نوع المادة الغذائية [ASHRAE 1994] ويعرف الأس الهيدروجيني بأنه مقياس حمضية أو قلوية أي محلول، وتتراوح قيمة هذا الأس الهيدروجيني بين صفر إلى ١٤، ويكون المحلول متعادلاً عندما يكون قيمة هذا الأس ٧ وتزداد قلوية المحلول كلما ارتفعت قيمة الأس الهيدروجيني، وتزداد حمضية المحلول كلما قلت قيمة الأس الهيدروجيني. وتفضل معظم الكائنات المجهرية المحاليل المتعادلة، حيث يكون معدل نمو هذه الكائنات أفضل ما يمكن، كما أن معظمها لا يمكنه النمو في المحاليل الحمضية نسبياً. ونلاحظ أنه يصعب إبطاء معدل نمو الكائنات المجهرية الضارة التي قد توجد بالمواد الغذائية، عن طريق التحكم في العوامل الذاتية، نظراً لأن هذه العوامل تغير من خواص المادة الغذائية، وتغيير هذه العوامل سوف يؤدي إلى تغيير شكل ومذاق المادة الغذائية.

وتشمل العوامل الخارجية التي تؤثر في الكائنات المجهرية: درجة الحرارة والرطوبة النسبية، ونسبة الأكسجين بالهواء المحيط بالمادة الغذائية. وللتحكم في نمو الكائنات المجهرية بالمواد الغذائية يمكن التحكم بواحد أو أكثر من العوامل الخارجية. فمثلاً بخفض درجة الحرارة إلى ما دون ٤°م يمكن إلى حد كبير الإبطاء

بدرجة ملحوظة من نمو معظم الكائنات المجهرية التي تؤدي إلى تلف المواد الغذائية الطازجة. إلا أنه لا يمكن تعميم هذه القاعدة على جميع الفواكه والخضراوات، حيث يكون التبريد ضاراً في بعض الأحيان ولا يفيد. فمثلاً، لا ينصح بتبريد الموز والكمثرى إلى درجات حرارة متدنية.

ويمكن الحيلولة دون نمو الكائنات المجهرية بالمادة الغذائية، إذا أمكن تجميد هذه المادة. وفي الحقيقة، يعمل التجميد على حفظ المادة الغذائية عند نفس حالتها السابقة قبل التجميد، ولا يعمل التجميد بالطبع على تحسين حالة المادة الغذائية مقارنة بحالتها قبل التجميد. وعموماً يجب عند استخدام التجميد كوسيلة للمحافظة على حالة المادة الغذائية لفترة طويلة أن تكون درجة حرارة التجميد أقل من -١٨°م.

ويساعد التحكم في الرطوبة النسبية، إذا أمكن ذلك، في الحد من نمو الكائنات المجهرية بالمادة الغذائية. إلا أن هناك القليل الذي يمكن عمله في هذا الاتجاه داخل غرف التخزين، حيث يلزم عدم خفض الرطوبة النسبية لهواء غرف التخزين عن قيمة معينة للحد من فقد الماء من المواد الغذائية، وذلك للمحافظة على هذه المواد في حالتها الطازجة عند درجة حرارة فوق درجة التجميد. وكما قدمنا سابقاً أيضاً إمكانية التحكم في نمو الكائنات المجهرية بالمواد الغذائية، عن طريق التحكم في نسبة الأكسجين بهواء غرف التخزين، إلا أن هذه الطريقة لا يفضل أخذها في الاعتبار هنا نظراً لصعوبة تطبيقها عملياً.

في الوسيلة الثالثة للمحافظة على المواد الغذائية في حالة جيدة، يتم القضاء على الكائنات المجهرية بأحد طرق التعقيم أو بإضافة مواد حافظة. ولا تدخل هذه الطرق ضمن موضوع الكتاب، وبالتالي لا نقوم بتقديمها هنا.

٥,٤ تنفس الفواكه والخضراوات الطازجة

تتنفس جميع الفواكه والخضراوات الطازجة شأنها كشأن جميع الكائنات الحية للحصول على الطاقة اللازمة للعمليات الحيوية المختلفة. ويتم في عملية التنفس حرق الجلوكوز بهذه الفواكه والخضراوات بالأكسجين، وإنتاج ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء بالإضافة إلى الطاقة. ويصاحب عملية التنفس طاقة حرارية تُنقل إلى الهواء المحيط، وبالتالي يجب أخذها في الاعتبار كجزء من عمل التبريد. وتقل هذه الطاقة بانخفاض درجة الحرارة للفواكه والخضراوات. ويبين جدول ٥,١ حرارة التنفس لفواكه وخضراوات طازجة عند درجات حرارة مختلفة. ويلاحظ بالطبع اعتماد قيمة هذه الحرارة على نوع الفاكهة والخضراوات المخزنة. ونظراً لاعتماد هذه القيمة أيضاً على الموطن الأصلي لكل نوع مما يصعب معه الحصر، لذا يلزم التنويه بأن القيمة المعطاة بجدول ٥,١ هي الحد الأعلى المتوقع لكل نوع، بصرف النظر عن الموطن. ويبين المثال التالي استخدام جدول ٥,١.

مثال ٥,١

احسب حرارة التنفس لمقدار ٥ طن من الفراولة عند درجة حرارة قدرها

١٠°م.

الحل

من جدول ٥,١ نجد أن حرارة التنفس عند ١٠°م لكل كيلو جرام هي ٢٨١,٤ ملي وات /كجم، عندئذ يمكن حساب حرارة التنفس للمقدار الموجود من الفراولة كما يلي:

$$\dot{Q} = 5000 \times 281.4 \times 10^{-3} = 1407 \text{ W} = 1.407 \text{ kW}$$

جدول ٥,١ حرارة التنفس للفواكه والخضراوات الطازجة عند درجات حرارة مختلفة
(بتصرف من ASHRAE 1993).

حرارة التنفس، ملي وات / كجم			
النوع	صفر درجة مئوية	١٠°م	٢٠°م
بامية	٠	٢٥٩	٧٧٤,٥
برتقال	٩,٢	٤٠,٣	٨٩,٢
بصلة	٢٢٤,١	٠	١٦٣٠,٠
بصل أخضر	٦٥,٩	١٧٤,٦	٤٦٠,٨
بصل جاف	٨,٧	٢١,٣	٥٠,٠
بطيخ	٠	٢٢,٣	٧٤,٢
تفاح	٢,٤	٣٥,٩	١٦٦,٨
تين	٠	٦٨,٤	٢٨١,٨
ثوم	٣٢,٥	٢٨,٦	٥٣,٨
جريب فروت	٠	٠	٥٢,٤
جزر	٤٥,٦	٩٣,١	٢٠٩,٠
خرشوف	١٣٣,٤	٢٩١,٥	٦٩٢,٠
خس	٨٦,٤	١١٨,٨	٢٩٧,٨
خوخ	١٨,٩	٠	٣٠٣,٦
ذرة	١٢٦,١	٣٣٢,٢	٨٥٥,٥
زيتون	٠	٠	١٤٥,٥
شمام	٠	٤٦,١	١٩١,٦
عنب	٨,٢	٢٢,٨	٩٧,٠
قرنبيط	٧١,٣	١٤٤,٥	٢٣٨,١
كرنب	٤٠,٣	٩٨,٤	٠
كمثرى	٢٠,٤	٦٣,٠	٢٦٦,٧
كيوي	٨,٣	٣٨,٩	٥٧,٣
لوبيا	١٠٣,٨	١٧٢,٦	٨٠١,١
ليمون	٠	٠	٦٧,٤
مانجو	٠	٠	٤٤٩,١
مشمش	١٧,٠	٥٥,٨	١٥٥,٢
موز أخضر	٠	٠	١٥٥,٢
موز ناضج	٠	٠	٢٤٢,٥
نعناع	٤٤,٥	٢٧٠,١	٦٧٣,٧

٥,٥ فقد الماء من الفواكه والخضراوات الطازجة

تذبل الفواكه والخضراوات بفقد بعض مائها إلى الهواء المحيط أثناء عملية العرق. ويؤدي فقد الماء إذا زاد عن حد معين إلى تغيير شكل الفواكه والخضراوات وفقدتها رونقها وليونتها. كما يؤدي أيضا فقد الماء من الفواكه والخضراوات إلى نقص وزنها، وبالتالي فقد قيمة البيع لها. لذلك لا يجب أن يزيد فقد الماء من الفواكه والخضراوات الطازجة عن ٥٪ من قيمة الماء الموجود بها.

ويعتمد فقد الماء من الفواكه والخضراوات الطازجة على الفرق بين ضغط بخار الماء بالهواء المحيط وضغط التبخر لبخار الماء داخل هذه الفواكه والخضراوات. ونظرا لوجود الماء بالحالة السائلة داخل هذه الفواكه والخضراوات فيمكن كتابة هذا الفرق كما يلي:

$$\Delta p = (1 - \phi) p_s \quad (5.1)$$

حيث ϕ هي الرطوبة النسبية للهواء الموجودة به الفواكه والخضراوات و p_s هو ضغط التبخر للماء عند درجة حرارة الفواكه والخضراوات (وهي أيضا درجة حرارة الهواء المحيط). وللتعرف على المعادلة السابقة دعنا نفرض هواءً عند درجة حرارة قدرها ٥°م وهواء آخر عند درجة حرارة قدرها ١٥°م، وكلاهما عند رطوبة نسبية قدرها ٦٠٪. من جداول الماء المشبع نجد أن قيمة p_s عند ٥ و ١٥°م على التوالي هي: ٠,٨٧٢ و ١,٧٠٥ كيلو بيسكال، عندئذ يقدر فرق الضغط المحرك لفقد الماء من الفواكه والخضراوات على التوالي كما يلي:

$$T = 5^\circ\text{C}; \quad \Delta p = (1 - 0.6) \times 0.872 = 0.349 \text{ kPa}$$

$$T = 15^\circ\text{C}; \quad \Delta p = (1 - 0.6) \times 1.705 = 0.682 \text{ kPa}$$

أي إن نسبة الماء المفقود بالهواء عند 15°C إلى الماء المفقود من الهواء عند 5°C تساوى تقريباً ٢، أي الضعف. نلاحظ الآن أنه إذا ارتفعت الرطوبة النسبية إلى ٩٠٪، للهواء عند 15°C فإن

$$\Delta P = (1 - 0.9) \times 1.705 = 0.1705 \text{ kPa}$$

عندئذ تقل النسبة السابقة إلى حوالي ٠,٥ بدلا من ٢,٠.

نستنتج مما سبق أهمية قيمة كل من درجة الحرارة والرطوبة النسبية للهواء المحيط بالفواكه والخضراوات الطازجة في حساب مقدار فقد الماء منها.

٥,٦ الخواص الحرارية للمواد الغذائية

يتطلب حساب حمل التبريد لغرف تخزين المواد الغذائية معرفة بعض الخواص الحرارية لهذه المواد، وهي بالتحديد: الحرارة النوعية للمواد الغذائية ودرجة الحرارة عند بداية التجمد لهذه المواد، بالإضافة إلى الحرارة الكامنة للتجميد في بعض المواد الغذائية التي قد تحتاج إلى تجميد. وتبين جداول ٥,٢ إلى ٥,٦ بعض الخواص الحرارية لبعض الخضراوات والفواكه واللحوم والأسماك ومنتجات الألبان والطيور، كدرجة حرارة بداية التجمد والحرارة الكامنة للتجميد [ASHRAE 2006] ولقد أوصت الجمعية الأمريكية لمهندسي التبريد والتكييف (ASHRAE) باستخدام معادلات زيبل [Siebel 1892] لتقدير الحرارة النوعية لجميع المواد الغذائية دون استثناء، وذلك بدلالة النسبة المئوية a لمحتوى الماء (بالكتلة) بهذه المواد [ASHRAE 1993] وتعطى هذه المعادلات كما يلي:

فوق درجة التجمد:

$$C_p = 0.033355 a + 0.84 \quad (5.2A)$$

تحت درجة التجمد:

$$C_p = 0.0126 a + 0.84$$

(5.2B)

حيث C_p هي الحرارة النوعية بوحدات كيلو جول / كجم.°م

جدول ٥,٢ بعض الخواص الحرارية للخضراوات (يتصرف من ASHRAE 2006).

البند	نسبة محتوى الرطوبة	درجة حرارة بدلية لتجمد	الحرارة النوعية فوق درجة لتجمد	الحرارة النوعية تحت درجة لتجمد	الحرارة للكمية للتجميد
	%	°م	كيلوجول/ كجم °م	كيلوجول/ كجم °م	كيلو جول/ كجم
باننجان	٩٢,٠٣	-٠,٨	٤,٠٢	١,٨٣	٣٠٧
بامية	٨٩,٥٨	-١,٨	٣,٩٧	٢,٠٥	٢٩٩
بروكلي	٩٠,٦٩	-٠,٦	٤,٠١	١,٨٢	٣٠٣
بسلة خضراء	٧٨,٨٦	-٠,٦	٣,٧٥	١,٩٨	٢٦٣
بصل	٨٩,٦٨	-٠,٩	٣,٩٥	١,٨٧	٣٠٠
بطاطس	٧٨,٩٦	-٠,٦	٣,٦٧	١,٩٣	٢٦٤
بقوننس	٨٧,٧١	-١,١	٣,٩٣	١,٩٤	٢٩٣
ثوم	٥٨,٥٨	-٠,٨	٣,١٧	٢,١٩	١٩٦
جزر	٨٧,٧٩	-١,٤	٣,٩٢	٢,٠٠	٢٩٣
خرشوف	٨٤,٩٤	-١,٢	٣,٩٠	٢,٠٢	٢٨٤
خس	٩٥,٨٩	-٠,٢	٤,٠٩	١,٦٥	٣٢٠
خيار	٩٦,٠١	-٠,٥	٤,٠٩	١,٧١	٣٢١
نرة	٧٥,٩٦	-٠,٦	٣,٦٢	١,٩٨	٢٥٤
سبانخ	٩١,٥٨	-٠,٣	٤,٠٢	١,٧٥	٣٠٦
طماطم	٩٣,٠٠	-٠,٦	٤,٠٢	١,٧٧	٣١١
عش الغراب	٩١,٨١	-٠,٩	٣,٩٩	١,٨٤	٣٠٧
فلفل أخضر	٩٢,١٩	-٠,٧	٤,٠١	١,٨٠	٣٠٨
قرع عسل	٩١,٦٠	-٠,٨	٣,٩٧	١,٨١	٣٠٦
قرنبيط	٩١,٩١	-٠,٨	٤,٠٢	١,٨٤	٣٠٧
كرنب	٩٢,١٥	-٠,٩	٤,٠٢	١,٨٥	٣٠٨
كرفس	٩٤,٦٤	-٠,٥	٤,٠٧	١,٧٤	٣١٦
كوسة	٩٤,٢٠	-٠,٥	٤,٠٧	١,٧٤	٣١٥
لفت	٩١,٨٧	-١,١	٤,٠٠	١,٨٨	٣٠٧
لوبيا، حبوب	٩٠,٢٧	-٠,٧	٣,٩٩	١,٨٥	٣٠٢

جدول ٥,٣ بعض الخواص الحرارية للفاكهة (بتصرف من ASHRAE 2006).

البند	نسبة	درجة	الحرارة	الحرارة	الحرارة
	محتوى	حرارة	النوعية فوق	النوعية تحت	الكامنة للتجميد
	الرطوبة	بداية	درجة التجمد	درجة التجمد	
		التجمد	كيلوجول/	كيلوجول/	كيلوجول/
	%	°م	كجم °م	كجم °م	كجم
أناناس	٨٦,٥٠	١,٠-	٣,٨٥	١,٩١	٢٨٩
برتقال	٨٢,٣٠	٠,٨-	٣,٨١	١,٩٦	٢٧٥
برقوق	٨٥,٢٠	٠,٨-	٣,٨٣	١,٩٠	٢٨٥
بطيخ	٩١,٥١	٠,٤-	٣,٩٧	١,٧٤	٣٠٦
بلح	٢٢,٥٠	١٥,٧-	٢,٣١	٢,٣٠	٧٥
تفاح	٨٣,٩٣	١,١-	٣,٨١	١,٩٨	٢٨٠
توت	٨٥,٦٤	٠,٨-	٣,٩١	١,٩٤	٢٨٦
تين	٧٩,١١	٢,٤-	٣,٧٠	٢,٢٥	٢٦٤
جريب	٩٠,٨٩	١,١-	٣,٩٦	١,٨٩	٣٠٤
فروت					
خوخ	٨٧,٦٦	٠,٩-	٣,٩١	١,٩٠	٢٩٣
زبيب	١٥,٤٢		٢,٠٧	٢,٠٤	٥٢
زيتون	٧٩,٩٩	١,٤-	٣,٧٦	٢,٠٧	٢٦٧
شمام	٨٩,٧٨	١,٢-	٣,٩٣	١,٩١	٣٠٠
فراولة	٩١,٥٧	٠,٨-	٤,٠٠	١,٨٤	٣٠٦
كرز	٨٦,١٣	١,٧-	٣,٨٥	٢,٠٥	٢٨٨
كمثرى	٨٣,٨١	١,٦-	٣,٨٠	٢,٠٦	٢٨٠
ليمون	٨٧,٤٠	١,٤-	٣,٩٤	٢,٠٢	٢٩٢
مانجو	٨١,٧١	٠,٩-	٣,٧٤	١,٩٥	٢٧٣
مشمش	٨٦,٣٥	١,١-	٣,٨٧	١,٩٥	٢٨٨
موز	٧٤,٢٦	٠,٨-	٣,٥٦	٢,٠٣	٢٤٨

جدول ٥,٤ بعض الخواص الحرارية للأسماك واللحوم والطيور ومنتجاتها (يتصرف من (ASHRAE 2006).

البند	نسبة محتوى الرطوبة	درجة حرارة بداية التجمد	الحرارة النوعية فوق درجة التجمد	الحرارة النوعية تحت درجة التجمد	الحرارة الكامنة للتجميد
	%	°م	كيلوجول/كجم °م	كيلوجول/كجم °م	كيلو جول/كجم
بط	٤٨,٥٠		٣,٠٦	٢,٤٥	١٦٢
بيض، بياض	٨٧,٨١	-٠,٦	٣,٩١	١,٨١	٢٩٣
بيض، صفار	٤٨,٨١	-٠,٦	٣,٠٥	٢,٢٥	١٦٣
بيض، كامل	٧٥,٣٣	-٠,٦	٣,٦٣	١,٩٥	٢٥٢
دجاج	٦٥,٩٩	-٢,٨	٤,٣٤	٣,٣٢	٢٢٠
ديك رومي	٧٠,٤٠		٣,٣٥	٢,٢٨	٢٣٥
سمك القد	٨١,٢٢	-٢,٢	٣,٧٨	٢,١٤	٢٧١
سمك الحدق	٧٩,٩٢	-٢,٢	٣,٧٥	٢,١٤	٢٦٧
سمك الهلبوت	٧٧,٩٢	-٢,٢	٣,٧٤	٢,١٨	٢٦٠
سمك الرنجة	٥٩,٧٠	-٢,٢	٣,٢٦	٢,٢٧	١٩٩
سمك الفرخ	٧٨,٧٠	-٢,٢	٣,٧١	٢,١٥	٢٦٣
سمك السلمون	٧٦,٣٥	-٢,٢	٣,٦٨	٢,١٧	٢٥٥
سمك تونة	٦٨,٠٩	-٢,٢	٣,٤٣	٢,١٩	٢٢٧
سمك أبيض	٨٠,٢٧	-٢,٢	٣,٧٧	٢,١٥	٢٦٨
سرطان البحر	٧٦,٧٦	-٢,٢	٣,٦٤	٢,١٥	٢٥٦
سمك، محار	٨٥,١٦	-٢,٢	٣,٨٣	٢,١٢	٢٨٤
جمبري (روبيان)	٧٥,٨٦	-٢,٢	٣,٦٥	٢,١٦	٢٥٣
لحم بقرى سكلوب	٧٨,٥٧	-٢,٢	٣,٧١	٢,١٥	٢٦٢
لحم بقرى، قطع	٥٥,١٨	-	٣,١٩	٢,٣٣	١٨٤
لحم بقرى، كبدة	٦٨,٩٩	-١,٧	٣,٤٧	٢,١٦	٢٣٠
لحم بقرى ريش	٥٤,٥٤	-	٣,١٦	٢,٣٢	١٨٢
لحم بقرى، شرائح	٦٤,٧٥	-	٣,٣٩	٢,١٨	٢١٦
لحم عجل	٧٥,٩١		٣,٦٥	٢,٠٩	٢٥٤
لحم غنم، قطع	٧٣,٤٢	-١,٩	٣,٦٠	٢,١٤	٢٤٥

جدول ٥,٥ بعض الخواص الحرارية للألبان ومنتجاتها، والمكسرات (بتصرف من ASHRAE 2006).

البند	نسبة محتوى الرطوبة	درجة حرارة بداية التجمد	الحرارة النوعية فوق درجة التجمد	الحرارة النوعية تحت درجة التجمد	الحرارة الكامنة للتجمد
	%	°م	كجم °م / كيلوجول	كجم °م / كيلوجول	كجم / كيلوجول
أيس كريم، شوكولاتة	٥٥,٧٠	-٥,٦	٣,١١	٢,٧٥	١٨٦
أيس كريم، فانيليا	٦١,٠٠	-٥,٦	٣,٢٢	٢,٧٤	٢٠٤
أيس كريم، فراولة	٦٠,٠٠	-٥,٦	٣,١٩	٢,٧٤	٢٠٠
جبن، جودة	٤١,٤٦	-	٢,٨٧	٢,٧٧	١٣٨
جبن روكفورت	٣٩,٣٨	-١٦,٣	٢,٨٠	٣,٣٦	١٣٢
جبن سويسرى	٣٧,٢١	-١٠,٠	٢,٧٨	٢,٨٨	١٢٤
جبن شيدر	٣٦,٧٥	-١٢,٩	٢,٧٧	٣,٠٧	١٢٣
جبن مطبوخ	٣٩,١٦	-٦,٩	٢,٨٠	٢,٧٥	١٣١
جبن، مونزريلا	٥٤,١٤	-	٣,١٥	٢,٤٦	١٨١
زيد	١٧,٩٤	-	٢,٤٠	٢,٦٥	٦٠
قشدة، منزوعة الدسم	٨٠,٥٧	-	٣,٧٣	٢,١٦	٢٦٩
قشدة، كاملة الدسم	٥٧,٧١	-	٣,٢٥	٢,٣٢	١٩٣
لبن مبخر	٧٤,٠٤	-١,٤	٣,٥٦	٢,٠٨	٢٤٧
لبن كامل الدسم	٨٧,٦٩	-٠,٦	٣,٨٦	١,٨١	٢٩٣
لبن مجفف	٣,١٦	-	١,٨٠	-	١١
لبن مجفف ومحلى	٣,١٩	-	١,٦٩	-	١١
لبن مكثف	٢٧,١٦	-١٥,٠	٢,٣٥	-	٩١
لبن منزوع الدسم	٩٠,٨٠	-	٣,٩٥	١,٧٨	٣٠٣
مكسرات، جوز	٣,٦٥	-	٢,٠٩	-	١٢
مكسرات، فول	٦,٥	-	٢,٢٣	-	٢٢
سودانى					
مكسرات، لوز	٤,٤٢	-	٢,٢٠	-	١٥

جنول ٥,٦ بعض الخواص الحرارية للعصائر والمشروبات (بتصرف من ASHRAE 2006).

البند	نسبة	درجة	الحرارة	الحرارة	الحرارة
	محتوى	حرارة	النوعية فوق	النوعية	الكامنة
	الرطوبة	بدائية	درجة	تحت درجة	للتجميد
	%	م°	كيلوجول/	كيلوجول/	كيلو جول/
			كجم م°	كجم م°	كجم
عصير أناناس	٨٥,٥٣	-	٣,٨١	١,٨١	٢٨٦
غير محلى					
عصير برتقال	٨٩,٠١	-٠,٤	٣,٩٠	١,٧٦	٢٩٧
عصير برقوق	٨١,٢٤	-	٣,٧١	١,٨٧	٢٧١
عصير تفاح خالى	٨٧,٩٣	-	٣,٨٧	١,٧٨	٢٩٤
من السكر					
عصير توت	٨٥,٦٠	-	٣,٨١	١,٨٠	٢٨٦
وعنب					
عصير جريب	٨٧,٣٨	-	٣,٨٥	١,٧٨	٢٩٢
فروت محلى					
عصير جريب	٨٤,١٢	-	٣,٧٧	١,٨٢	٢٨١
فروت غير محلى					
عصير طماطم	٩٣,٩٠	-	٤,٠٣	١,٧١	٣١٤
عصير ليمون	٩٢,٤٦	-	٣,٩٩	١,٧٣	٣٠٩
عصير ليمون غير	٩٢,٥٢	-	٣,٩٩	١,٧٣	٣٠٩
محلى					
مياه غازية	٩٩,٩٠	-	٤,١٧	١,٦٣	٣٣٤
حليب بالشوكولاتة	٨٣,٥٨	-	٣,٧٨	١,٨٣	٢٧٩

مثال ٥,٢

أوجد الحرارة النوعية للجمبري عند درجة حرارة ٥°م وعند درجة حرارة قدرها - ٢٠°م. أيضا أوجد الحرارة الكامنة للتجمد.

الحل

من جدول ٥,٤ نجد أن محتوى الماء بالجمبري هو ٧٥,٨٦٪ وأن درجة حرارة بداية التجمد هي - ٢,٢°م. من الجدول أيضا نجد أن الحرارة النوعية عند درجة حرارة فوق التجمد هي ٣,٦٥ كيلو جول / كجم.°م، وتحت درجة التجمد هي ٢,١٦ كيلو جول / كجم.°م، وأن الحرارة الكامنة للتجمد هي ٢٥٣ كيلو جول / كجم.°م. باستخدام معادلات زيبيل [Siebel 1892] يمكن حساب الحرارة النوعية فوق درجة التجمد كما يلي:

$$C_p = 0.033355 \times 75.86 + 0.84 = 3.37 \text{ kJ / kg } ^\circ\text{C}$$

وتحت درجة التجمد كما يلي:

$$C_p = 0.0126 \times 75.86 + 0.84 = 1.796 \text{ kJ / kg } ^\circ\text{C}$$

بالمقارنة مع القيم التي حصلنا عليها من الجدول، نجد أن هناك اختلاف بسيط في قيمة الحرارة النوعية وهو اختلاف يمكن تجاوزه في الحسابات الهندسية.

٥,٧ الشروط المثلى لتخزين المواد الغذائية

تبين جداول ٥,٢ إلى ٥,٦ درجة الحرارة والرطوبة النسبية الموصى بها لتخزين بعض أنواع الفاكهة والخضراوات الطازجة واللحوم والأسماك والألبان

ومنتجاتها الألبان ومنتجات الدواجن والمشروبات والعصائر، وذلك طبقا لجمعية ASHRAE (ASHRAE 1994).

تحدد درجة حرارة التخزين للفواكه والخضراوات الطازجة بحيث تعمل على:

(أ) خفض معدل فساد الفواكه والخضراوات إلى أقل معدل ممكن لها.

(ب) حماية الفواكه والخضراوات من التجمد مما يفسد شكلها.

(ج) حماية الفواكه والخضراوات من إصابة الصقيع التي قد تعيب بعض أنواعها.

ولتوضيح هذا الأمر، دعنا ندرس معدل فساد إحدى الفواكه كما هو موضح بجدول ٥,٧. فكما هو ملاحظ من الجدول يقل معدل فساد الفاكهة بخفض درجة الحرارة. ولكن بالوصول إلى درجة حرارة - ١°م نجد أن هذه الدرجة تسبب تجمد الفاكهة مما يفسد شكلها. عندئذ قد يفضل تخزين هذه الفاكهة عند درجة حرارة قدرها ١°م بدلا من - ١°م. ومن المعروف أن درجات الحرارة المنخفضة التي فوق درجة حرارة التجمد تسبب ما يعرف بإصابة الصقيع لبعض أنواع الفاكهة والخضراوات. ويعتبر الموز خير مثال على ذلك. في مثل هذه الحالات تُرفع درجات حرارة التخزين إلى أقل درجة حرارة لا تسبب إصابة الصقيع للفاكهة أو الخضار المخزون.

وتحدد الرطوبة النسبية لتخزين الفواكه والخضراوات الطازجة، بحيث لا تساعد على انكماش وتشقق السطح الخارجي لها نتيجة فقد جزء من مائها إلى الهواء مما يعطيها شكلا غير مقبولا. وتجدر الإشارة هنا إلى أن فقد من ٣ إلى

٦٪ من محتوى الماء لأي فاكهة أو خضار يسبب شكلا غير مقبولا لها بالإضافة إلى خسارة لا يستهان بها من قيمة البيع لهذه الفواكه والخضراوات.

جدول ٥،٧ العلاقة التقريبية بين معدل فساد الأغذية الطازجة مع درجة الحرارة لإحدى أنواع الفاكهة.

درجة الحرارة، °م	معدل الفساد
٢٠	٨ إلى ١٠
١٠	٤ إلى ٥
٥	٣
٣	٢
صفر	١,٢٥
-١	١

وللمحافظة على المواد الغذائية بحالة جيدة ينصح عامة بالآتي:

- (أ) المحافظة على درجة الحرارة في جميع الأماكن داخل غرفة التخزين بفرق لا يزيد من ٠,٥ إلى ١°م عن درجة الحرارة الموصى بها للتخزين.
- (ب) المحافظة على الرطوبة النسبية بفرق لا يزيد عن ٣ إلى ٥٪ عن قيمة الرطوبة النسبية الموصى بها للتخزين.
- (ج) العمل على توزيع الهواء دخل غرفة التخزين لتحقيق الشرطين (أ) و(ب) عالية.

د) التنظيف الدوري لغرفة التخزين للتخلص من العفن والفطريات التي قد تنمو على أسطح وجدار غرف التبريد بعد مدة طويلة والعمل المستمر على تعقيم هواء هذه الغرف.

هـ) نقل المنتجات الغذائية من غرف التخزين بأسرع ما يمكن إلى منافذ البيع وذلك للحد من تكثيف بخار الماء الذي قد ينتج على سطح المنتجات الغذائية أثناء عملية نقلها. ويعمل هذا التكثيف على زيادة معدل فساد هذه الأغذية.

الرموز ومعانيها للفصل الخامس

a نسبة محتوى الماء في المادة [%]

a_w نشاط الماء

p_s ضغط التشبع [ياسكال]

$\dot{Q}$ معدل انتقال الحرارة [وات]

الحروف الإغريقية

Δp الفرق في الضغط

φ الرطوبة النسبية

الفصل السادس

الاعتبارات الهندسية لبناء وتشغيل مخازن التبريد

٦,١ تقديم

هناك نوعان من مخازن التبريد: مخازن التبريد للإنتاج ومخازن التبريد للتوزيع. تعرف مخازن التبريد للإنتاج بأنها مخازن التبريد التي تبنى بجوار أو داخل أحد مراكز الإنتاج بغرض تخزين منتجات هذه المراكز. وتعرف مخازن التبريد للتوزيع بأنها مخازن التبريد التي تستخدم لتخزين البضائع المختلفة لحين توزيعها فيما بعد. وتنقسم مخازن التبريد أيضا تبعا لدرجات حرارة التخزين بها إلى مخازن تبريد تعمل عند درجات حرارة فوق درجة التجمد وأخرى تحت درجة التجمد، وقد يحوي مخزن التبريد العديد من غرف التبريد يعمل بعضها فوق درجة حرارة التجمد، بينما يعمل البعض الآخر تحت درجة حرارة التجمد.

تبنى مخازن التبريد عادة في مواقع يسهل الوصول إليها بوسائل نقل البضائع المختلفة. أيضا، يجب أن يكون إمداد الموقع بالماء والكهرباء والصرف متاحا وأن تكون تكلفة الأرض منخفضة نسبيا بحيث لا تمثل عائقا اقتصاديا لبناء مخزن التبريد. ويفضل في معظم الأحوال أن يكون مخزن التبريد في طرف المدينة بعيدا عن الأماكن المزدحمة، أو خارج المدن بالقرب من أماكن إنتاج البضائع والمنتجات التي تحتاج إلى تخزين بمخازن التبريد.

يتطلب بناء مخازن التبريد مواصفات خاصة تختلف عن المواصفات اللازمة لبناء المنشآت الأخرى. وفي الفصل الحالي نقدم عرضا لهذه المواصفات، دون التعرض للتفاصيل الإنشائية ولكن فقط عرض لأهم

المواصفات الهندسية الواجب أخذها في الاعتبار عند بناء وتشغيل مخازن التبريد.

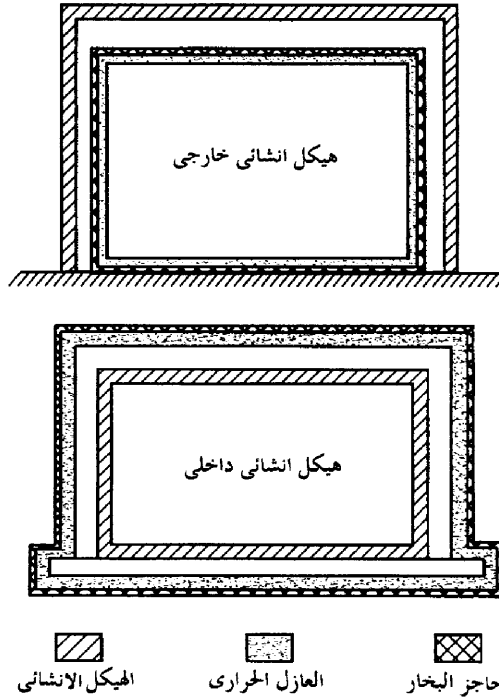
٦,٢ طرق البناء

تبنى مخازن التبريد في معظم الأحيان من دور واحد، ويستخدم عادة عند بناء هذه المخازن هيكل معدني أو هيكل خرساني، وإن كان الهيكل المعدني هو الأكثر شيوعاً عند بناء مخازن التبريد. ويتيح استخدام الهيكل الخرساني تشيد المخزن لأطوال تصل إلى ٦٠ مترًا دون الحاجة إلى وضع أي أعمدة داخلية. أيضاً، تستخدم الخرسانة المسلحة لبناء مخازن التبريد.

ويختلف بناء مخازن التبريد عن المباني الأخرى في نقطتين أساسيتين، هما: العزل الحراري وحاجز بخار الماء. فنظراً لعمل مخازن التبريد عند درجات حرارة أقل كثيراً من درجة حرارة الجو الخارجي، وقد تصل درجة حرارة التخزين إلى درجات حرارة أقل كثيراً من درجة حرارة الصفر، لذا لزم عزل هذه المخازن حرارياً لتوفير الطاقة اللازمة للتبريد. أيضاً، يلزم وضع حاجز لمنع تسرب بخار الماء من الهواء الخارجي إلى داخل مخزن التبريد، حيث يتكثف هذا البخار مكوناً صقيعاً داخل المخزن، مما يعوق أداء معدات التبريد ويقلل من كفاءة عملها.

يوضع العازل الحراري وحاجز البخار في مخازن التبريد بوحدة من طريقتين أساسيتين. في الطريقة الأولى يوضع العازل الحراري وحاجز البخار داخل الهيكل الإنشائي لمخزن التبريد، وفي الطريقة الثانية يوضع العازل الحراري وحاجز البخار خارج الهيكل الإنشائي (انظر شكل ٦,١). وتهدف كلتا الطريقتين إلى وجود غلاف كامل من حاجز البخار حول مخزن التبريد. ولا

يجب بأي حال من الأحوال اختراق هذا الغلاف بأي من مثبتات أو مكونات الإنشاء.



شكل ٦،١ طرق تركيب العازل الحراري وحاجز البخار لمخازن التبريد.

وتعرف الطريقة الأولى بطريقة الهيكل الإنشائي الخارجي، بينما تعرف الطريقة الثانية بطريقة الهيكل الإنشائي الداخلي. ويلاحظ أنه إذا ضم مخزن التبريد عدة غرف تبريد تعمل عند درجات حرارة مختلفة، فإنه يمكن في الطريقة الأولى (الهيكل الإنشائي الخارجي) تركيب العازل الحراري وحاجز البخار لكل غرفة بمفردها، أو لكل مجموعة غرف متساوية في درجات الحرارة. وتختلف هاتين الطريقتين بالطبع في المميزات والعيوب. فمن مميزات وضع العازل الحراري وحاجز البخار داخل الهيكل الإنشائي الآتي: سهولة نقل

ورص البضائع نظرًا لعدم وجود أي جزء من الهيكل الإنشائي داخل غرفة التبريد، وعدم تأثر العازل الحراري وحاجز البخار بالعوامل الخارجية للجو، مثل: أشعة الشمس، والرياح، والأمطار، والرطوبة، وغيرها، وتبريد الحمل الداخلي لغرفة التبريد فقط دون الحاجة لتبريد الهيكل الإنشائي أيضًا، واستخدام مساحة سطحية من العازل الحراري وحاجز البخار أقل من المساحة المستخدمة في الطريقة الثانية، وحماية حاجز البخار من الاختراق، وسهولة تثبيت الهيكل الإنشائي مع الأساس. أما أهم العيوب الخاصة باستخدام الهيكل الإنشائي الخارجي فهي تعرض الهيكل الإنشائي الخارجي لعوامل الجو الخارجية، مما يتطلب صيانة دائمة له، وتعرض الهيكل الإنشائي إلى التمدد أو الانكماش إذا كانت درجة الحرارة الخارجية تتغير بشكل محسوس، مما قد يؤدي إلى كسر الغلاف الخارجي لحاجز البخار والعازل الحراري ما لم يؤخذ هذا في الاعتبار أثناء التركيب، وصعوبة تركيب معدات التبريد مثل المبخر وأنابيب المبرد ونظام توزيع الهواء داخل غرفة التبريد [المعهد الدولي للتبريد، 1993 IIR].

أيضًا هناك عدة مميزات عند استخدام هيكل إنشائي داخلي وتركيب عازل حراري وحاجز بخار خارجيين. وتتلخص هذه المميزات في الآتي: وجود الهيكل الإنشائي داخل غرفة التبريد، مما يعني ثبات درجة حرارته مع تغير درجة حرارة الجو الخارجي، وبالتالي عدم التعرض للتمدد والانكماش، وحماية الهيكل الإنشائي من التأثير بالعوامل الخارجية للجو، وبالتالي خفض تكلفة صيانته، وسهولة تركيب المبخر وأنابيب المبرد ونظم توزيع الهواء داخل غرف التبريد، وسهولة تركيب أرفف ثابتة أو متحركة داخل غرف التبريد دون الخوف من كسر العازل الحراري وحاجز البخار. أما أهم عيوب طريقة الهيكل الإنشائي الداخلي فتتلخص في الآتي: استخدام مساحة سطحية أكبر من العازل الحراري وحاجز بخار الماء مقارنة بالطريقة الأولى، وكبر الحجم المطلوب تبريده حيث

يضاف حجم الهيكل الإنشائي إلى حجم غرفة التبريد، وتعرض العازل الحراري وحاجز البخار للعوامل الجوية الخارجية مع زيادة احتمال اختراق الغلاف الخارجي لحاجز البخار، وصعوبة تركيب أي معدات أو مكونات إضافية من الخارج [IIR 1993].

٦,٣ مواصفات البناء

تعتمد مواصفات الحوائط الخارجية لمخازن التبريد على نوع الهيكل الإنشائي المستخدم للبناء أي إن كان هيكلًا معدنيًا أم خرسانيًا، وكذلك على طريقة العزل الحراري المستخدم. ومن أهم المواد المستخدمة في الحوائط الخارجية ألواح الألمنيوم المموجة، وكذلك ألواح الصلب المطلية بالبلاستيك، وألواح الاسبستوس، والحوائط الخرسانية، والحوائط المبنية من الطوب وغيرها.

تُكسى أسطح الحوائط بالبلاستيك المقوي أو بالمعدن. ويجب أيضًا تركيب واقيات (سدابة) صدمات أسفل هذه الأسطح لحمايتها من التعرض لأي صدمات من معدات نقل البضائع. وتصنع هذه الواقيات من الخشب أو المعدن وتوضع فوق الأرضية مباشرة.

تصنع الطبقة العليا للأرضية من بلاطة من الأسمنت المسلح بسمك يتراوح بين ١٠ إلى ١٥ سم تبعًا للأحمال المتوقعة على سطح الأرضية. ويفضل في الحالات التي قد تتعرض فيها الأرضية لتآكل شديد نتيجة حركة الأوناش عليها أن توضع طبقة من مادة مقاومة للتآكل على سطح بلاطة الأرضية لحمايتها من التآكل.

يجب عند صب بلاطة الأرضية فوق العازل الحراري للأرضية، تغطية العازل الحراري جيدًا بالبلاستيك أو بشرائح البيوتين وضمان عدم إمكانية

تسرب الماء الموجود بالخرسانة المسلحة عند صبها إلى العازل الحراري والأرضية. كما يجب ضمان أن يكون السطح العلوي لبلاطة الأرضية أفقيًا تمامًا وأن يكون بالخشونة الكافية لمنع الانزلاق.

وقد يفضل في كثير من الأحيان عند استخدام بالات لتخزين البضائع مع عدم استخدام أرفف، وأن تخطط الأرضية بلون واضح (مثل اللون الأصفر عادة) لتوضيح أماكن وضع البالات وممران سير الأوناش داخل مخزن التبريد. ويجب أن يكون الطلاء المستخدم لوضع هذه العلامات من النوع الذي يصعب تآكله وإزالته من الأرضية.

وفي بعض مخازن التبريد، تستخدم بلاطات من الأسمنت المسلح سابقة التجهيز لهذا الغرض. عندئذ توضع فرشاة من الرمل بسمك حوالي ٢ سم فوق العازل الحراري وتوضع هذه البلاطات فوقها مباشرة. ومن الضروري تجنب استخدام أي بلاعات صرف في أرضيات مخازن التبريد خاصة في غرف التخزين التي تعمل عند درجات حرارة تحت الصفر المئوي. أما إذا كان من الضروري تركيب مثل هذه البلاعات في غرف التخزين التي تعمل عند درجات حرارة أعلى من الصفر المئوي، فيلزم أخذ الحيطة من عدم اختراق البالوعة أو المواسير المتصلة بها لحاجز البخار، كما يجب التأكد من وضع مانع تسرب الماء بدقة حول البالوعة لضمان عدم تسرب الماء إلى العازل الحراري.

تستخدم مخازن التبريد عدة أنواع من الأبواب أهمها: الأبواب الدوارة (أي التي تدور حول محور)، والأبواب المنزلقة أفقيًا، والأبواب المنزلقة رأسيًا. وفي جميع هذه الأنواع يلزم عزل الأبواب حراريًا للحد من الحرارة المنقولة خلالها إلى داخل مخازن التبريد. وتستخدم الأبواب المنزلقة أفقيًا بكثرة في غرف التبريد، بينما تستخدم الأبواب المنزلقة رأسيًا كأبواب اتصال مع عربات نقل

البضائع. وتعمل الأبواب المنزلقة أفقيًا أو رأسيًا يدويًا أو ميكانيكيًا باستخدام قدرة كهربائية. وفي حالة استخدام القدرة الكهربائية لتشغيل أبواب مخازن التبريد، تستخدم مفاتيح كهربائية لفتح أو إغلاق هذه الأبواب، أو تفتح هذه الأبواب وتغلق أوتوماتيكيًا باستخدام حواس خاصة لذلك. ويفضل استخدام الطريقة الأوتوماتية لفتح الأبواب وإغلاقها عند استخدام الأوناش والسيور المتحركة لنقل البضائع من وإلى مخازن التبريد.

ويفضل دائمًا كسوة الأبواب بالبلاستيك أو رقائق المعدن لحمايتها، وقد تكون هذه الكسوة لمسطح الباب بالكامل أو للجزء السفلي منه. وتستخدم أيضًا في بعض الأحيان الستائر الهوائية وشرائح البلاستيك مع الأبواب للتقليل من حمل التبريد الناتج عن الهواء المتسرب إلى غرف التبريد أثناء فتح الأبواب. ويفضل في الكثير من الأحيان وجود حيز مبرد يفصل بين غرفة التبريد والجو الخارجي، مما يكون له أكبر الأثر في خفض حمل التبريد للهواء المتسرب إلى داخل غرفة التبريد.

وتواجه أبواب غرف التبريد التي تعمل عند درجات حرارة تحت الصفر المئوي مشاكل تشغيل وصيانة تنتج عن تكون ثلج على الأجزاء المتحركة لهذه الأبواب وعلى إطار الباب. ويتكون هذا الثلج نتيجة تكثف بخار الماء الموجود بالهواء خارج غرفة التبريد. وللتغلب على هذه المشكلة يجب أن تمتد هذه الأبواب بمصدر حراري يمنع تكون الثلج عليها، ويكون التسخين كهربائيًا عادة. وفي حالة تشغيل الأبواب بقدرة كهربائية لفتحها وإغلاقها يجب أيضًا تسخين المفاتيح الكهربائية وصناديق الكهرباء الخاصة بتشغيل الباب لمنع تكون الثلج عليها مما قد يعوق عمل هذه الأبواب.

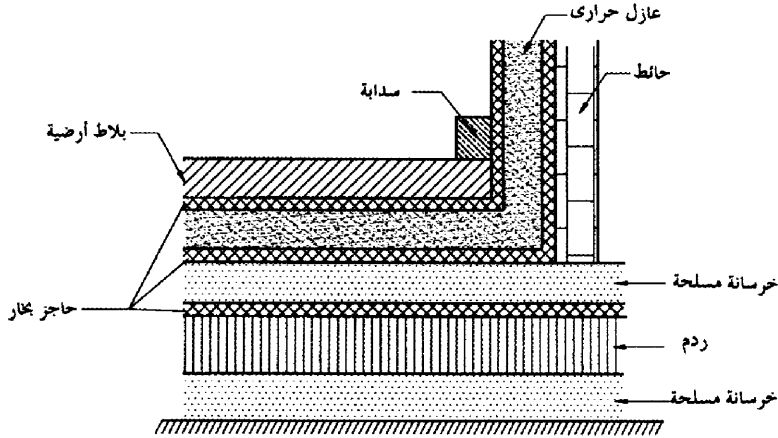
٦,٤ الأساس والأرضية

يصمم أساس مخازن التبريد لتحمل الأحمال الثابتة الناتجة عن الهيكل الإنشائي للمخزن بالإضافة إلى وزن البضائع المتوقع تخزينها، وأيضًا لتحمل الحمل المتحرك الناتج عن حركة أوناث نقل البضائع. ويؤخذ الحمل الثابت عادة فيما يتراوح بين ٥,٠٠٠ إلى ٨,٠٠٠ كجم/م^٢ من أرضية مخزن التبريد، بينما يقدر الحمل المتحرك بحوالي ٣,٠٠٠ كجم لكل ونش أو ما يقدر بحوالي ١,٠٠٠ كجم لكل عجلة من عجلات الونش. وتعمل بلاطة أرضية مخزن التبريد على توزيع الحمل المتحرك بالتساوي على الأساس.

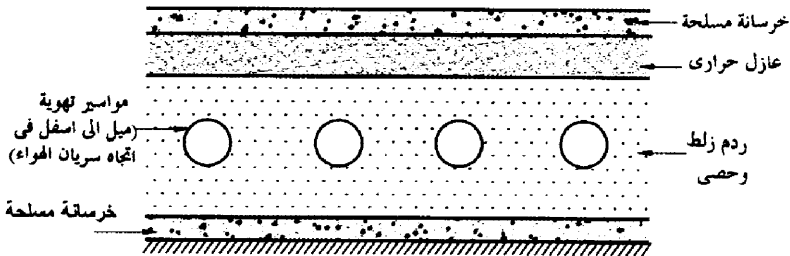
ويبين شكل ٦,٢ مكونات أرضية احد مخازن التبريد مع توضيح لتركيبة العازل الحراري وحاجز البخار عند استخدام هيكل خارجي. لاحظ استخدام ثلاث طبقات من حاجز البخار لضمان منع تسرب بخار الماء إلى داخل مخزن التبريد.

ينتج عن تبريد مخزن التبريد، تبريد الأرض أسفل المخزن. فإذا كان المخزن يعمل عند درجات حرارة تحت الصفر المئوي، فإن ذلك يؤدي إلى انخفاض درجة الحرارة في بعض الأماكن بالتربة أسفل مخزن التبريد إلى ما دون الصفر المئوي أيضًا. وينتج عن ذلك تجمد المياه الموجودة بالتربة، وبالتالي تمدها، مما يسبب تصدع أساس وأرضية مخزن التبريد. وللتغلب على هذه المشكلة ينصح بتسخين التربة أسفل مخزن التبريد. ويتم ذلك بعدة طرق. مثلاً، تصمم بعض مخازن التبريد بحيث تحمل أرضيتها فوق سطح الأرض على أعمدة، مع ترك سماح بين أرضية مخزن التبريد والأرض، مما يعمل على سريان الهواء الجوي أسفل مخزن التبريد. أيضًا، تعمل بعض التصميمات على وضع مواسير بردم من الحصى والزلط للسماح بمرور الهواء خلال الردم

(انظر شكل ٦,٣). ويراعى عند تركيب هذه المواسير أن تكون مائلة إلى أسفل في اتجاه سريان هواء التهوية، نظرًا لأن تبريد الهواء أثناء مروره أسفل مخزن التبريد يعمل على زيادة كثافته، وبالتالي هبوطه إلى أسفل.



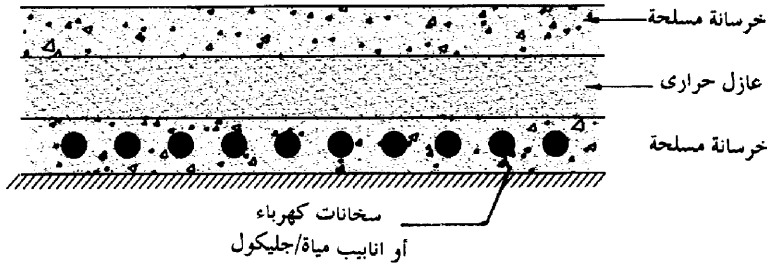
شكل ٦,٢ تركيب العازل وحاجز البخار (هيكل خارجي) لمخزن تبريد.



شكل ٦,٣ تركيب مواسير تهوية بأرضية مخزن التبريد للحماية من التصدع.

كما تتبع بعض التصميمات الأخرى تسخين التربة أسفل مخزن التبريد، ويتم ذلك إما بسخانات كهربائية مدفونة في طبقة الخرسانة المسلحة أسفل مخزن

التبريد، أو مواسير تحمل مياه ساخنة أو جليكول ساخن (انظر شكل ٦,٤). ويتم التحكم في هذه السخانات بثرموستاتات تعمل على ضمان أن تبقى درجة حرارة التربة أسفل مخزن التبريد أعلى من درجة حرارة التجمد بحوالي ٥ °م. وتوفيراً لطاقة التسخين يستفاد من الحرارة المطرودة من المكثف بنظام التبريد لتسخين المياه أو الجليكول لتسخين الأرض أسفل مخزن التبريد. وتستخدم في العادة مواسير بلاستيك بى.في.سي (PVC) لحمل الماء الساخن أو الجليكول الساخن. وتؤخذ أقطار هذه المواسير حوالي 3/4 بوصة وتوضع على مسافات حوالي ٦٠ سم من بعضها البعض [Koelet, 1992].



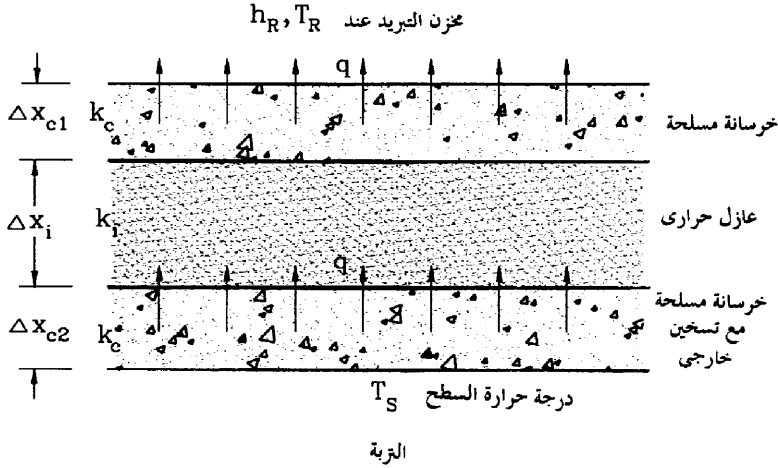
شكل ٦,٤ تسخين الأرضية لحمايتها من التصدع.

وللتعرف على معدل التسخين q اللازم لكل وحدة مساحات من الأرضية لحماية الأرضية من التصدع، يلزم أن ندرس أرضية مخزن التبريد المبينة بشكل ٦,٥. يعمل مخزن التبريد عند درجة حرارة قدرها T_R وهي أقل من الصفر المئوي، والمطلوب تسخين الطبقة السفلى عن الخرسانة المسلحة للمحافظة على درجة حرارة سطحها السفلي الملامس للتربة عند درجة الحرارة T_S . ويجب أن تكون هذه الدرجة أعلى من الصفر المئوي لمنع تجمد ماء التربة. تقدر الحرارة المنقولة إلى مخزن التبريد عندئذ كما يلي :

$$q=U(T_S-T_R) \quad (6.1)$$

حيث U هي المعامل الكلي لانتقال الحرارة بين السطح السفلي للخرسانة ومخزن التبريد. ويقدر هذا المعامل كما يلي

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{\Delta X_{c1}}{k_c} + \frac{\Delta X_i}{k_i} + \frac{\Delta X_{c2}}{k_c} \quad (6.2)$$



شكل ٦,٥ انتقال الحرارة إلى مخزن التبريد خلال الأرضية.

حيث k_c هي معامل التوصيل الحراري للأسمنت المسلح، و k_i هي معامل التوصيل الحراري للعازل الحراري و h هي معامل انتقال الحرارة بالحمل بين أرضية مخزن التبريد وهواء مخزن التبريد، و Δx_{c1} و Δx_{c2} و Δx_{c3} هي على التوالي سمك الطبقة العليا للخرسانة المسلحة، وسمك العازل الحراري، وسمك الطبقة السفلى للخرسانة المسلحة. ويقدر معامل انتقال الحرارة بالحمل من العلاقة المعملية الآتية:

$$h = 2.8 + 3V \quad (6.3)$$

حيث h بوحدات وات/م^٢، و V (م/ث) هي سرعة الهواء داخل مخزن التبريد. ونظراً لأنه يمكن عملياً إهمال المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة بالحمل

الحراري في الهواء، وبالتوصيل في الأسمنت المسلح، مقارنة بانتقال الحرارة بالتوصيل في العازل الحراري، عندئذ يمكن حساب U كما يلي:

$$U \cong k_i / \Delta X_i \quad (6.4)$$

ويبين المثال التالي كيفية الاستفادة من العلاقات السابقة لحساب معدل تسخين الأرضية لمنع تصدع التربة.

مثال ٦,١

يعمل مخزن تبريد عند -20°م . وتتكون أرضية المخزن من طبقتين من الأسمنت المسلح كل منهما بسمك 20سم ، بينهما عازل حراري بسمك 30سم .

- أ) احسب معدل التسخين اللازم لمنع تجمد التربة.
 ب) احسب معدل التسخين اللازم لمنع تجمد التربة إذا أصبح سمك العازل الحراري 60سم بدلا من 30سم .

افرض البيانات الهندسية الآتية:

- معامل التوصيل الحراري للخرسانة المسلحة $= 1,012$ وات/م. $^\circ\text{م}$
- معامل التوصيل الحراري للعازل الحراري $= 0,037$ وات/م. $^\circ\text{م}$

الحل

أ) بفرض سرعة هواء قدرها $2,5$ م/ث داخل مخزن التبريد، عندئذ يقدر معامل انتقال الحرارة h بين أرضية الغرفة والهواء كما يلي:

$$h = 2.8 + 3 \times 2.5 = 10.3 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$$

ويقدر المعامل الكلي لانتقال الحرارة كما يلي:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{10.3} + \frac{0.2}{1.512} + \frac{0.3}{0.037} + \frac{0.2}{0.512}$$

$$U = 0.118 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

وبفرض المحافظة على درجة حرارة السطح العلوي للتربة عند 5°C لمنع التجمد فإن:

$$q = 0.118[5 - (-20)] = 2.95 \text{ W/m}^2$$

وللأمان يؤخذ معدل تسخين قدره ٦ وات/م^٢.°م.

وباستخدام المعادلة التقريبية، يمكن تقدير قيمة U كما يلي:

$$U = k_i/\Delta X_i = 0.037/0.3 \\ = 0.123 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

أي بخطأ أقل من ٥٪ في قيمة U ، ويقل هذا الخطأ كلما زاد سمك العازل الحراري.

ب) بأخذ عازل حراري بسمك ٦٠ سم، عندئذ تقدر U كما يلي:

$$U = 0.037/0.6 = 0.0617 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

ويصبح معدل التسخين المطلوب كما يلي:

$$q = 0.0617(5 - (-20)) = 1.5 \text{ W/m}^2$$

وللأمان يؤخذ معدل التسخين حوالي ٣ وات/م^٢.°م.

٦,٥ تخطيط مخازن التبريد

يختلف المخطط العام لمخازن التبريد من مخزن إلى آخر، حيث يعتمد هذا المخطط على العديد من العوامل، منها على سبيل المثال لا الحصر: الشكل الهندسي للأرض التي سينشئ عليها المخزن ومساحتها، وموقع هذه الأرض بالنسبة للشوارع المحيطة بها، وحجم ونوع المواد المطلوب تخزينها، وفترة التخزين، وطبيعة وموقع أرصفة التحميل والتفريغ بالنسبة للمخزن... الخ. وبالطبع لا توجد طريقة معينة لوضع المخطط العام لمخازن التبريد، إلا أنه يمكن القول بأن هناك قواعد هندسية عامة يلزم أخذها في الاعتبار عند إعداد المخطط العام لمخازن التبريد. ويمكن تلخيص هذه القواعد في الآتي:

١. السماح بسهولة الحركة داخل مخزن التبريد. فمثلاً يجب أن يكون عرض الممرات مناسباً لحركة معدات نقل البضائع، وأن تكون أرصفة التحميل والتفريغ في أماكن لا تؤدي إلى إعاقة الحركة داخل مخزن التبريد.

٢. أن توزع غرف التبريد بالمخزن تبعاً لدرجات حرارة التخزين بهذه الغرف، مما يساعد على خفض الحمل الحراري بالمخزن ويسهل تصميم نظام التبريد. فمثلاً توضع غرف التبريد التي تعمل عند درجات حرارة أعلى من الصفر المئوي بالقرب من بعضها البعض، بينما توضع غرف التجميد، أي الغرف التي تعمل عند درجات حرارة تحت الصفر المئوي، بالقرب من بعضها البعض. ويساعد هذه على خفض الحمل الحراري الناتج عن التبادل الحراري بين الغرف من خلال الحوائط، وكذلك خفض الحمل الحراري الناتج عن تسرب الهواء من الممرات إلى داخل الغرف عند أبواب الغرف. وقد يفضل في بعض الأحيان أن تحاط غرف التبريد لدرجات الحرارة المنخفضة بغرف التبريد التي لها درجات حرارة أعلى نسبياً مما يساعد على خفض حمل التبريد لهذه الغرف.

٣. إذا كان مخزن التبريد يحوي بعض العمليات الصناعية التي تسبق التخزين، يجب أن توضع هذه العمليات في موقع مناسب بالنسبة لغرف التخزين، بحيث تسهل الحركة بين عمليات التصنيع والتجهيز والتخزين.

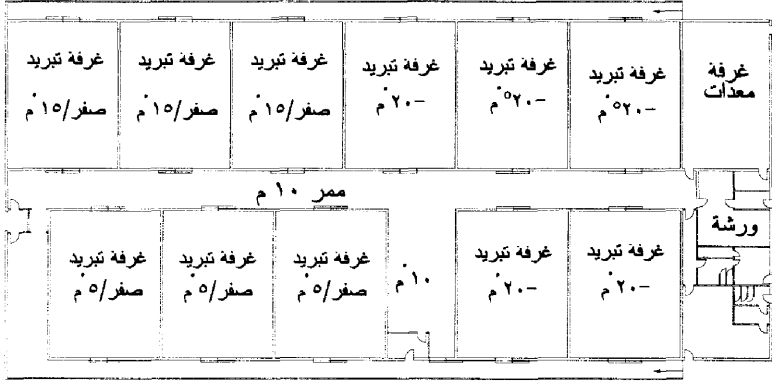
٤. أن تكون غرفة الآلات والورشة في موقع لا يعوق التحميل والتفريغ.

أن يكون عدد الغرف بمخزن التبريد أقل ما يمكن. فمثلاً تخزن جميع المواد التي تحتاج إلى حرارة تخزين متقاربة معاً إذا لم يصدر عن بعضها روائح مميزة قد تؤثر في المواد الأخرى المخزنة معها بنفس الغرفة.

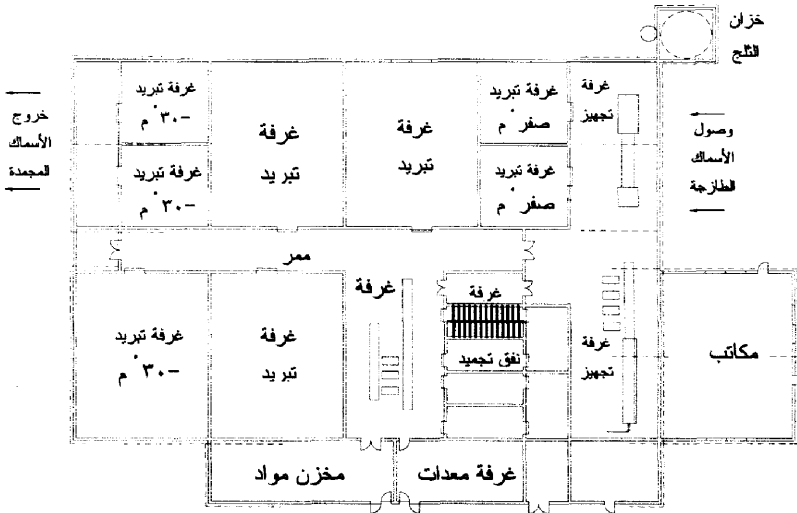
ويوضح الشكلان ٦,٦ و ٦,٧ مخططين لمخزني تبريد. ويبين شكل ٦,٦ مخطط مخزن عام. لاحظ المميزات العامة الآتية في المخطط:

- أ) وجود بابين لكل غرفة تبريد، باب على رصيف التحمل/ التفريغ وباب آخر على الممر الداخلي، مما يسهل عملية التفريغ والتحميل، ودون أن يؤثر العمل بأحد الغرف على تحميل/تفريغ غرفة أخرى.
- ب) وجود رصيف تحميل/تفريغ لكل غرفة بمفردها.
- ج) وجود جميع غرف التبريد التي تعمل عند درجة حرارة فوق الصفر المئوي في الجانب الأيسر من المبنى، بينما توجد غرف التبريد التي تعمل عند درجة حرارة -٢٠°م في الجانب الأيمن من المبنى، مما يساعد على خفض حمل التبريد بالغرف.
- د) وجود غرف الخدمات (غرفة المعدات، والورشة، ومكاتب إدارة) في طرف مخزن التبريد، مما يسهل الوصول إلى هذه الغرف من الخارج، ودون المرور داخل مخزن التبريد. لاحظ أيضاً وجود الورشة بجانب غرفة المعدات لسهولة صيانة المعدات.

(هـ) تماثل مساحات غرف التخزين، حيث إن المخزن يستخدم لتخزين منتجات متنوعة (مخزن عام) دون التخصص في أحد المنتجات دون الآخر.



شكل ٦,٦ مسقط أفقي لمخزن عام.



شكل ٦,٧ مخزن لحفظ الأسماك المجمدة ملحق به خطوط تجهيز وتغليف الأسماك مع خطوط إنتاج الثلج.

ويبين شكل ٦,٧ أحد مخازن التبريد الخاصة بتخزين الأسماك والملح بها خطوط تجهيز السمك وتعبئته قبل التخزين، وخطوط إنتاج الثلج. ونلاحظ بعد فحص المخطط المميزات التالية:

أ) وجود خطوط التجهيز والتعبئة في مواقع تسهل حركة المنتج في المراحل المختلفة للتجهيز والتعبئة ثم التخزين مباشرة، مع وجود مخزن التعبئة في الجانب الخلفي من مخزن التبريد ومتصل مباشرة بالمرحلة الأخيرة للتجهيز بعد أكمل عملية التجميد.

ب) وجود الإدارة في الجانب الأيمن من الخارج لسهولة التعامل مع المترددين على المخزن.

ج) دخول الأسماك الطازجة من الجانب الأيمن من المبنى وخروج الأسماك المجمدة المخزونة من الجانب الأيسر للمبنى، ويعني ذلك حركة المنتجات من اليمين إلى اليسار، مما يسهل الحركة داخل المخزن.

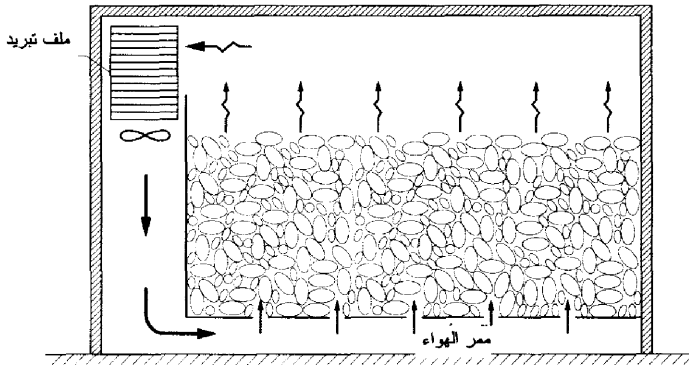
د) وجود غرف التبريد لحفظ الأسماك لحين تجهيزها في الطرف الأيمن من المبنى بجوار خطوط التجهيز.

من المثاليين السابقين يتضح جلياً أن المخطط العام لأي مخزن تبريد يختلف من مخزن إلى آخر. وأن إعداد هذا المخطط يعتمد على عدة عوامل كما قدمنا سابقاً.

٦,٦ طرق الرص ونقل البضائع داخل مخازن التبريد

هناك عدة طرق لرص البضائع داخل غرفة التبريد. أول هذه الطرق هو وضع المواد المخزنة في أكوام، كما هو الحال في تخزين البطاطس والبصل على سبيل المثال. ويتطلب هذا النوع من التخزين طريقة خاصة لتوزيع الهواء.

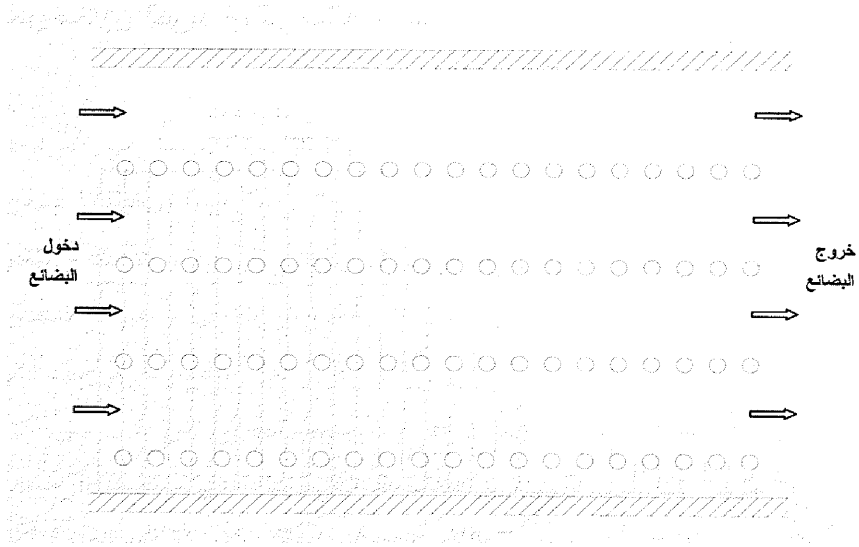
فيمرر الهواء من فتحات في أرضية غرفة التبريد متجهًا إلى أعلى مارًا بكومة المواد المخزنة، حيث يعود مرة أخرى إلى ملف التبريد (انظر شكل ٦,٨). ولا ينصح في هذه الحالة أن يزيد ارتفاع الكومة عن حوالي ٢ مترًا ويكون حجم التخزين حوالي ٦٠٠ كجم/م^٢. وتستخدم معدات خاصة وسيور نقل لوضع المواد المخزنة في غرف التبريد واسترجاعها مرة أخرى [Sabro1998]. وبالطبع ليست هذه هي الطريقة الوحيدة لتخزين البطاطس والبصل وإنما هناك طرق أخرى أيضًا.



شكل ٦,٨ توزيع الهواء في بطاطس مخزنة في أكوام.

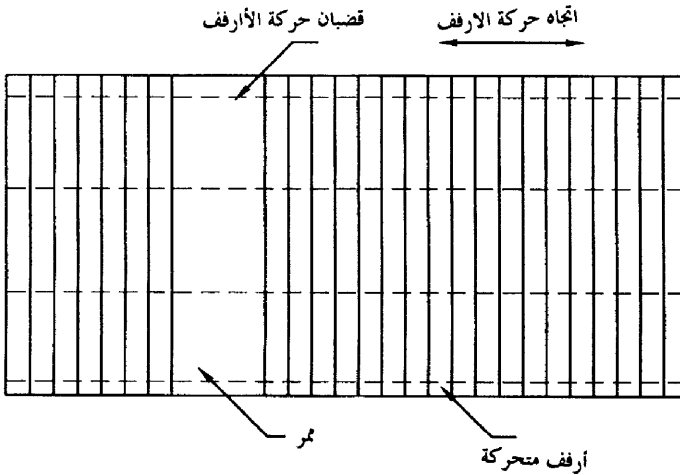
ثاني هذه الطرق هي وضع البضائع فوق بعضها البعض في رصات. وبالطبع هناك حد أقصى لعدد الوحدات التي يمكن وضعها رأسياً في كل رصة. ويعتمد هذا العدد على كيفية تعبئة المنتجات: أي إن كانت في أكياس أو صناديق خشب. أيضاً يمكن استخدام البالات (وهي فرش خشبية أو معدنية أو بلاستيك لتحميل البضائع) لرص البضائع، ثم توضع البالات فوق بعضها البعض. عندئذ يلزم استخدام ونش شوكة لحمل البالات أثناء التفريغ والتحميل، مقارنة بالحالة الأولى التي يكفي فيها بالتحميل والتفريغ يدوياً. ويؤخذ عادة المقاس القياسي لهذه البالات، وهو حوالي ١,٢م × ٠,٨٥م. ويتراوح عدد صفوف الرصات من ٣ إلى ٨ رصات عند كل جهة من جهات أي ممر داخل غرفة التبريد.

في الطريقة الثالثة، تستخدم أرفف لرص البضائع. ويوجد نوعان من الأرفف: النوع الثابت والنوع المتحرك. وتستخدم الأرفف الثابتة بكثرة في مخازن التبريد. ويصمم هذا النوع بنموذجين. في النموذج الأول، يسمح بحركة الأوناش في ممرات بين هذه الأرفف لتحميل أو تفريغ البضائع، لذلك يجب أن يكون عرض الممر كافياً لحركة الأوناش خلاله. في النموذج الثاني، لا يترك أي ممرات بين الأرفف، لذلك تحمل البضائع فوق الأرفف من جهة واحدة فقط وتفرغ البضائع من الجهة الأخرى للرف (انظر شكل ٦،٩). لذلك يلزم حينئذ رص البضائع في غرفة التبريد فيما يعرف بطريقة "ما يوضع أولاً يؤخذ أولاً" وذلك لضمان عدم ترك بعض البضائع لفترات طويلة داخل غرفة التبريد، مما قد يعرضها للتلف. ولسهولة تحميل البضائع وتفريغها من الأرفف الثابتة، تصمم هذه الأرفف من أسطوانات تتحرك لسهولة حركة البضائع فوق الأرفف من جهة إلى أخرى.

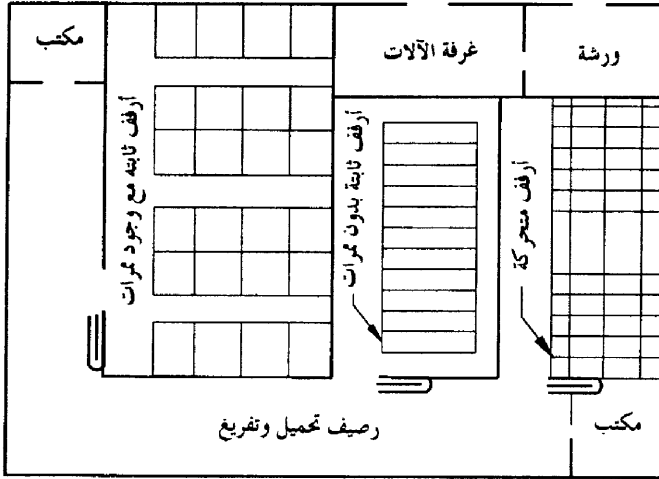


شكل ٦،٩ قطاع رأسي في أرفف ثابتة لرص البضائع مع توضيح لدخول وخروج البضائع من وإلى الأرفف.

تعرف الأرفف المتحركة بأنها مجموعة من الأرفف فوق حوامل، وتتحرك هذه الحوامل على قضبان مثبتة على الأرض، مما يسمح دائما بوجود ممر واحد فقط بين هذه الحوامل (انظر شكل ٦,١٠). وتمتاز الأرفف المتحرك بالاستفادة القصوى من حجم غرفة التبريد لتخزين البضائع. ويلزم عند استخدام هذا النوع من الأرفف وجود أجهزة التحكم الخاصة بالأمان التي تمنع تحرك هذه الأرفف إلا من طرف الممر للتأكد من عدم وجود أي أشخاص أو معدات داخل الممر. ويوضح شكل ٦,١١ استخدام الثلاثة أنواع السابقة من الأرفف في أحد مخازن التبريد. تتنقل البضائع داخل مخازن التبريد بوحدة أو أكثر من الطرق الآتية : يدوياً، أو استخدام أوناش شوكة، أو استخدام سيور نقل الحركة. ويعتمد استخدام أي من هذه الطرق الثلاثة على نوع وحجم ووزن البضائع المنقولة داخل مخازن التبريد، وكذلك على حجم مخزن التبريد نفسه. أيضاً تستخدم بعض مخازن التبريد أوناش معلقة بالسقف بكابينة متحركة.



شكل ٦,١٠ مسقط أفقي للأرفف المتحركة لرص البضائع.

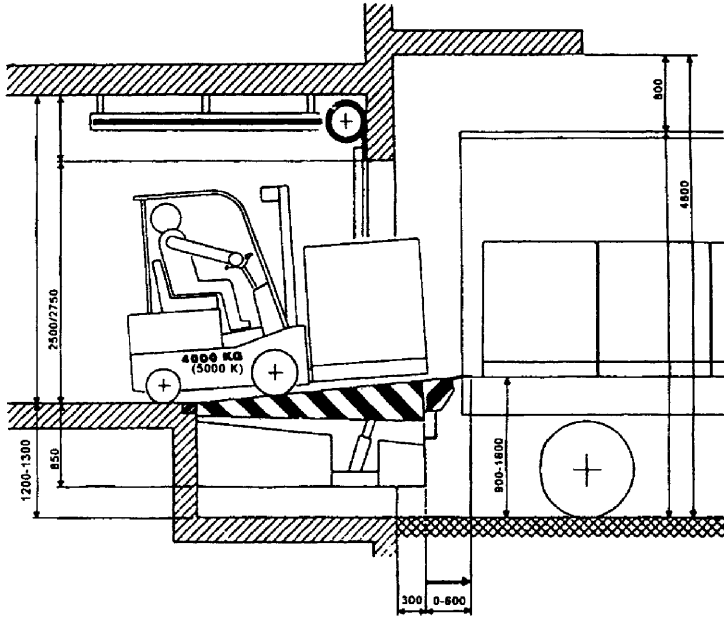


شكل ٦،١١ مسقط أفقي لمخزن تبريد به ثلاثة أنواع من أرفف رص البضائع.

٦،٧ أرففة التحميل والتفريغ

تحتاج مخازن التبريد إلى أرففة تحميل وتفريغ. وتصمم هذه الأرففة بحيث تسمح بسهولة تحميل وتفريغ عربات النقل بأنواعها المختلفة. ونظراً لاختلاف ارتفاع عربات النقل تبعاً لنوعها، وكذلك تغير هذا الارتفاع بتغير حمولة العربة، يجب وجود معدات خاصة لمساواة مستوى رصيف التحميل والتفريغ بمستوى عربات النقل. ويبين شكل ٦،١٢ أحد منحدرات الوصل التي تعمل لهذا الغرض. وعموماً يؤخذ ارتفاع الرصيف حوالي ١،٢ إلى ١،٣ متراً مقاساً من الأرض. ويحدد ارتفاع سقف الرصيف عن مستوى الرصيف تبعاً لأقصى ارتفاع مسموح به للبضائع المنقولة بأوناش الشوكية المستخدمة لنقل البضائع داخل مخزن التبريد. ويعتمد عرض رصيف التحميل والتفريغ على معدل التحميل والتفريغ المتوقع من الرصيف. ويحدد عدد الأبواب الموجودة في كل رصيف عدد عربات النقل المتوقع وجودها على الرصيف في نفس الوقت.

وبالطبع يعتمد عدد العربات على الحد الأقصى المتوقع للتحميل والتفريغ من الرصيف. ويفضل في المناطق الحارة أن يفصل رصيف التحميل والتفريغ عن غرف التبريد بغرفة بينية أو ممر. وتكون درجة حرارة هذه الغرفة البينية أو الممر بين درجة حرارة غرفة التبريد والجو الخارجي. وتستخدم الغرفة البينية أو الممر لحفظ البضائع لحين تحميلها إلى عربات النقل أو لحين تخزينها في غرفة التبريد بعد تفريغ عربات النقل.



شكل ٦,١٢ منحدر وصل لضبط مستوى الرصيف مع مستوى عربة النقل [IIR 1993].

وتقسم أرصفة التحميل والتفريغ إلى أرصفة مستقيمة وأخرى مدرجة. ويبين شكل ٦,١٣ أحد الأرصفة المستقيمة، حيث x هي المسافة بين أماكن وقوف عربات النقل عند الأبواب المختلفة على الرصيف. ويجب ألا تقل هذه

المسافة عن ٤ متر لضمان عدم احتكاك العربات مع بعضها البعض. ويمثل الطول A طول عربة النقل. ويبين شكل ٦,١٤ رصيف مدرج للتحميل والتفريغ. لاحظ أيضًا أن المسافة بين أبواب الرصيف يجب ألا تقل عن ٤ متر كما بينا سابقًا. وتعتمد المسافة D المبينة بالشكل على زاوية الميل α والمسافة x ، وتقدر المسافة D كما يلي:

$$D = x / \sin \alpha \quad (6.5)$$

وتعتمد المسافة B اللازمة لوقوف عربات النقل على أقصى طول A لعربات النقل وعلى المسافة x وزاوية الميل α كما يلي:

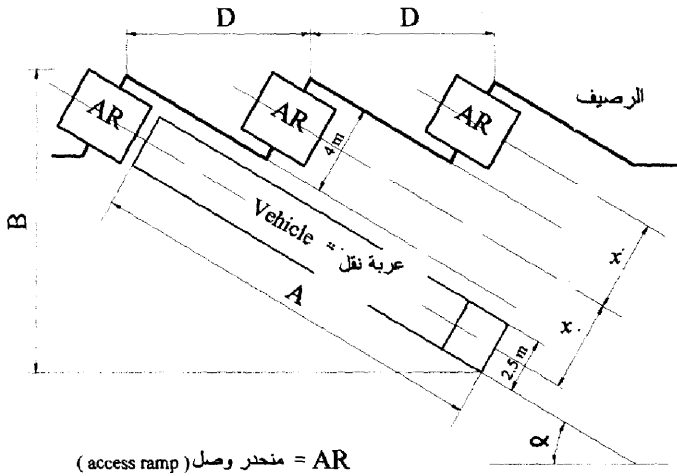
$$B = x \cos \alpha + A \sin \alpha \quad (6.6)$$

وتقسم أرصفة التحميل أيضا إلى أرصفة مغلقة وأخرى مفتوحة. وتستخدم الأرصفة المغلقة في الأجواء مرتفعة درجة الحرارة، وعندما تكون البضائع المخزنة تحت درجة التجمد. ويلزم عند استخدام هذه الأرصفة وجود وسائل كافية لضمان عدم تسرب الهواء الخارجي إلى الرصيف. ويبين شكل ٦,١٥ استخدام وسائل منع تسرب الهواء حول عربات النقل أثناء وقوفها للتحميل أو التفريغ على الرصيف.

٦,٨ تقدير حجم غرف التبريد

يعتمد حجم غرفة التبريد على أربعة عناصر. أول هذه العناصر هي حجم البضائع المتوقع تخزينها بالغرفة. ويعتمد هذا الحجم على نوعية البضائع وطريقة تعبئتها. ويمكن لتقدير هذا الحجم الرجوع إلى الجداول المعطاة في الفصل الخامس من هذا الكتاب. ثاني هذه العناصر هو طريقة رص البضائع بالغرفة. فمثلا إن كانت ستستخدم البالات الخاصة بنقل البضائع في عملية

الرصص أم لا، وعدد الرصصات المتوقع وضعها فوق بعضها البعض، وإن كان الرصص سيكون في أرصف ثابتة أو أرصف متحركة أو بدون أرصف على الإطلاق. أيضاً، يعتمد حجم الغرفة على عنصر ثالث وهو عرض الممرات اللازمة للتحميل والتفريغ. ويعتمد عرض هذه الممرات على نوع المعدات المستخدمة لذلك. فمثلاً إذا كان من المتوقع استخدام ونش شوكة داخل غرفة التبريد، كان عرض أي ممر داخل الغرفة يتراوح بين ١,٤ إلى ٣,٨م تبعاً لنوع الونش المستخدم حيث تحتاج الأنواع الحديثة من هذه الوناش عرض قدره ١,٤ متراً فقط للحركة دون الحاجة للدوران للخلف خلال الممرات.

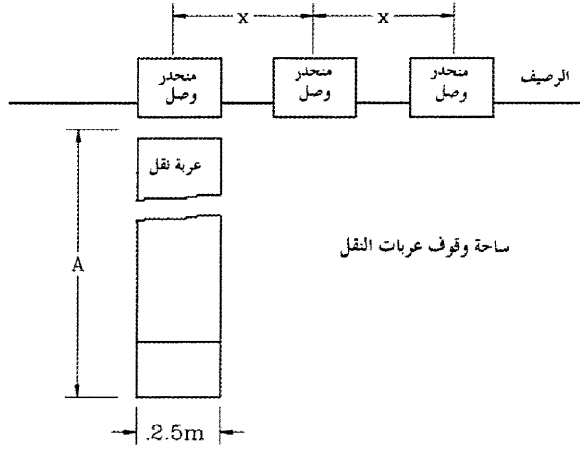


AR = منحدّر وصل (access ramp)

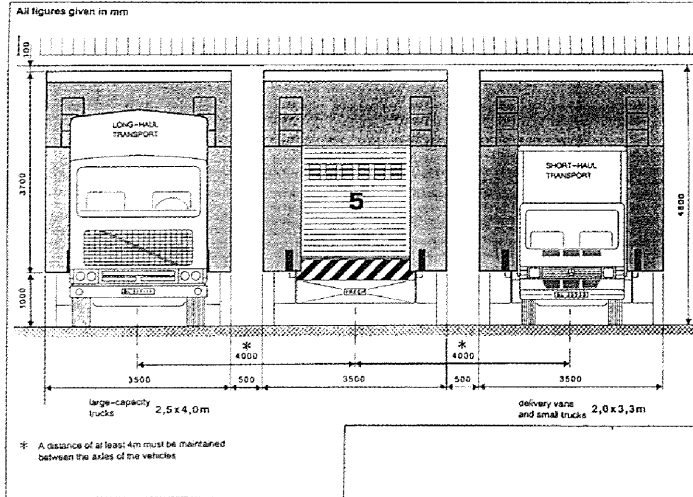
شكل ٦,١٣ رصيف مستقيم للتحميل والتفريغ.

أما العنصر الرابع الذي يؤثر في تقدير حجم غرفة التبريد فهو توزيع الهواء بغرفة التبريد، والحجم اللازم للمعدات الخاصة بذلك. وتوضع مبردات الهواء داخل غرفة التبريد على الأرضية أو أعلى الحائط. وهناك ثلاث طرق متبعة لتوزيع الهواء داخل غرفة التبريد. أول هذه الطرق هو استخدام مراوح

لها رمية كبيرة تكفي لوصول الهواء البارد إلى طرف غرفة التبريد في الجهة المواجهة لهذه المراوح. ثاني هذه الطرق هو استخدام ممرات لحمل الهواء إلى



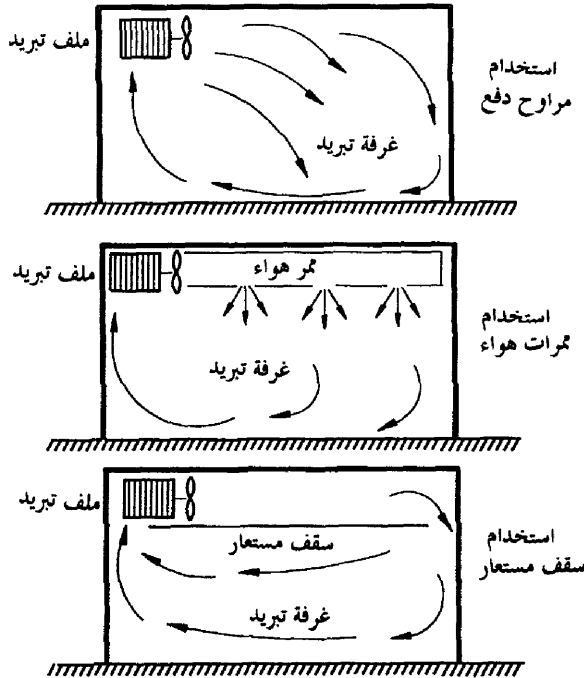
شكل ٦،١٤ رصيف مدرج للتحميل والتفريغ.



شكل ٦،١٥ استخدام وسائد عزل لمنع تسرب الهواء الخارجي إلى الرصيف عندما يكون الرصيف من النوع المغلق. [IIR 1993].

جميع الأماكن بغرفة التبريد لضمان توزيعًا جيدًا للهواء داخل غرفة التبريد. أما الطريقة الثالثة فتستخدم سقفًا صناعيًا يوضع فوقه ملف تبريد الهواء، حيث يسرى الهواء البارد فوق هذا السقف إلى طرف غرفة التبريد ثم إلى غرفة التبريد، ثم يمر خلالها إلى طرفها الآخر، ويعود مرة أخرى إلى ملف التبريد (انظر شكل ٦،١٦).

ويوجد بالطبع بعض القيم التقريبية التي تستخدم لتقدير حجم مخازن التبريد تبعًا لكتلة البضائع المتوقعة تخزينها. ولقد تم إعداد هذه القيم التقريبية من الخبرات العملية السابقة في تشغيل مخازن التبريد. ويبين جدول ٦،١ بعضًا من هذه القيم [Koelet, 1992].



شكل ٦،١٦ طرق توزيع الهواء بغرفة التبريد.

جدول ٦,١ قيم تقريبية لسعة التخزين لأنواع مختلفة من مخازن التبريد.

طن/١٠٠٠م ^٢	التوصيف
٢٠٠	مخزن تبريد للاستخدام العادي، ٣ باللات بكل رصة بارتفاع حوالي ٤,٥ إلى ٥ أمتار لكل رصة
١٦٠	تخزين منتجات مثلجة فقط
٣٠٠	تخزين منتجات مجمدة فقط
٢٢٥	مخزن تبريد لتخزين التفاح والكشمري بارتفاع من ٦ إلى ٧ أمتار

٦,٩ خفض درجة حرارة غرف التبريد

يلزم عند تشغيل مخزن التبريد لأول مرة اتباع خطوات هندسية معينة لخفض درجة الحرارة داخل غرف التبريد إلى المستوى المحدد لها. ويعزى هذا إلى انكماش عناصر الهيكل الإنشائي لغرف التبريد بمقادير أكبر من تلك للعناصر الإنشائية الأخرى الموجودة خارج الغرف. لهذا السبب يجب على المصمم الإنشائي لمخازن التبريد مراعاة الحيطنة عند التصميم ووضع وصلات تسمح باختلاف مقادير الانكماش لعناصر التصميم داخل وخارج غرف التبريد.

يتم خفض درجة الحرارة ببطء داخل غرف التبريد. فإذا كانت هذه الغرف تعمل عند درجات حرارة تحت الصفر المئوي، لزم خفض درجة الحرارة على مرحلتين. في المرحلة الأولى تخفض درجة الحرارة حتى تصل إلى ٢°م، ثم تحفظ الغرفة حوالي يومين أو ثلاثة أو أكثر عند هذه الدرجة حتى يتم التأكد من جفاف الغرفة وكذلك التأكد من خفض الرطوبة بها عن طريق مراقبة معدل تكثف بخار الماء على ملف التبريد بالغرفة. وعند ضمان استقرار درجة حرارة غرفة التبريد عند ٢°م واستقرار نسبة الرطوبة بها، تملأ جميع الفراغات الناتجة

عن انكماش عناصر الإنشاء المختلفة بمانع تسرب بخار الماء إلى الغرفة. تستمر بعدئذ عملية خفض درجة حرارة غرفة التبريد ببطء بمعدل يصل إلى حوالي 0.6°C يوميًا حتى تصل درجة حرارة الغرفة إلى القيمة المطلوبة.

٦,١٠ تغير الضغط في مخازن التبريد

تصمم مخازن التبريد لتكون محكمة الغلق. ويهدف هذا إلى الحد من تسرب الهواء الخارجي إلى مخزن التبريد، وبالتالي تخفيض حمل التبريد، ومنع دخول الماء إلى داخل المخزن. وينتج عن ذلك - أي الإغلاق المحكم - احتمال تغير الضغط داخل الغرفة عن خارجها، مما قد يسبب تلف الحوائط والوصلات الخاصة بمنع تسرب بخار الماء إلى مخزن التبريد. ويتغير الضغط داخل الغرفة عن خارجها نتيجة سببين أساسيين هما: تغير الضغط الجوي خارج مخزن التبريد عن قيمة هذا الضغط عند إغلاق مخزن التبريد، وتغير درجة حرارة مخزن التبريد أثناء إغلاقه.

يتغير الضغط الجوي خلال ساعات اليوم وخلال أيام السنة، وذلك نتيجة تغير درجة حرارة الجو. فإذا كان الضغط الجوي في لحظة ما هو p_1 وتم إغلاق باب المخزن، فإن الضغط داخل المخزن يكون p_1 أيضاً. بمرور الوقت يتغير الضغط الخارجي إلى p_2 ، بينما يبقى الضغط الداخلي كما هو عند p_1 . ويكون فرق الضغط المؤثر على الحوائط والوصلات هو

$$\Delta p = p_2 - p_1 \quad (6.7)$$

فإذا كان الضغط p_1 أعلى من p_2 أي كان فرق الضغط سالبا لزم تسرب مقدارا من هواء مخزن التبريد إلى الخارج لمعادلة الضغط، وإذا كانت Δp موجبه لزم دخول مقدار من الهواء الخارجي إلى مخزن التبريد لمعادلة الضغوط. وبفرض أن الهواء غازًا مثاليًا، وأن معادلة الضغوط تتم عند درجة حرارة ثابتة داخل

مخزن التبريد، فإن حجم الهواء المتسرب من أو إلى مخزن التبريد يعطى كما يلي:

$$\Delta V = \frac{\Delta P}{P_2} V \quad (6.8)$$

حيث V هي حجم مخزن التبريد. ويكون سريان الهواء من الخارج إلى الداخل إذا كانت ΔV موجبة، ومن الداخل إلى الخارج إذا كانت ΔV سالبة.

تتغير درجة الحرارة الداخلية لمخزن التبريد أثناء فترة خفض درجة الحرارة عند بداية التشغيل، عندئذ يتغير الضغط الداخلي بالمخزن إذا كان المخزن محكم الإغلاق. فإذا كان الضغط داخل المخزن هو p_1 عندما كانت درجة الحرارة هي T_1 فإن التغير في الضغط عندما تنخفض درجة الحرارة إلى T_2 يكون كما يلي:

$$\Delta p = p_1 \frac{T_1 - T_2}{T_2} \quad (6.9)$$

وبالطبع تكون Δp موجبة حيث إن T_2 أقل من T_1 . ويكون حجم الهواء المطلوب تسربه إلى مخزن التبريد لمعادلة الضغط الداخلي بالضغط الخارجي هو:

$$\Delta V = V \frac{T_1 - T_2}{T_2} \quad (6.10)$$

وذلك بفرض أن الهواء يعتبر غازًا مثاليًا. وكما بينا سابقاً يسرى الهواء إلى داخل المخزن التبريد إذا كانت ΔV موجبة وإلى خارج المخزن إذا كانت ΔV سالبة. وبفرض أن فترة تغير الضغط داخل المخزن هي $\Delta \tau$ ، فإن معدل سريان الهواء من أو إلى مخزن التبريد تعطى كما يلي:

$$\dot{\Delta V} = \Delta V / \Delta \tau \quad (6.11)$$

بينما فيما سبق ضرورة سريان هواء بين مخزن التبريد والجو الخارجي لمعادلة الضغط. فإذا كان سرعة سريان الهواء هي u فإن مساحة السريان تعطى كما يلي:

$$A = \Delta V / u \quad (6.12)$$

ويستخدم لهذا الغرض أنابيب مساحة مقطعها A ، ويركب على هذه الأنابيب منظمات ضغط تسمح بسريان الهواء خلالها فقط عندما يزيد فرق الضغط بين مخزن التبريد والجو الخارجي عن فرق ضغط السماح لمنظم الضغط. ومن الخبرات المكتسبة في تشغيل مخازن التبريد ينصح دائما بترك باب مخزن التبريد مفتوح بقدر ضئيل أثناء خفض درجة حرارة مخزن التبريد عند بداية التشغيل لمنع تغير الضغط داخل مخزن التبريد.

مثال ٦,٢

مخزن تبريد حجمه ٤٠٠ متر مكعب عند درجة حرارة قدرها ٣٠°م وضغط جوي قدره ١٠١,٣ كيلوبسكال.

أ) احسب التغير في الضغط إذا انخفضت درجة الحرارة داخل المخزن إلى -٢٠°م بمعدل قدره ٥°م / ساعة. ثم احسب معدل سريان الهواء المطلوب دخوله إلى المخزن لمعادلة الضغط داخل المخزن مع الضغط الخارجي.

ب) بعد وصول درجة حرارة المخزن إلى -٢٠°م تغير الضغط الجوي إلى ١٠٢,٢ كيلوبسكال. احسب معدل حجم الهواء اللازم دخوله إلى المخزن لمعادلة الضغط داخل المخزن مع الضغط الجوي.

الحل

أ) يقدر الزمن اللازم لخفض درجة الحرارة من 30°C إلى -20°C م كما يلي:

$$\Delta \tau = [30 - (-20)] / 5 = 10 \text{ hr}$$

ويحسب التغير في الضغط داخل المخزن في نهاية فترة خفض درجة الحرارة كما يلي:

$$\Delta p = 101.3 \times \frac{30 + 20}{273 + 30} = 16.7 \text{ kPa}$$

ويكون الضغط داخل المخزن كما يلي:

$$p_2 = 101.3 - 16.7 = 84.7 \text{ kPa}$$

ويقدر معدل سريان الهواء المطلوب دخوله إلى المخزن كما يلي:

$$\Delta \dot{V} = \frac{400}{10} \times \frac{30 + 20}{303} = 6.6 \text{ m}^3 / \text{hr}$$

وبفرض سرعة هواء قدرها ٢ م/ث تكون مساحة السريان كما يلي:

$$A = \frac{6.6}{3600 \times 2} = 9.2 \text{ cm}^2$$

أي أنبوب بقطر قدره ٣,٤ سم.

ب) بعد وصول المخزن إلى حالة الاستقرار عند -20°C م ومعادلة الضغط مع الضغط الجوي عند 101.3 كيلوباسكال، وتغير الضغط

الخارجي إلى ١٠٢,٢ كيلوباسكال فإن حجم الهواء اللازم دخوله إلى المخزن يقدر كما يلي:

$$\Delta V = \frac{\Delta p}{p_2} V = \frac{102.2 - 101.3}{102.2} \times 400 = 3.5 \text{ m}^3$$

الرموز ومعانيها للفصل السادس

معامل انتقال الحرارة بالحمل [وات/(م ^٢ .كلفن)]	h
الموصلية الحرارية [وات/م.°م]	k
معدل انتقال الحرارة لكل وحدة مساحة [وات/م ^٢]	q
معامل انتقال الحرارة الكلي [وات/(م ^٢ .كلفن)]	U
سرعة السريان [م/ث]	u
السرعة [م/ث]	V
معدل السريان الحجمي [م ^٣ /ث]	$\dot{V}$
السماك [متر]	x

الحروف الإغريقية

$\Delta\tau$ فرق الزمن [ث]

الفصل السابع

حمل التبريد

٧,١ تعريف حمل التبريد

حمل التبريد لغرفة تبريد هو معدل الحرارة المطلوب سحبها من الغرفة للمحافظة على درجة الحرارة ونسبة الرطوبة ثابتتين داخل الغرفة. ويتضح من هذا التعريف تغير حمل التبريد لغرفة التبريد لحظيًا مع الزمن تبعًا لتغير العوامل المختلفة التي تؤثر في حمل التبريد. ويتكون حمل التبريد لغرفة التبريد من المكونات الآتية:

أ) حمل التبريد الناتج عن انتقال الحرارة بين غرفة التبريد والأماكن المحيطة بها وذلك خلال الحوائط والسقف والأرضية.

ب) حمل التبريد للمواد المخزنة بغرفة التبريد.

ج) حمل التبريد الداخلي لغرفة التبريد، وهو الحمل الناتج عن الإضاءة والأشخاص العاملين بغرفة التبريد، وكذلك عن أي معدات ميكانيكية أو كهربائية قد توجد بغرفة التبريد وينتج عنها حرارة.

د) حمل الهواء المتسرب إلى غرفة التبريد من خارجها أثناء فتح باب غرفة التبريد.

هـ) حمل التبريد الناتج عن موتور مروحة المبادل الحراري لهواء غرفة التبريد.

و) حمل التبريد الناتج عن نظام إذابة الصقيع بغرفة التبريد.

هذا وسوف نقدم في الأجزاء التالية كيفية حساب حمل التبريد لكل من المكونات السابقة.

٧،٢ حمل التبريد نتيجة انتقال الحرارة بالحوائط والأسقف والأرضية

تختلف درجة حرارة غرفة التبريد عن درجة حرارة الجو المحيط بها في معظم الأحوال. فإذا كان فرق درجة الحرارة بين داخل غرفة التبريد وخارجها هو ΔT ، فإن معدل الحرارة المنتقلة من خارج الغرفة إلى داخلها خلال أي سطح يعطى كما يلي:

$$\dot{Q} = UA\Delta T \quad (7.1)$$

حيث A هي مساحة السطح و U هو معامل انتقال الحرارة الكلي بين غرفة التبريد وخارجها خلال السطح المعني. وتحسب قيمة U بدلالة المواد المكونة للحائط (انظر الفصل الرابع) كما يلي:

$$U = \frac{1}{R_i + \sum_j \frac{x_j}{k_j} + R_o} \quad (7.2)$$

حيث تمثل R_o و R_i على التوالي المقاومة الحرارية للسطح الداخلي والسطح الخارجي للحائط المعنى بالدراسة، بينما تمثل x_j سمك المادة j الداخلة في تكوين الحائط و k_j هي معامل التوصيل الحراري لهذه المادة. ويمكن عادة إهمال R_i و R_o مقارنة بالمقاومة الحرارية للحائط، لذا يمكن الاستعاضة عن معادلة (7.2) بالمعادلة الآتية:

$$U = \frac{1}{\sum_j x_j / k_j} \quad (7.3)$$

ويمكن إذا تم إهمال جميع المقاومات الحرارية ماعدا المقاومة الحرارية بسبب العازل الحراري استبدال المعادلة السابقة بالمعادلة البسيطة التالية:

$$U = \frac{k_i}{x_i} \quad (7.4)$$

حيث k_i هي الموصلية الحرارية للعازل المستخدم و x_i هي سمك هذا العازل. وتعطي المعادلة (7.4) قيمة U بدقة مقبولة هندسيًا مقارنة بقيمة U التي يمكن الحصول عليها من معادلة (7.2).

ويعتمد حساب قيمة ΔT في المعادلة (7.1) على درجة الحرارة الداخلية T_R بغرفة التبريد ودرجة الحرارة T_e على السطح الخارجي للحائط. وتؤخذ درجة الحرارة T_R مساوية لدرجة حرارة التخزين المطلوبة بغرفة التبريد، أما درجة حرارة السطح الخارجي فتؤخذ مساوية لدرجة حرارة الجو الخارجي، أي مساوية T_o ، إذا كان السطح الخارجي للحائط معرض مباشرة للجو الخارجي. أما إذا كان هذا السطح معرضًا للشمس، وجب تصحيح هذه الدرجة بإضافة فرق درجات الحرارة ΔT_c الموضحة بجدول ٧،١ تبعًا للون السطح المعني، أي إن

$$T_e = T_o + \Delta T_c \quad (7.5)$$

جدول ٧،١ تصحيح درجة حرارة السطح المعرض للشمس [ASHRAE 1994].

اتجاه الحائط				
لون السطح الخارجي	الشرق	الجنوب	الغرب	سطح أفقي
	°م	°م	°م	°م
أسطح داكنة اللون	٥	٣	٥	١١
أسطح متوسطة اللون	٤	٣	٤	٩
أسطح فاتحة اللون	٣	٢	٣	٥

ويضاف التصحيح المعطى بالجدول إلى درجة الحرارة الخارجية لتعويض التأثير الناتج لتعرض سطح المخزن للشمس.

٧,٣ حمل التبريد للمواد المخزنة

ينقسم حمل التبريد للمواد المخزنة إلى قسمين. حمل التبريد الأولي وحمل التبريد الناتج عن التنفس، وسنناقش كل قسم بمفرده.

دعنا نفرض أن هناك كتلة m_p من المواد المخزونة التي تم إدخالها إلى غرفة التبريد، وكانت درجة حرارة هذه المواد عند دخولها إلى المخزن هي T_a ، والمطلوب تخزين هذه المواد بغرفة التبريد عند درجة حرارة تخزين قدرها T_R ، وهي درجة حرارة غرفة التبريد. بالطبع يجب أولاً معرفة ما إذا كانت هذه المواد ستحفظ في حالة التجمد أم فوق التجمد، أي يجب معرفة علاقة T_R و T_a بدرجة التجمد T_f للمواد المخزنة. أيضاً، يعتمد حمل التبريد الأولي على عدد الساعات n اللازمة لخفض درجة حرارة المواد المخزنة من T_a إلى T_R . ويمكن حساب حمل التبريد الأولي للمواد المخزنة من العلاقات الآتية تبعاً لحالة المواد المخزنة

أ) تخزين عند درجة حرارة أعلى من درجة التجمد:

$$\dot{Q}_p = \frac{m_p C_p (T_a - T_R)}{3600n} \quad (7.6)$$

حيث C_p هي الحرارة النوعية للمواد المخزنة.

ب) تخزين عند درجة حرارة دون درجة حرارة التجمد مع وصول المواد المخزنة عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة التجمد:

$$\dot{Q}_p = \frac{m_p}{3600n} [C_p(T_a - T_{fr}) + h_{fr} + C_{pfr}(T_{fr} - T_R)] \quad (7.7)$$

حيث h_{fr} هي الحرارة الكامنة لتجمد المواد المخزنة و C_{pfr} هي الحرارة النوعية للمواد المخزنة عند درجة حرارة دون درجة التجمد T_{fr} .

ج) تخزين عند درجة حرارة دون درجة حرارة التجمد مع وصول المواد المخزنة عند درجة حرارة دون درجة التجمد:

$$\dot{Q}_p = \frac{m_p C_{pfr} (T_a - T_R)}{3600n} \quad (7.8)$$

ولقد أعطت جمعية المهندسين الأمريكيين للتبريد وتكييف الهواء جداول للخواص الحرارية للمواد الغذائية وشروط تخزينها، كما عرضنا في الفصل الخامس. ويمكن حساب الحرارة النوعية للمواد الغذائية فوق درجة التجمد أو تحت درجة التجمد من المعادلة (5.2) بالفصل الخامس.

أما حمل التنفس فهو بسبب تنفس الفواكه والخضراوات أثناء تخزينها، وينتج عن هذه العملية حمل حراري بغرفة التبريد. ويعتمد هذا الحمل على درجة حرارة التخزين لهذه الفواكه والخضراوات، فيزيد هذا الحمل بارتفاع درجة حرارة التخزين ويقل بانخفاضها. ويبين جدول ٥،١ (بالفصل الخامس) قيم حرارة التنفس h_r للعديد من الفواكه والخضراوات. وبفرض أن كتلة المواد المخزنة من بعض أنواع الفاكهة أو الخضراوات هي m (كجم)، فإن حرارة التنفس $\dot{Q}_r$ (كيلووات) عندئذ تعطى كما يلي:

$$\dot{Q}_r = \frac{mh_r}{1000 \times 1000} \quad (7.9)$$

حيث h_r بوحدات ملي وات/كجم.

٧,٤ حمل التبريد الداخلي

يشمل حمل التبريد الداخلي لغرفة التبريد الأجزاء التالية:

- حمل التبريد الناتج عن الإضاءة.
- حمل التبريد الناتج عن الأشخاص الموجودين بغرفة التبريد.
- حمل التبريد الناتج عن معدات نقل المواد المخزنة، كالأوناش المتحركة مثلاً.
- حمل التبريد الناتج عن أي موتورات، مثل موتور مروحة المبادل الحراري لهواء غرفة التبريد (إن وجد).
- حمل التبريد الناتج عن دورة إذابة الصقيع (إن وجد).

يتغير حمل التبريد الناتج عن الأجزاء السابقة خلال اليوم من ساعة لأخرى. فمثلاً يتغير حمل التبريد الناتج عن الإضاءة تبعاً لحالة الإضاءة بالغرفة أي إذا كانت الإضاءة كاملة أو جزئية أو بدون إضاءة، كذلك يتغير حمل التبريد الناتج عن الأشخاص تبعاً لعدد الأشخاص الموجودين بالغرفة، وهكذا. ولتسهيل حسابات حمل التبريد، يستخدم حمل التبريد المتوسط يومياً كأساس لحساب حمل التبريد بغرف التبريد، كما سيتضح فيما يلي.

يحسب حمل التبريد الناتج عن الإضاءة (كيلوات) من المعادلة البسيطة الآتية:

$$\dot{Q}_{light} = W A F_u F_a \frac{n}{24000} \quad (7.10)$$

حيث W هي قيمة شدة الإضاءة بالوات/م^٢ بغرفة التبريد و A هي مساحة أرضية الغرفة و F_u هي معامل الاستعمال للإضاءة (أي نسبة لمبات الإضاءة المستخدمة فعلياً إلى لمبات الإضاءة الكلية الموجودة بالغرفة) و F_a هي معامل السماح،

وهو معامل يعتمد على نوع لمبات الإضاءة المستخدمة وتكون F_a مساوية ١,٢ عند استخدام لمبات فلوريسينيت وتكون F_a مساوية ١,٠ عند استخدام لمبات تنجستون، وتمثل n عدد ساعات إضاءة اللمبات في اليوم الواحد (أي في ٢٤ ساعة). وتؤخذ W عادة حوالي ١٠ وات/م^٢ داخل غرف التبريد، وتصل إلى حوالي ١٥ إلى ٢٠ وات/م^٢ في الأماكن الأخرى من مخازن التبريد، مثل غرف المعدات، والممرات، وأماكن التحميل والتفريغ... الخ.

ويعتمد حمل التبريد الناتج عن الأشخاص الموجودين بغرفة التبريد على درجة حرارة الغرفة والملابس التي يرتديها هؤلاء الأشخاص، وكذلك على مدى نشاطهم. ويبين جدول ٧,٢ حمل التبريد المتوسط لفرد واحد عند درجات حرارة مختلفة بغرفة التبريد. ويمكن الاستعاضة عن الجدول بالمعادلة الآتية:

$$q = (272 - 6T_R) / 1000 \quad (7.11)$$

جدول ٧,٢ متوسط معدل الحرارة المنتقلة من الأشخاص إلى غرفة التبريد [ASHRAE 1994].

درجة حرارة غرفة التبريد	متوسط معدل الحرارة المنتقلة إلى غرفة التبريد للشخص الواحد
م°	كيلووات / شخص
١٠	٠,٢١٠
٥	٠,٢٤٠
صفر	٠,٢٧٠
-٥	٠,٣٠٠
-١٠	٠,٣٣٠
-١٥	٠,٣٦٠
-٢٠	٠,٣٩٠

حيث T_R (°م) هي درجة حرارة غرفة التبريد، و q (كيلووات/شخص) هي متوسط معدل الحرارة الناتج من شخص واحد. عندئذ يقدر حمل التبريد العاملين في نقل البضائع من وإلى غرفة التبريد كما يلي:

$$\dot{Q}_{people} = N_p (272 - 6T_R) \frac{n_p}{24000} \quad (7.12)$$

حيث N_p عدد الأشخاص العاملين بغرفة التبريد و n_p عدد الساعات للوجود بالغرفة يوميًا.

تستخدم مخازن التبريد معدات لنقل المواد المخزنة من وإلى داخل غرف التبريد. ويعمل بعض هذه المعدات يدويًا، بينما يعمل البعض الآخر آليًا بواسطة محرك، وفي هذه الحالة يفضل المحركات التي تعمل ببطارية كهربائية يعاد شحنها من آن إلى آخر بدلا من محركات الاحتراق الداخلي للحماية من عوادم الاحتراق داخل مخازن التبريد التي تكون بالطبع مغلقة ومحدودة التهوية. ويقدر معدل حمل التبريد $\dot{Q}_H$ (كيلووات) الناتج من أوناش نقل المواد المخزنة كما يلي:

$$\dot{Q}_H = N_f W \times \frac{n}{24000} \quad (7.13)$$

حيث N_f هي عدد الأوناش التي تعمل بغرفة التبريد، و W (وات) هي قدرة موتور محرك الونش، و n هي عدد الساعات التي يوجد فيها كل ونش داخل غرفة التبريد يوميًا. ويمكن تقديرًا أخذ قيمة W حوالي ٣٠٠٠ وات لكل ونش، إذا لم تتوفر قيمة W للأوناش المستخدمة أثناء عملية حساب حمل التبريد.

النوع الأول: كل من الموتور والقدرة الناتجة منه تفقد داخل غرفة التبريد، مثل وجود موتور مروحة ملف التبريد والمروحة داخل غرفة التبريد.

جدول ٧,٣ حمل التبريد المكافئ للموتورات [ASHRAE 1994].

قدرة الموتور كيلووات	النوع الأول	النوع الثاني	النوع الثالث
٠,١ إلى ٠,٤	١,٨	١,٠	٠,٨
٠,٤ إلى ٢,٢	١,٥	١,٠	٠,٥
٢,٢ إلى ١٥	١,٣	١,٠	٠,٣

النوع الثاني: الموتور خارج غرفة التبريد بينما القدرة الناتجة منه داخل الغرفة، مثل وجود موتور مضخة توزيع ماء مثليج أو ماء ملح خارج الغرفة والمضخة داخل الغرفة، أو مثل وجود موتور مروحة ملف التبريد خارج الغرفة بينما توجد المروحة داخل الغرفة.

النوع الثالث: الموتور داخل الغرفة والقدرة الناتجة منه خارج الغرفة، مثل وجود موتور مروحة داخل غرفة التبريد بينما توجد المروحة خارج الغرفة، أو وجود موتور مضخة داخل الغرفة ووجود المضخة خارج الغرفة.

وينتج عن الموتورات والمعدات المتصلة بها أيضاً حمل تبريد داخلي. ويجب أخذ هذا الحمل في الاعتبار عند حساب الحمل الكلي لغرفة التبريد. ويعتمد هذا الحمل على مكان الموتور والمعدات المتصلة به. فمثلاً إذا وجد موتوراً لتشغيل مروحة توزيع هواء أو مروحة ملف تبريد أو مضخة ماء مثليج. عندئذ قد يوجد الموتور والمروحة أو المضخة داخل غرفة التبريد، أو يوجد الموتور خارج غرفة التبريد، بينما توجد المروحة أو المضخة داخل الغرفة، أو يوجد الموتور داخل الغرفة والمروحة أو المضخة خارج الغرفة. ويعطي جدول ٧,٣ حمل التبريد المكافئ للموتورات في الحالات الثلاثة السابقة. عندئذ يقرر حمل التبريد (كيلووات) للموتورات والمعدات المتصلة بها لغرفة التبريد كما يلي:

$$\dot{Q}_{motor} = \sum_{i=1}^m (kW)_i (C)_i \frac{n_i}{24} \quad (7.14)$$

حيث m هي عدد الموتورات و C هي حمل التبريد المكافئ لكل كيلوات من قدرة الموتور (انظر جدول ٧،٣)، و kW هي قدرة الموتور بالكيلووات، و n هي عدد ساعات عمل الموتور يوميًا.

ومن المصادر الأخرى لحمل التبريد، الحمل الحراري الناتج عن دورة إذابة الصقيع لملفات التبريد بغرفة التبريد، إن وجد. فمن المعروف تكون الصقيع (الجليد) على هذه الملفات إذا كانت تعمل عند درجة حرارة أقل من درجة الصفر المئوي. ويسبب هذا الصقيع منع مرور الهواء على ملف التبريد، مما يقلل من سعة التبريد التي يعطيها الملف. لهذا السبب يلزم استخدام مصدر حراري لإذابة هذا الصقيع على فترات زمنية دورية. ويساهم جزء من الحرارة المستخدمة لإذابة هذا الصقيع في زيادة حمل التبريد لغرفة التبريد. ويقدر حمل التبريد $\dot{Q}_{def}$ (كيلووات) الناتج عن إذابة الصقيع كما يلي

$$\dot{Q}_{def} = \sum_{i=1}^{n_{cc}} [n_{cyc} (kW)_{cyc} F_{def} \frac{t_{cyc}}{60}]_i \quad (7.15)$$

حيث n_{cyc} هو عدد دورات إذابة الصقيع يوميًا لملف التبريد و $(kW)_{cyc}$ هو معدل الحرارة المستخدمة لإذابة الصقيع، و F_{def} هو معامل الحمل لإذابة الصقيع، و t_{cyc} هي الفترة الزمنية لدورة الصقيع (بالدقيقة)، و n_{cc} هو عدد ملفات التبريد بالغرفة. ويعتمد عدد دورات إذابة الصقيع على درجة حرارة الغرفة، فيؤخذ عادة ٤ دورات يوميًا إذا كانت درجة حرارة الغرفة بين صفر إلى -٤°م، وحوالي ٦ دورات يوميًا إذا كانت درجة حرارة الغرفة حوالي -٣٠°م. ويعتمد أيضًا طول الفترة الكلية لإذابة الصقيع على درجة حرارة الغرفة. فتكون هذه الفترة حوالي ٦٠ دقيقة يوميًا لغرف التبريد عند درجة حرارة بين

صفر إلى -4°م ، وتكون حوالي ١٢٠ دقيقة يوميًا إذا كانت درجة حرارة غرفة التبريد حوالي -30°م . ويعتمد معامل الحمل F_{def} على نوع المصدر الحراري المستخدم لإذابة الصقيع، فتكون قيمة F_{def} مساوية لـ ٠,٥ إذا استخدمت الكهرباء كمصدر حراري و ٠,٤ إذا استخدم الغاز الساخن كمصدر حراري.

مما سبق، يقدر المتوسط اليومي لحمل التبريد الداخلي (كيلووات) بغرفة تبريد كما يلي

$$\dot{Q}_{int} = \dot{Q}_{light} + \dot{Q}_{people} + \dot{Q}_{fl} + \dot{Q}_{motor} + \dot{Q}_{def} \quad (7.16)$$

مثال ٧,١

احسب حمل التبريد الداخلي لغرفة تبريد لها المواصفات الآتية:

- الإضاءة : لمبات فلورسنت، ١٢ وات/م^٢، ٦٠٪ إضاءة لمدة ٨ ساعات يوميًا.
- الأشخاص : عدد ٣ أشخاص، لمدة ٣ ساعات يوميًا داخل الغرفة.
- مساحة الغرفة : ٤ متر × ٦ متر.
- درجة حرارة الغرفة : -10°م .
- الأوناش : عدد ونش واحد لمدة ٦ ساعات يوميًا.
- ملفات التبريد : عدد ٢ ملف تبريد، لكل ملف موتور واحد لمروحة الهواء بقدرة ٠,٢٥ كيلووات، داخل الغرفة، وتعمل دورة إذابة الصقيع بالكهرباء بمعدل تسخين قدرة ١ كيلووات لكل ملف.

الحل

يقدر المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد بسبب الإضاءة كما يلي:

$$\dot{Q}_{light} = 12 \times 4 \times 6 \times 0.6 \times 1.2 \times \frac{8}{24000} = 0.069 \text{ kW}$$

ويقدر المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد للأشخاص كما يلي:

$$\dot{Q}_{people} = 3(272 + 6 \times 10) \times \frac{3}{24000} = 0.125 \text{ kW}$$

ويقدر المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد الناتج عن الونش كما يلي:

$$\dot{Q}_n = 1 \times 3000 \times \frac{6}{24000} = 0.75 \text{ kW}$$

وحيث إن درجة حرارة الغرفة -10°م ، نأخذ فترة إذابة الصقيع حوالي ٧٠ دقيقة يوميًا باستخدام ٤ دورات. عندئذ يقدر المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد نتيجة إذابة الصقيع بملفات التبريد كما يلي:

$$\dot{Q}_{def} = 2 \times 4 \times 1 \times 0.5 \times \frac{70}{4 \times 60} = 1.167 \text{ kW}$$

وتعمل مروحة ملفات التبريد في جميع الأوقات ماعدا عند تشغيل دورة إذابة الصقيع. عندئذ يقدر المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد لموتورات مراوح ملفات التبريد كما يلي:

$$\dot{Q}_{motor} = 2 \times 0.25 \times 1.8 \times \frac{(24 - 70/60)}{24} = 0.856 \text{ kW}$$

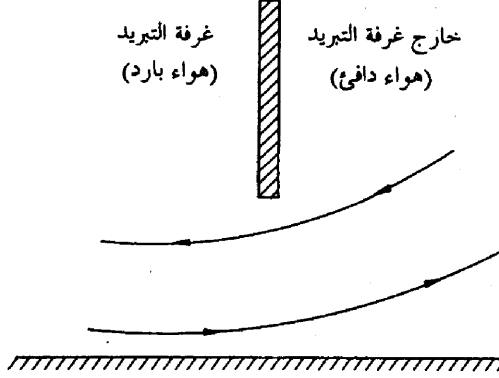
ويكون إجمالي المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد الداخلي بالغرفة كما يلي:

$$\dot{Q}_{int} = 0.069 + 0.125 + 0.75 + 1.167 + 0.856 = 2.97 \text{ kW}$$

٧,٥ حمل التبريد للهواء الخارجي المتسرب إلى غرفة التبريد

دعنا نفرض أن الظروف الداخلية لغرفة التبريد هي درجة حرارة T_R ورطوبة نسبية ϕ_R ؛ وأن الظروف خارج باب غرفة التبريد هي درجة حرارة T_o ورطوبة نسبية ϕ_o . عند فتح باب غرفة التبريد، يتولد فرق ضغط بين الهواء

الخارجي والهواء الداخلي نتيجة اختلاف كثافة كل منهما. وينتج عن هذا الفرق في الضغط سريان هواء من الخارج إلى الداخل في الجزء العلوي من الباب، ومن الداخل إلى الخارج في الجزء السفلي من الباب (انظر شكل ٧،١).



شكل ٧،١ حركة الهواء خلال باب غرفة التبريد.

ويتوقع حالتي الهواء داخل وخارج غرفة التبريد على خريطة السيكرومتري، كما هو موضح بشكل ٧،٢، نجد أن عملية تسرب الهواء من الحالة "O" إلى الحالة "R" تتبع عملية لها عامل حرارة محسوسة قدره:

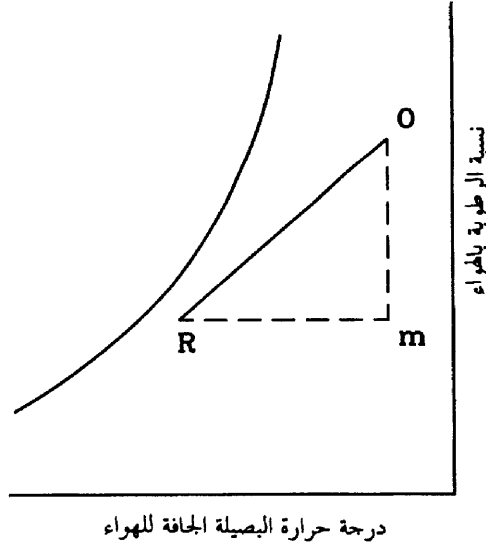
$$SHR = \frac{h_m - h_R}{h_o - h_R} \quad (7.17)$$

حيث h هي إنثالبي الهواء، وتعني التذييلات m و R و O حالات الهواء الموضحة بشكل ٧،٢. ويمكن كتابة المعادلة السابقة في الشكل التالي:

$$SHR = \frac{(C_{pa} + C_{pv} W_R)(T_o - T_R)}{(C_{pa} + C_{pv} W_R)(T_o - T_R) + (W_o - W_R)h_{fg}} \quad (7.18)$$

حيث C_{pa} هي الحرارة النوعية عند ضغط ثابت للهواء الجاف (= ١,٠ كيلوجول / كجم°م)، و C_{pv} هي الحرارة النوعية عند ضغط ثابت لبخار الماء

(= ١,٨٠٥ كيلوجول/كجم °م)، و h_{fg} هي الحرارة الكامنة لتبخير الماء
 (= ٢٥٠.١ كيلوجول/كجم) ، و W هي نسبة الرطوبة بالهواء (كجم ماء/كجم هواء
 جاف). ويمكن كتابة المعادلة السابقة في الصورة الآتية:



شكل ٧,٢ تمثيل عملية تسرب الهواء الخارجي عند الحالة "O" إلى غرفة تبريد عند الحالة "R".

$$SHR = \frac{(1 + 1.805 W_R)(T_o - T_R)}{(1 + 1.805 W_R)(T_o - T_R) + 2501(W_o - W_R)} \quad (7.19)$$

ويبين جدول ٧,٤ حساب قيم SHR من المعادلة السابقة لغرف تبريد عند درجات حرارة T_R تتراوح بين ٤٠ و ١٠ °م عند رطوبة نسبية Φ_R قدرها ٠,٩، ولهواء خارجي له درجة حرارة تتراوح بين صفر و ٥٠ °م رطوبة نسبية تتراوح بين ٠,٢ و ١,٠.

ويحسب حمل التبريد Q_{inf} (وات) للهواء المتسرب خلال فتحة باب غرفة التبريد من العلاقة الآتية [ASHRAE 1994]:

$$\dot{Q}_{inf} = Q_{ss} D_i D_f (1 - E) \quad (7.20)$$

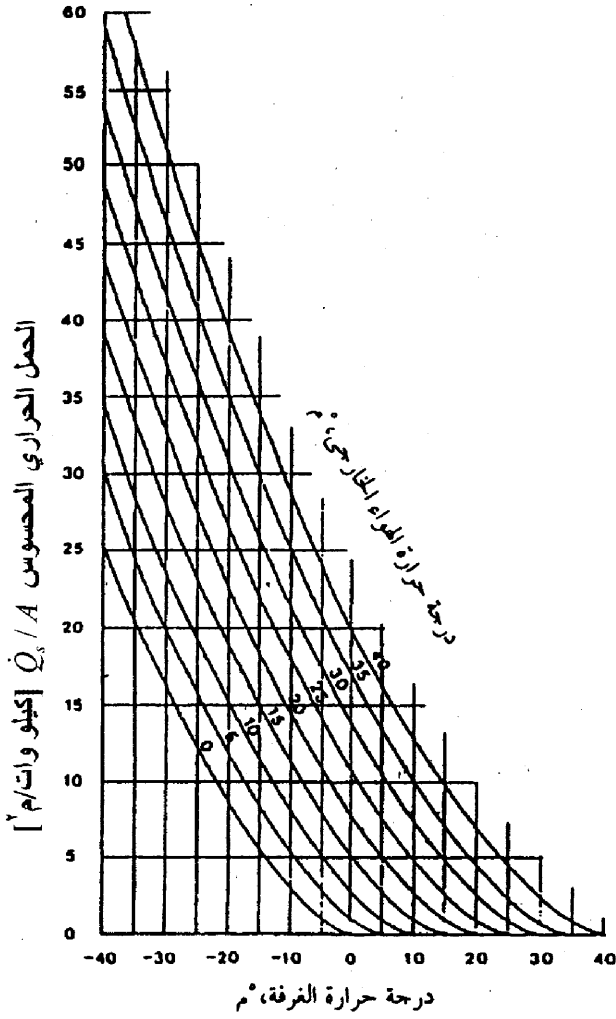
حيث D_i هي عامل زمن فتح الباب، و D_f هي عامل السريان خلال الباب و E هي فعالية أجهزة حماية التسرب من الباب، و Q_{ss} هي حمل التبريد للهواء المتسرب خلال الباب عند حالة الاستقرار. وتحسب قيمة Q_{ss} (وات) من العلاقة الآتية التي أوردها جوزني وعلمنا [Gosney and Olama,1975].

$$\frac{\dot{Q}_{ss}}{A} = 0.221 \rho_R (1 - \frac{\rho_o}{\rho_R})^{0.5} (gH)^{0.5} (\frac{2}{1 + (\rho_R / \rho_o)^{1/3}})^{1.5} \times (h_o - h_R) \quad (7.21)$$

حيث ρ_o و ρ_R هما على التوالي كثافة الهواء بغرفة التبريد وخارجها (كجم/م^٣) و H هي ارتفاع الباب (م) و g هي عجلة الجاذبية الأرضية (٩,٨١ م/ث^٢)، h_R و h_o هما إنتالبي الهواء (كيلوجول/كجم) بغرفة التبريد وخارجها على التوالي. ولتبسيط حساب قيمة $\dot{Q}_{ss}$ ، اقترحت جمعية أشري استبدال المعادلة السابقة بالعلاقة الآتية [ASHRAE 1994]:

$$\dot{Q}_{ss} = 0.577 B H^{1.5} (\frac{\dot{Q}_s}{A}) \times \frac{1}{SHR} \quad (7.22)$$

حيث B (متر) هي عرض باب غرفة التبريد و H (متر) هي ارتفاع الباب و SHR هي عامل الحرارة المحسوسة لعملية تسرب الهواء إلى غرفة التبريد، و $(\dot{Q}_s / A)$ هي حمل الحرارة المحسوسة لكل وحدة مساحة من باب الغرفة (وات/م^٢)، للهواء المتسرب إلى غرفة التبريد عند حالة الاستقرار. وتحسب قيمة $\dot{Q}_s / A$ من شكل ٧,٣ بدلالة درجة حرارة غرفة التبريد ودرجة حرارة الهواء الخارجي المتسرب خلال باب الغرفة [ASHRAE 1994]، بينما تحسب قيمة SHR من جدول ٧,٤ كما قدمنا سابقاً.



شكل ٧,٣ تغير $\dot{Q}_s / A$ مع درجتي حرارة الهواء داخل وخارج غرفة التبريد عند فتح الباب كلياً والوصول عند حالة الاستقرار [ASHRAE 1998].

جدول ٧,٤ قيم عامل الحرارة المحسوسة SHR لعملية تسرب الهواء الخارجي إلى غرفة التبريد [ASHRAE 1998].

الهواء الخارجي		درجة حرارة غرفة التبريد، درجة مئوية											
T	φ	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	
°C													
50	1.0	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.20	0.19	0.18	0.16	
50	0.8	0.34	0.33	0.32	0.3	0.29	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	0.21	
50	0.6	0.42	0.40	0.39	0.37	0.36	0.34	0.33	0.31	0.30	0.28	0.27	
50	0.4	0.52	0.51	0.49	0.48	0.46	0.45	0.43	0.42	0.41	0.39	0.38	
50	0.2	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.63	0.63	0.62	0.62	0.62	0.64	
45	1.0	0.34	0.32	0.31	0.3	0.28	0.27	0.25	0.24	0.22	0.21	0.19	
45	0.8	0.39	0.38	0.36	0.35	0.33	0.32	0.3	0.29	0.27	0.25	0.24	
45	0.6	0.47	0.45	0.44	0.42	0.41	0.39	0.37	0.36	0.34	0.32	0.31	
45	0.4	0.57	0.56	0.55	0.53	0.51	0.5	0.48	0.47	0.45	0.44	0.44	
45	0.2	0.73	0.72	0.71	0.7	0.69	0.68	0.67	0.67	0.67	0.69	0.73	
40	1.0	0.39	0.37	0.36	0.34	0.33	0.31	0.29	0.27	0.26	0.24	0.22	
40	0.8	0.45	0.43	0.42	0.4	0.38	0.36	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27	
40	0.6	0.52	0.51	0.49	0.47	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38	0.37	0.35	
40	0.4	0.63	0.61	0.6	0.58	0.57	0.55	0.53	0.52	0.51	0.5	0.5	
40	0.2	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.73	0.72	0.72	0.73	0.76	0.84	
35	1.0	0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.36	0.34	0.31	0.29	0.27	0.25	
35	0.8	0.5	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.31	
35	0.6	0.58	0.56	0.55	0.53	0.51	0.49	0.47	0.45	0.43	0.42	0.4	
35	0.4	0.68	0.66	0.65	0.63	0.62	0.6	0.58	0.57	0.56	0.56	0.58	
35	0.2	0.81	0.8	0.79	0.78	0.77	0.77	0.77	0.77	0.79	0.85	0.99	
30	1.0	0.5	0.49	0.47	0.45	0.43	0.4	0.38	0.36	0.33	0.31	0.28	
30	0.8	0.56	0.54	0.53	0.51	0.48	0.46	0.44	0.42	0.39	0.37	0.35	
30	0.6	0.63	0.62	0.6	0.58	0.56	0.54	0.52	0.50	0.48	0.47	0.46	
30	0.4	0.72	0.71	0.7	0.68	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.63	0.68	
30	0.2	0.84	0.83	0.83	0.82	0.81	0.81	0.81	0.83	0.86	0.96		
25	1.0	0.56	0.54	0.52	0.5	0.48	0.45	0.43	0.40	0.37	0.34	0.31	
25	0.8	0.62	0.6	0.58	0.56	0.54	0.51	0.49	0.47	0.44	0.42	0.4	
25	0.6	0.68	0.67	0.65	0.63	0.61	0.59	0.57	0.55	0.54	0.53	0.54	
25	0.4	0.77	0.75	0.74	0.73	0.71	0.7	0.69	0.68	0.69	0.72	0.86	
25	0.2	0.87	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85	0.86	0.88	0.95			
20	1.0	0.62	0.6	0.58	0.56	0.53	0.5	0.48	0.45	0.41	0.38	0.34	

الهواء الخارجي		درجة حرارة غرفة التبريد، درجة مئوية											
T	φ	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	
°C													
20	0.8	0.67	0.65	0.63	0.61	0.59	0.57	0.54	0.51	0.49	0.47	0.45	
20	0.6	0.73	0.72	0.7	0.68	0.66	0.64	0.62	0.61	0.6	0.61	0.68	
20	0.4	0.81	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.74	0.77	0.87		
20	0.2	0.9	0.89	0.88	0.88	0.88	0.88	0.9	0.95				
15	1.0	0.67	0.65	0.63	0.61	0.58	0.55	0.52	0.49	0.45	0.41	0.35	
15	0.8	0.72	0.7	0.69	0.66	0.64	0.62	0.59	0.56	0.54	0.52	0.55	
15	0.6	0.78	0.76	0.75	0.73	0.71	0.69	0.68	0.67	0.67	0.73		
15	0.4	0.84	0.83	0.82	0.81	0.8	0.79	0.79	0.81	0.88			
15	0.2	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92	0.95					
10	1.0	0.73	0.71	0.68	0.66	0.63	0.6	0.57	0.53	0.49	0.42	0	
10	0.8	0.77	0.75	0.73	0.71	0.69	0.66	0.64	0.62	0.6	0.62	0	
10	0.6	0.82	0.8	0.79	0.77	0.76	0.74	0.73	0.73	0.78			
10	0.4	0.87	0.86	0.85	0.84	0.84	0.84	0.85	0.90				
10	0.2	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.96						
5	1.0	0.77	0.75	0.73	0.71	0.68	0.65	0.61	0.57	0.5	0	0.58	
5	0.8	0.81	0.79	0.78	0.76	0.73	0.71	0.69	0.67	0.69	0	0.44	
5	0.6	0.85	0.84	0.83	0.81	0.8	0.79	0.79	0.82				
5	0.4	0.9	0.89	0.88	0.88	0.87	0.88	0.92					
5	0.2	0.95	0.95	0.95	0.95	0.96							
0	1.0	0.81	0.8	0.77	0.75	0.72	0.69	0.65	0.58	0	0.65	0.57	
0	0.8	0.85	0.83	0.81	0.8	0.78	0.75	0.74	0.75	0	0.52	0.51	
0	0.6	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.86					
0	0.4	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.93						
0	0.2	0.96	0.96	0.96	0.97	0.99							

يعرف عامل زمن فتح الباب بأنه نسبة زمن فتح الباب بالثانية يوميًا إلى عدد الثواني في اليوم الواحد، أي إن

$$D_t = \frac{P \theta_p + 60\theta_o}{3600 \times 24} \quad (7.23)$$

حيث P هي عدد المرات التي يفتح خلالها الباب يوميًا، و θ_p (ثانية) هو زمن فتح الباب كل مرة، و θ_o (دقيقة) هو الزمن الكلي يوميًا التي يبقى الباب عندها مفتوحًا خلافاً لمرات فتح الباب.

أيضًا، يعرف عامل السريان D_f خلال الباب بأنه نسبة المعدل الحقيقي لسريان الهواء خلال الباب إلى معدل سريان الهواء خلال الباب عند حالة الاستقرار. وتؤخذ قيمة D_f مساوية ٠,٨، إذا كان فرق درجات الحرارة بين خارج الغرفة وداخلها يزيد عن ١١°م، ومساوية ١,١ إذا قل هذا الفرق عن ١١°م [ASHRAE 1994]. وتعتمد قيمة الفعالية E لأجهزة حماية التسرب من الباب على نوع هذه الأجهزة. فتؤخذ E مساوية ٠,٩٥ أو أكثر عن استخدام ستائر الشرائح البلاستيكية، بينما تقل هذه الفعالية عن ٠,٧ في حالة استخدام ستائر الهواء.

ولمزيد من التفاصيل حول حساب حمل التبريد الناتج عن الهواء المتسرب إلى مخازن التبريد يمكن للقارئ الرجوع إلى: Jones et al. 1993, Cole 1984, ASHRAE 1998, ASHRAE 1994، والسيد (١٩٩٧).

مثال ٧,٢

غرفة تبريد لها باب عرضة ٣ متر وارتفاع ٢ متر. احسب المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد الناتج عن تسرب الهواء الخارجي إلى غرفة التبريد إذا كانت الغرفة تعمل عند ١٠°م وكانت ظروف الممر الخارجي المجاور لباب الغرفة عند ١٥°م و ٦٠٪ رطوبة نسبية. افرض الآتي:

- باب الغرفة يفتح ١٢ مرة كل ساعة خلال ٨ ساعات عمل يوميًا، مدة فتح الباب كل مرة دقيقة واحدة.
- يفتح الباب لمدة نصف ساعة متصلة يوميًا.

- لا يستخدم الباب أي وسيلة للحماية من التسرب أثناء فتحة.

الحل

من الخريطة بشكل ٧,٣ غرفة تبريد عند -١٠°م وهواء خارجي عند ١٥°م نجد أن:

$$\left(\frac{\dot{Q}_s}{A}\right)=12 \text{ kW/m}^2$$

من جدول ٧,٤ نجد أن قيمة عامل الحرارة المحسوسة SHR لعملية تسرب الهواء يساوي ٠,٦٨، عندئذ تحسب قيمة $\dot{Q}_{ss}$ من معادلة (7.22) كما يلي

$$\dot{Q}_{ss}=0.577 \times 3 \times 2^{1.5} \times 12 \times \frac{1}{0.68}=86.4 \text{ kW}$$

من معادلة (7.23) نحسب معامل الزمن D_t كما يلي:

$$D_t = \frac{12 \times 8 \times 60 + 60 \times 30}{3600 \times 24} = 0.0875$$

وحيث إن الفرق بين درجة الحرارة خارج الغرفة وداخلها يساوي ٢٥°م أي يزيد عن ١١°م فإن عامل السريان D_f يؤخذ يساوي ٠,٨، أيضاً تؤخذ E تساوي صفراً لعدم استخدام أي وسيلة للحماية من التسرب أثناء فتح الباب. عندئذ يقدر المتوسط اليومي لحمل التبريد نتيجة تسرب الهواء الخارجي إلى غرفة التبريد كما يلي:

$$\dot{Q}_{inf} = \dot{Q}_{ss} D_t D_f (1 - E)$$

$$= 86.4 \times 0.0875 \times 0.8 \times (1 - 0) = 6.05 \text{ kW}$$

٧,٦ حمل التبريد الإجمالي لغرف التبريد

بينما فيما سبق الأجزاء المختلفة لحمل التبريد لغرف التبريد. ويتكون الحمل الإجمالي لغرفة التبريد من مجموع هذه الأجزاء. وتبعًا لقيمة حمل التبريد الإجمالي لغرفة التبريد يتم اختيار ملف أو ملفات التبريد المناسبة لغرفة التبريد كما سنبين فيما بعد في الفصل الثالث عشر. نلاحظ أن حساب الحمل الداخلي لغرفة التبريد يتطلب حساب حمل مواتير المراوح لملفات التبريد بالغرفة والحمل الناتج عن دورة إذابة الصقيع لملف التبريد (إن وجد)، وهذان الحملان يعتمدان على مواصفات ملف أو ملفات التبريد التي لم يتم اختيارها. لهذا السبب ينصح عادة حساب حمل التبريد الإجمالي لغرفة التبريد بدون أخذ حمل التبريد لمواتير مراوح ملفات التبريد وحمل التبريد الناتج عن دورة إذابة الصقيع في الاعتبار. ويستخدم هذا الحمل لاختيار ملفات التبريد، ثم يؤخذ حمل التبريد للمواتير ودورة إذابة الصقيع بعد ذلك. ويجب التأكد من أن سعة التبريد لملفات التبريد التي تم اختيارها تكفي لحمل التبريد الكلي لغرفة التبريد، وسنتعرض لمزيد من التفاصيل لهذا الموضوع فيما بعد.

الرموز ومعانيها للفصل السابع

A	المساحة [م ^٢]
B	عرض باب غرفة التبريد [م]
C	الحمل الحراري المكافئ لكل كيلوات من قدرة الموتور [-]
C_p	الحرارة النوعية للمواد الغذائية [كجول/كجم.°م]
C_{pfr}	الحرارة النوعية للمواد الغذائية عند درجات حرارة ما دون درجة التجمد [كجول/كجم.°م]
D_f	عامل السريان خلال الباب
D_t	عامل زمن فتح الباب [-]
E	فعالية أجهزة حماية التسرب [-]
F_a	معامل السماح للإضاءة [-]
F_{def}	معامل الحمل لإذابة الصقيع [-]
F_u	معامل استعمال الإضاءة [-]
H	ارتفاع باب غرفة التبريد [م]
h_{fg}	الفرق في الانتالبي بين حالة التشبع في الحالة الغازية والسائلة [كجول/كجم]
h_{fi}	الحرارة الكامنة لتجمد المادة الغذائية [كجول/كجم]
h_r	حرارة التنفس للمادة الغذائية [ملي وات/كجم]
k_i	الموصلية الحرارية للعازل الحراري، [وات/م.°م]
m_p	كتلة المواد المراد تخزينها [كجم]
n	عدد الساعات اللازمة لتبريد المواد الغذائية [ساعة]
n_{cc}	عدد ملفات التبريد [-]
n_{cyc}	عدد مرات دورات إذابة الصقيع [-]

N_f	عدد الأوناش [-]
n_p	عدد الساعات التي يمكنها العاملون في غرفة التبريد [ساعة]
N_p	عدد الأشخاص العاملين في مخزن التبريد [-]
p	عدد المرات التي يفتح فيها الباب يوميا
q	متوسط الحرارة الناتجة من الشخص الواحد [كيلووات/شخص]
$\dot{Q}$	معدل انتقال الحرارة [وات او كيلووات]
$\dot{Q}_{def}$	الحمل الحراري نتيجة إذابة الصقيع [كيلووات]
$\dot{Q}_f$	الحمل الحراري نتيجة الأوناش [كيلووات]
$\dot{Q}_{inf}$	الحمل الحراري نتيجة تسرب الهواء إلى غرفة التبريد [كيلووات]
$\dot{Q}_{int}$	مجموع الحمل الحراري الداخلي [كيلووات]
$\dot{Q}_{motor}$	الحمل الحراري نتيجة المواتير [كيلووات]
$\dot{Q}_{people}$	الحمل الحراري نتيجة الأشخاص [كيلووات]
$\dot{Q}_p$	معدل الحرارة الناتجة من المواد الغذائية [كيلووات]
$\dot{Q}_s$	حمل التبريد المحسوس نتيجة تسرب الهواء [كيلووات]
$\dot{Q}_{ss}$	حمل التبريد بسبب تسرب الهواء في حالة الاستقرار [كيلووات]
SHR	معامل الحرارة المحسوسة [-]
T_a	درجة حرارة المواد الغذائية عند دخولها مخزن التبريد، [°م]
T_e	درجة الحرارة الخارجية بعد التصحيح نتيجة لون جدار غرفة التبريد [°م]
T_{fr}	درجة حرارة التجمد للمواد الغذائية، [°م]
T_o	درجة الحرارة الخارجية [°م]
T_R	درجة حرارة غرفة التبريد، [°م]
U	معامل انتقال الحرارة الكلي [وات/م ² .°م]
W	قيمة شدة الإضاءة [وات]

W_o	نسبة الرطوبة للهواء الخارجى [كجم ماء/كجم هواء]
W_R	نسبة الرطوبة للهواء في غرفة التبريد [كجم ماء/كجم هواء]
x_i	سمك العازل الحراري، [م]

التنزيل

o	الحالة للهواء الخارجى
R	الحالة للهواء داخل غرفة التبريد

الحروف الإغريقية

ΔT_c	معامل التصحيح لدرجة الحرارة الخارجية [°م]
φ	الرطوبة النسبية [-]
θ_p	زمن فتح الباب [ثانية]
θ_o	الزمن الكلي اليومي الذي يبقى فيه الباب مفتوحا [دقيقة]
ρ	الكثافة [كجم/م ^٣]

الفصل الثامن

نظم التبريد

٨,١ مقدمة

في الفصل الثاني قدمنا دورة التبريد بانضغاط البخار. وضم ذلك الفصل عرضًا موجزًا للدورة المثالية والدورة الفعلية في شكلها البسيط الذي يستخدم مرحلة واحدة للضاغط. وهناك بالطبع العديد من نظم التبريد المنبثقة من دورة التبريد بالانضغاط، ولكنها تحوي مكونات أخرى بالإضافة إلى المكونات التي عرضناها في الفصل الثاني، والتي شملت الضاغط والمكثف والمبخر وصمام التمدد.

في الفصل الحالي نقدم أهم نظم التبريد المستخدمة في مخازن التبريد. وتشمل هذه النظم الآتي :

- أ) نظام التبريد أحادي المرحلة (أي ضاغط واحد) المستخدم لمبادل حراري بين المكثف والمبخر.
- ب) نظام التبريد أحادي المرحلة المتعدد المبخرات.
- ج) نظام التبريد متعدد المراحل المستخدم للمبردات البينية (المبرد البيني المغلق، أو المفتوح، أو مبرد المياه).
- د) نظام التبريد ذو التغذية الزائدة لسائل المبرد.

ويضم الفصل الحالي التحليل الحراري لهذه النظم مع عرض موجز لمميزات وعيوب كل نظام.

٨,٢ نظم التبريد أحادية المرحلة

نقسم نظم التبريد، تبعًا لعدد مراحل الضاغط المستخدم في عملية الانضغاط، إلى نظم أحادية المرحلة، حيث يتم الانضغاط بمرحلة واحدة

بالضاغط، ونظم متعددة المراحل، حيث يتم الانضغاط في مرحلتين أو أكثر. وتتبع النظم أحادية المرحلة دورة التبريد بالانضغاط التي قدمناها فيما سبق في الفصل الثاني- إلا أن بعض النظم الأحادية يشمل اختلافًا أو أكثر عن دورة التبريد البسيطة المعطاة في شكل ٢,١ بالفصل الثاني. ومن هذه الاختلافات، على سبيل المثال وليس الحصر، الآتي:

(أ) استخدام مبادل حراري بين المكثف والمبخر.

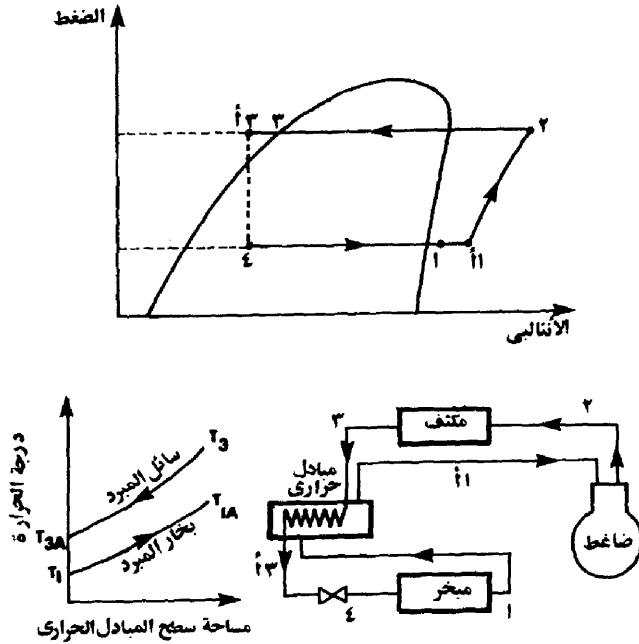
(ب) استخدام أكثر من مبخر واحد في دورة التبريد الواحدة.

يبين شكل ٨,١ نظام تبريد أحادي المرحلة به مبادل حراري واحد. يستخدم المبادل الحراري للحصول على تبريد تحت لسان المبرد الداخل إلى صمام التمدد، مما يساعد على منع وجود بخار للمبرد عند دخول صمام التمدد نتيجة فقد الضغط في خط السائل، أو انتقال حرارة إلى هذا الخط من الجو المحيط. أيضًا، يعمل التبريد التحتي الذي يعطيه المبادل الحراري على تحسين التأثير التبريدي للمبخر، وبالتالي خفض معدل المبرد الذي يناوله الضاغط لكل وحدة سعة تبريد بالمبخر. ويعمل المبادل الحراري على تبريد سائل المبرد الخارج من المكثف أو المستقبل باستخدام بخار المبرد الخارج من المبخر، كما هو موضح بشكل ٨,١. كما يساعد استخدام المبادل الحراري أيضًا على ضمان دخول بخار المبرد إلى الضاغط في حالة البخار المحمص، مما يحمي الضاغط من أي سائل للمبرد قد يدخل إليه فيؤدي إلى تلفه ميكانيكيًا.

وبأخذ الاتزان الحراري للمبادل الحراري، يحسب الانخفاض في إنثالبي سائل المبرد في المبادل الحراري كما يلي:

$$h_3 - h_{3A} = h_{1A} - h_1 \quad (8.1)$$

ويمثل هذا الانخفاض الزيادة في التأثير التبريدي للمبخر. عندئذ يصبح معدل سريان المبرد في المبخر كما يلي:



شكل ٨، ١ نظام تبريد أحادي المرحلة يحوي مبادلاً حرارياً.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{h_1 - h_{3A}} \quad (8.2)$$

بينما تحسب قدرة الانضغاط كما يلي (بفرض انضغاط مثالي):

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_{1A}) \quad (8.3)$$

وتحدد فعالية المبادل الحراري المستخدم مقدار التبريد التحتي الذي يعطيه المبادل الحراري. فمثلاً إذا كانت ε هي فعالية المبادل الحراري، التي تعرف كما يلي:

$$\varepsilon = \frac{(T_{1A} - T_1)}{(T_3 - T_1)} \quad (8.4)$$

فإن T_{3A} تحسب من معادلة (8.1) بعد حساب T_{1A} من المعادلة السابقة، أي إن:

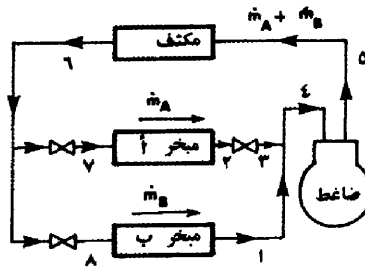
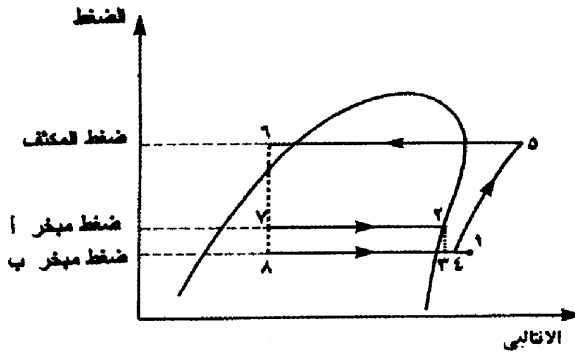
$$T_{3A} = T_3 - \frac{C_{pv}}{C_{pl}} \varepsilon (T_3 - T_1) \quad (8.5)$$

حيث C_{pv} و C_{pl} هي الحرارة النوعية عند ثبات الضغط لسائل المبرد ولبخار المبرد، على التوالي. وعموماً يؤدي استخدام المبادل الحراري مع مبرد ١٢ أو مبرد ٥٠٢ أو مبرد ١٣٤ إلى تحسين طفيف في أداء نظام التبريد، مما يخفض من تكلفة التشغيل، وإن كان بالطبع قد يضيف جزءاً إلى التكلفة الأولية للنظام. أما استخدام المبادل الحراري مع المبرّدات الأخرى، مثل مبرد ٢٢، فلا يؤدي إلى تحسين ملموس في أداء نظام التبريد [Gosney 1982].

يعطي شكل ٨،٢ اختلافاً آخر عن دورة التبريد البسيطة، فيبين الشكل نظام تبريد أحادي المرحلة يحوي مبخرين، أحدهما يعمل عند درجة حرارة مرتفعة نسبياً عن الآخر. يوضع صمام تمدد عند دخول كل مبخر للتحكم في سريان المبرد إليه، كما هو موضح بالشكل. ويلزم وضع صمام خنق عند الخروج من المبخر "أ" ذي درجة الحرارة المرتفعة نسبياً لخفض ضغط البخار الخارج من هذا المبخر إلى ضغط السحب بالضاغط، والمناظر لضغط المبخر "ب". ويقدر معدل سريان المبرد إلى المبخرين "أ" و "ب" على التوالي كما يلي

$$\dot{m}_B = \frac{(\dot{Q}_e)_A}{(h_2 - h_6)} \quad (8.6A)$$

$$\dot{m}_B = \frac{(\dot{Q}_e)_B}{(h_1 - h_6)} \quad (8.6B)$$



شكل ٨.٢ نظام تبريد أحادي يحوي مبخرين.

ويعمل الضاغط والمكثف بسريان يساوي $(\dot{m}_A + \dot{m}_B)$. وتضم بعض النظم الأخرى، المستخدمة في العديد من التطبيقات الصناعية، أكثر من مبخرين في بعض الأحيان. ويلزم التنويه هنا أنه كلما زاد فرق الضغط بين المبخرين، كلما كانت الدورة أقل ترشيدياً للطاقة نظراً لخفض ضغط السريان $\dot{m}_A$ من الحالة ٢ إلى الحالة ٣ دون فائدة حقيقية، ثم رفع الضغط مرة أخرى بالضاغط. وقد يكون

من الأفضل في بعض الأحيان استبدال النظام الموضح بشكل ٨,٢ بنظام آخر ثنائي المرحلة، أي تستخدم فيه مرحلتان بالضاغط للقيام بعملية الانضغاط.

مثال ٨,١

أعد حل مثال ٢,١ بالفصل الثاني بعد استخدام مبادل حراري، كما هو مبين بشكل ٨,١. افرض أن درجة حرارة بخار المبرد الخارج من المبادل الحراري تساوي ٢٠°م.

الحل

أ) باستخدام حل مثال ٢,١ وخرائط وجداول مبرد ٢٢ نجد الضغط والإنتالبي عند الحالات المختلفة بالدورة المبينة بشكل ٨,١، مع ملاحظة أن الحالة ١ هي حالة بخار مشبع كما هو معطى في مثال ٢,١. ويعطي جدول ٨,١ ملخصاً لقيم الضغط والإنتالبي عند الحالات المختلفة بالدورة. بأخذ الاتزان الحراري للمبادل الحراري نصل إلى الآتي:

جدول ٨,١ حل مثال ٨,١.

الحالة	درجة الحرارة الضغط °م	كيلو بسكال	والإنتالبي كيلوجول/كجم	الحجم النوعي م³/كجم
١	١٥-	٢٩٦,٢	٣٩٩,٢	
١أ		٢٩٦,٢	٤٢٣,٠	٠,٠٩٠٧
٢	٨٩,٥	١١٩٢,٩	٤٦٣,٨	
٣	٣٠	١١٩٢,٩	٢٣٦,٦	
٣أ	١٠,٧	١١٩٢,٩	٢١٢,٨	
٤	١٥-	٢٩٦,٢	٢١٢,٨	

$$\begin{aligned} h_{3A} &= h_3 - (h_{1A} - h_1) \\ &= 236.6 - (423 - 399.2) = 212.8 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

يحسب معدل سريان كتلة المبرد إلى المبخر عندئذ كما يلي:

$$\dot{m} = \frac{1}{(399.2 - 212.8)} = 0.00536 \text{ kg/s}$$

وعليه يعطي معدل سريان الحجم إلى الضاغط كما يلي:

$$\dot{V} = \dot{m} v_{1A} = 0.00536 \times 0.0907 = 4.86 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

وهو تقريباً نفس القيمة المعطاة بمثال ٢،١ بالفصل الثاني (يمكن إهمال التغير في $\dot{V}$).

(ب) من جدول ٨،١ نلاحظ ارتفاع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من الضاغط إلى ٨٩،٥°م بالمقارنة بحوالي ٥٣°م في مثال ٢،١ بالفصل الثاني، مما قد يؤدي إلى تحلل زيت التزييت المصاحب لبخار المبرد. ويحسب معدل طرد الحرارة من المكثف كما يلي:

$$\dot{Q}_c = 0.00536(463.8 - 236.6) = 1.218 \text{ kW}$$

وهي تقريباً نفس القيمة المعطاة بمثال ٢،١، أي أن استخدام مبادل حراري لم يؤثر على معدل طرد الحرارة من المكثف.

(ج) تحسب قدرة الضاغط بفرض انضغاط أيزنتروبي كما يلي:

$$\dot{W}_c = 0.00536(463.8 - 423) = 0.2187 \text{ kW}$$

ويقدر معامل أداء الدورة عندئذ كما يلي:

$$\text{COP} = \frac{1}{0.2187} = 4.57$$

(د) تحسب الكفاءة النسبية للدورة كما يلي:

$$\eta_r = 4.57 \frac{(30 + 15)}{(273 - 15)} = 0.798$$

ويلاحظ أن استخدام مبادل حراري لم يغير قيمة حجم البخار بخط سحب الضاغط، أو الحرارة المطرودة بالمكثف، أو قدرة الانضغاط، أو معامل أداء الدورة، وذلك نظراً لاستخدام مبرد ٢٢. أما إذا استخدم مبرد ١٢ أو مبرد ١٣٤، فمن المتوقع تحسن معامل أداء الدورة. ويستخدم المبادل الحراري مع نظم التبريد المستخدمة لمبرد ٢٢ للحصول على تبريد تحت في خط السائل للأسباب التي ذكرناها فيما سبق، وهي: التغلب على فقد الضغط وانتقال الحرارة بخط السائل لمنع وجود بخار مبرد عند دخول صمام التمدد.

٨,٣ نظم التبريد متعددة المراحل

تعرف الكفاءة الحجمية η_v (انظر الفصل ١٣) بأنها نسبة معدل سريان كتلة المبرد الفعلية إلى معدل سريان كتلة المبرد الافتراضية

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{act}}{\dot{m}_{th}} \quad (8.7)$$

و يعرف خلوص الضاغط C بأنه نسبة حجم الضاغط عند أقصى حركة للكباس في شوط الانضغاط إلى حجم الضاغط في بداية مشوار الانضغاط. بفرص أن عملية الانضغاط في الضاغط بأنها عملية بوليتروبية (Polytropic process: $PV^n = \text{Const.}$) حيث n هو أس العلاقة بين الضغط والحجم، وعند إهمال كل العوامل الأخرى في حساب الكفاءة الحجمية ماعدا خلوص الضاغط يمكن إيجاد معادلة بسيطة للكفاءة الحجمية للضاغط كدالة في الضغط العالي

والضغط المنخفض وأس عملية البوليتروبية وخلوص الضاغط (انظر الفصل ١٣) كالآتي:

$$\eta_v = 1 + C - C \left(\frac{P_c}{P_e} \right)^{1/n} \quad (8.8)$$

حيث P_c و P_e هما ضغطا المكثف والمبخر على التوالي.

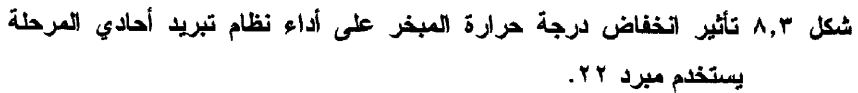
بانخفاض درجة حرارة المبخر، يسوء أداء نظم التبريد أحادية المرحلة، ولتوضيح هذا القول دعنا ندرس نظام تبريد أحادي المرحلة يتبع دورة التبريد البسيطة المعطاة بشكل ٢,١ بالفصل الثاني، ويستخدم هذا النظام مبرد ٢٢ عند درجة حرارة مكثف قدرها 50°M ودرجة حرارة مبخر قدرها 0°M مع ضاغط ترددي له نسبة خلوص ٣٪. نبدأ الآن في دراسة هذا النظام عند انخفاض درجة حرارة المبخر إلى 40°M ، ثم إلى 60°M ، كما هو مبين بشكل ٨,٣. ويبين جدول ٨,٢ ملخص هذه الدراسة. ويلاحظ من الجدول أنه بانخفاض درجة حرارة المبخر ينتج الآتي:

(أ) انخفاض الكفاءة الحجمية للضاغط حتى تصبح قيمة هذه الكفاءة صغيرة جدًا عند درجات حرارة منخفضة بالمبخر.

(ب) ارتفاع درجة حرارة البخار الخارج من الضاغط، مما يسبب تحلل زيت التزييت المصاحب لبخار المبرد، وأيضًا قد يسبب إجهادات بالضاغط نتيجة الفرق الكبير بين درجتي حرارة الدخول والخروج بالضاغط.

(ج) انخفاض معامل أداء نظام التبريد بدرجة كبيرة.

(د) زيادة الإجهادات التي تتعرض لها الأجزاء الميكانيكية المتحركة بالضاغط نظرًا لكبر نسبة الانضغاط.



COP	$\dot{Q}_c$ كيلووات	η_v %	T_2 م°	h_2 كيلوجول/ كجم	h_1 كيلوجول/ كجم	درجة حرارة المبخر م°
٤,١٤	١,٢٤	٩٤	٧٢	٤٣٩,٣	٤٠٥	صفر
١,٦٢	١,٦٢	٧١	١٠١	٤٦٥	٣٨٨,١	٤٠-
١,٠٧	١,٩٣	٢٩	١٢٥	٤٨٦,١	٣٧٨,٦	٦٠-

ولحل المشاكل السابقة ينصح باستخدام نظم تبريد متعددة المراحل، حيث تتم عملية الانضغاط في مرحلتين أو أكثر بالضاغط، مما يساعد على خفض

نسبة الانضغاط بكل مرحلة. عندئذ يفضل تبريد بخار المبرد الخارج من أية مرحلة قبل الدخول إلى المرحلة التالية، لخفض درجة حرارته. ولهذا الغرض يستخدم مبرد بيني، أي بين مرحلتين، ويعرف هذا المبرد عادة باسم المقتصد نظراً لفائدته في اقتصاد الطاقة اللازمة لتشغيل نظام التبريد. ومن أهم أنواع المبردات البينية المستخدمة، الأنواع الثلاثة التالية:

(أ) المبرد البيني المغلق.

(ب) المبرد البيني المفتوح.

(ج) مبرد المياه البيني.

وفيما يلي سنبين بعض نظم التبريد ثنائية المرحلة التي تستخدم المبردات البينية السابقة.

٨,٣,١ المبرد البيني المغلق

يبين شكل ٨,٤ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبرداً بينياً مغلقاً. وكما هو موضح بالرسم يعمل هذا المبرد على تبريد بخار المبرد الخارج من المرحلة الأولى من الضاغط، مما يساعد على خفض درجة الحرارة عند النقطة ٤. أيضاً، يعمل المبرد البيني الموضح بالشكل على زيادة التأثير التبريدي بالمبخر نظراً لزيادة التبريد التحتي لسائل المبرد في المبرد البيني. فكما هو موضح بالشكل يقسم سائل المبرد في المبرد البيني إلى سريانيين أحدهما m والآخر Δm . ويعمل السريان Δm على تبريد بخار المبرد من الحالة ٢ إلى الحالة ٣، وكذلك تبريد سائل المبرد الساري إلى المبخر من الحالة ٥ إلى الحالة ٧. ويعطي الاتزان الحراري للمبرد البيني العلاقة الآتية:

$$(\Delta m + m) h_5 + \dot{m} h_2 = (m + \Delta m) h_3 + \dot{m} h_7$$

ومنها ينتج الآتي:

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{(h_5 - h_7) + (h_2 - h_3)}{(h_3 - h_5)} \quad (8.9)$$

ومن القانون الثاني للديناميكا الحرارية يشترط أن يكون:

$$T_7 \geq T_3 \quad (8.10)$$

وتكون حالة التساوي للعملية المثالية لانتقال الحرارة في المبرد البيني عندما يكون سطح انتقال الحرارة لانهائياً، وإلا زادت T_7 عن T_3 .

ويقدر معدل سريان المبرد خلال المبخر كما يلي:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{h_1 - h_8} \quad (8.11)$$

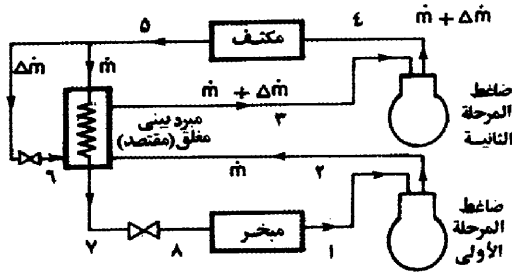
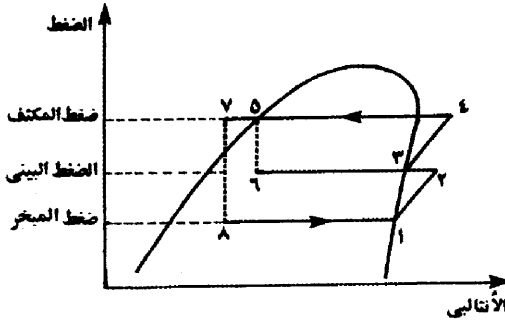
حيث $\dot{Q}_e$ هي معدل التبريد بالمبخر. كذلك تحسب قدرة الانضغاط في نظام التبريد المبين بشكل ٨،٤ كما يلي (بفرض انضغاط ايزنتروبي):

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) + (\dot{m} + \Delta \dot{m})(h_4 - h_3) \quad (8.12)$$

ويوضح المثال التالي كيفية الحسابات المصاحبة لهذا النوع من نظم التبريد.

مثال ٨،٢

في شكل ٨،٤ كانت درجة حرارة المكثف هي 50°م ودرجة حرارة المبخر هي -40°م ، وكانت درجة حرارة التشبع المناظرة للضغط البيني هي 0°م ، باستخدام مبرد ٢٢، أحسب الآتي بفرض ١ كيلووات تبريد في المبخر:



شكل ٨،٤ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبرداً بينياً مغلقاً (مقتصد).

(أ) أقصى درجة حرارة في نظام التبريد.

(ب) معامل أداء نظام التبريد.

(ج) معامل طرد الحرارة، أي الحرارة المطرودة بالمكثف لكل ١ كيلوات تبريد بالمبخر.

افرض حالة التشبع للحالات ١ و ٣ و ٥، وافرض أن الانضغاط ايزنتروبي في مرحلتي الضاغط. أيضاً افرض أن درجة الحرارة عند الحالة ٧ تزيد عن درجة الحرارة عند الحالة ٣ بمقدار ١٠ درجات مئوية.

الحل

باستخدام برنامج Refprop8 من [NIST] لمبرد ٢٢ ، يبين جدول ٨,٣ بعض خواص مبرد ٢٢ عند الحالات المختلفة لنظام التبريد بشكل ٨,٤. أ) أقصى درجة حرارة بالنظام هي ٧٢°م وتحدث عند الحالة ٤.

ب) يعطي الاتزان الحراري للمبخر الآتي:

$$\dot{m} = \frac{1}{(388.1-212.1)} = 0.00568 \text{ kg/s}$$

ومن الاتزان الحراري للمقتصد (المبرد البيني) نحصل على الآتي:

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{(263.2 - 212.1) + (425.9 - 405)}{(405 - 263.2)} = 0.51$$

ومنها ينتج الآتي:

$$\Delta \dot{m} = 0.002884 \text{ kg/s}$$

بحسب معامل أداء النظام عندئذ كما يلي:

$$\begin{aligned} \text{COP} &= \frac{1}{\dot{m}(h_2 - h_1) + (\dot{m} + \Delta \dot{m})(h_4 - h_3)} \\ &= \frac{1}{0.00568(425.9 - 388.1) + (0.00568 + 0.002884)(439.3 - 405)} = 1.97 \end{aligned}$$

وهي بالتأكيد أفضل من القيمة المعطاة بجدول ٨,٢ وقدرها ١,٥٧ لنظام يعمل بمرحلة واحدة.

جدول ٨,٣ خواص مبرد ٢٢ عند الحالات المختلفة بشكل ٨,٤ لمثال ٨,٢.

الحالة	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨
درجة الحرارة، °م	٤٠-	٢٩	صفر	٧٢	٥٠	صفر	١٠	٤٠-
الضغط، كيلوبيسكال	١٠٥,٢	٤٩٨	٤٩٨	١٩٤٢,٧	١٩٤٢,٧	٤٩٨	١٩٤٢,٧	١٠٥,٢
الإنثالبي، كيلوجول/كجم	٣٨٨,١	٤٢٥,٩	٤٠٥	٤٣٩,٣	٢٦٣,٢	٢٦٣,٢	٢١٢,١	٢١٢,١

(ج) يحسب معامل طرد الحرارة HRF بالمكثف كما يلي

$$\text{HRF} = (\dot{m} + \Delta \dot{m})(h_4 - h_5)$$

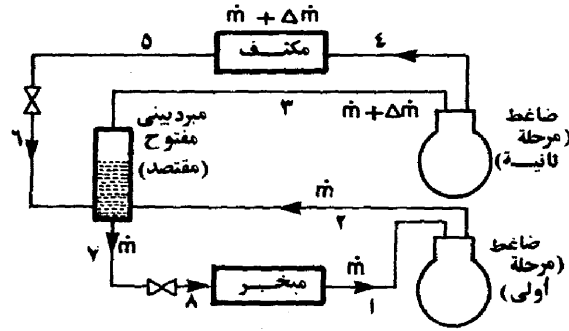
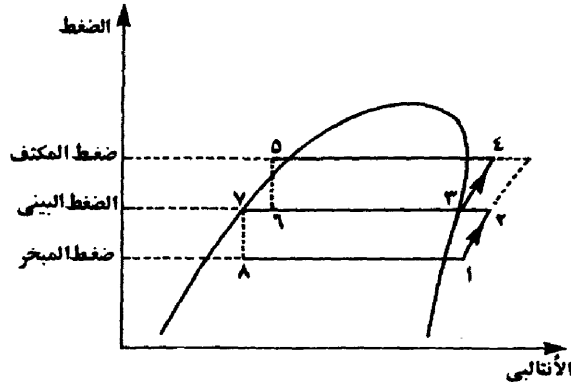
$$= (0.00568 + 0.002884)(439.3 - 263.2) = 1.508 \text{ kW}$$

وهي أيضًا أقل من القيمة المعطاة بجدول ٨,٢ لمرحلة واحدة (أي أقل من ١,٦٢)، مما يعني أن استخدام نظام ثنائي المرحلة بمبرد بيني يقلل الحرارة المطرودة بالمكثف مقارنة بنظام أحادي المرحلة.

٨,٣,٢ المبرد البيني المفتوح

يوضح شكل ٨,٥ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبردًا بينيًا مفتوحًا (مقتصد). وينتج عن استخدام المبرد البيني تبريد بخار المبرد من الحالة ٢ إلى الحالة ٣، بالإضافة إلى تبريد سائل المبرد من الحالة ٥ إلى الحالة ٧ مما يزيد التأثير التبريدي للمبخر. وبالمثل لحالة المبرد البيني المغلق، فإن الاتزان الحراري للمبرد البيني المفتوح يعطى بالعلاقة الآتية:

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{(h_5 - h_7) + (h_2 - h_3)}{(h_3 - h_5)} \quad (8.13)$$



شكل ٨, ٥ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبرداً بينياً مفتوحاً (مقنن).

وهي نفس العلاقة السابقة للمبرد البيني المغلق مع ملاحظة أن التبريد التحتي في حالة المبرد البيني المفتوح يساوي التبريد التحتي للحالة المثالية للمبرد البيني المغلق، أي عندما تساوي T_7 درجة الحرارة T_3 . وبحسب الشغل بمرحلتي الضاغط بنفس المعادلة السابقة لحالة استخدام المبرد البيني المغلق.

ويجب أن يوضع المبرد البيني المفتوح أقرب ما يمكن إلى المبخر مع عزله حرارياً للحد من انتقال الحرارة من الجو المحيط إلى سائل المبرد الساري إلى صمام التمدد، ولخفض فقد الضغط خلال خطوط المبرد الواصلة إلى صمام التمدد، حيث يعمل انتقال الحرارة وفقد الضغط على تبخير جزء من سائل المبرد

قبل الدخول إلى صمام التمدد، مما يؤدي إلى خلل في أداء الصمام وتلفه في بعض الأحيان، كما بينا سابقاً. أما إذا تعذر وضع المبرد البيني المفتوح بالقرب من المبخر، فيلزم عندئذ إيجاد وسيلة لتبريد سائل المبرد تحتياً، مثل استخدام مبادل حراري (كما قدمنا سابقاً) لمنع تبخر سائل المبرد قبل دخول صمام التمدد.

مثال ٨,٣

أعد حل مثال ٨,٢ باستخدام شكل ٨,٥، وبفرض حالة التشبع للحالات ١ و٣ و٥ و٧.

الحل

يعطي جدول ٨,٣ هنا أيضاً خواص مبرد ٢٢ عند الحالات المختلفة بشكل ٨,٥ ماعدا إنثالبي نقطتي ٧ و٨، ودرجة حرارة نقطة ٧. وتعطي إنثالبي نقطتي ٨ و٧ كما يلي:

$$h_7 = h_8 = 200 \text{ kJ/kg}$$

(أ) أقصى درجة حرارة هي ٧٢°م وتحدث عند الحالة ٤.
(ب) بتكرار نفس الخطوات بمثال ٨,٢ ينتج الآتي:

$$\dot{m} = 0.00531 \text{ kg/s}$$

$$\Delta \dot{m} = 0.593 * 0.00531 = 0.00315 \text{ kg/s}$$

$$COP = \frac{1}{0.00531(425.9 - 388.1) + 0.00847(439.3 - 405)} = 2.04$$

أي إن معامل الأداء للنظام قد تحسن باستخدام مبرد بيني مفتوح مقارنة باستخدام مبرد بيني مغلق.

(ج) باتباع نفس خطوات المثال السابق ينتج أن:

$$\text{HRF} = 0.00847(439.3 - 263.2) = 1.49 \text{ kW}$$

ويلاحظ أيضًا انخفاض معدل الحرارة المطرودة من المكثف باستخدام مبرد بيئي مفتوح بدلا من المبرد البيئي المغلق.

٨,٣,٣ مبرد المياه البيئي

تستخدم بعض النظم ثنائية المرحلة (أو متعددة المراحل) أيضًا مبرد مياه بيئي لتبريد بخار المبرد قبل الدخول إلى المبرد البيئي المفتوح أو المغلق، أو قبل الدخول إلى المرحلة التالية مباشرة. ويعمل مبرد المياه على تحسين أداء نظام التبريد نظراً لانخفاض قيمة Δm بالنظام، وبالتالي خفض قدرة الانضغاط بالمرحلة الثانية بالضاغط، مما يؤدي إلى تحسين معامل أداء النظام. ويلزم لاستخدام هذا المبرد أن تزيد درجة حرارة بخار المبرد عند النقطة ٢ عن درجة حرارة مياه التبريد بقدر محسوس، وإن كان هذا الشرط لا يتوفر في أحوال كثيرة، مما يمنع استخدام مبرد المياه البيئي. ويوضح شكل ٨,٦ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبرد مياه بيئي بالإضافة إلى مبرد بيئي مفتوح. ويعطى الاتزان الحراري للمبرد البيئي المفتوح بالعلاقة التالية:

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{(h_5 - h_7) + (h_{2A} - h_3)}{(h_3 - h_5)} \quad (8.14)$$

وتعتمد درجة الحرارة T_{2A} على الفعالية ε لمبرد المياه (المبادل الحراري) المستخدم ودرجة الحرارة T_{wi} لدخول مياه التبريد إلى مبرد المياه. بفرض مبرد مياه بسميات مضادة، كما هو مبين بالشكل، فإن درجة الحرارة T_{2A} تكون:

$$T_{2A} = T_2 - \varepsilon (T_2 - T_{wi}) \quad (8.15)$$

عندئذ تحسب الحرارة المطرودة في مبرد المياه البيئي كما يلي:

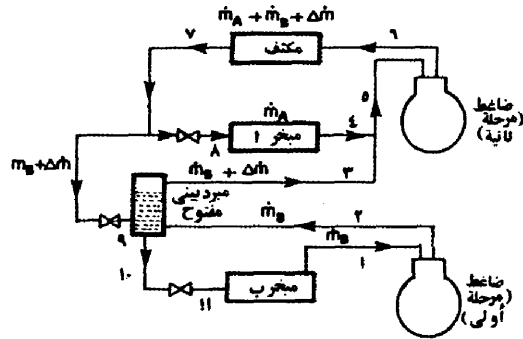
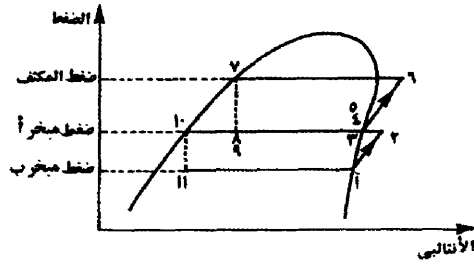
خواص المبرد المستخدم بها. ولقد أورد ثريلكيلد، أيضاً، أن الحد الأدنى لدرجة حرارة المبخر للنظم ثلاثية المرحلة هي -76°م للأمونيا، و -78°م لمبرد ١٢ و -86°م لمبرد ٢٢.

ولا يمكن الأخذ بالتقسيم السابق لتعدد المراحل الذي أوردته ثريلكيلد كحد فاصل في جميع الأحوال، حيث يكون نوع التطبيق المستخدم سبباً مهماً لتحديد عدد المراحل المستخدمة، بدلا من درجة حرارة المبخر، كما بينا سابقاً. فمثلاً، إذا كان هناك نظام به مبخران يعملان عند درجتَي حرارة تزيد أحدهما عن الأخرى بقدر محسوس، فقد يكون من الأفضل اقتصادياً (من حيث تكلفة التشغيل) أن يكون نظام التبريد ثنائي المرحلة، بالرغم من ارتفاع درجة حرارة كل مبخر عن -29°م (وهي الدرجة التي أوردتها ثريلكيلد لاستخدام مرحلتين بدلا من مرحلة واحدة). ويبين شكل ٨،٧ واحداً من هذه النظم.

ولقد أجريت العديد من الأبحاث لدراسة أفضل قيمة للضغط البيئي للنظم متعددة المراحل. ولقد أورد دوسات (Dossat 1981) وآشري (ASHRAE 1990) أن أفضل نسبة للضغط في كل مرحلة من مراحل النظام المستخدم يجب أن تعطى كما يلي:

$$r = \sqrt[3]{P_c / P_e} \quad (8.17)$$

حيث P_c و P_e هما على التوالي ضغط المكثف وضغط المبخر، و i هي عدد المراحل بالنظام أي ٢ أو ٣. إلا أن هذه النسبة لا تكون هي النسبة المستخدمة في بعض النظم لأسباب عملية متعددة. فمثلاً إذا حوى نظام ثنائي المرحلة مبخرين عند درجتَي حرارة مختلفتين، فيفضل عندئذ أن يكون الضغط البيئي مناظراً لضغط المبخر عالي درجة الحرارة، كما هو الحال في شكل ٨،٧.



شكل ٨،٧ نظام تبريد ثنائي المبخر، ثنائي المرحلة يحوي مبرداً بينياً مفتوحاً.

أيضاً، قد تحدد مواصفات ضاغط المرحلة الأولى ذات الضغط المنخفض، بينما تعمل أسطوانة واحدة فقط في المرحلة الثانية ذات الضغط المرتفع، وبفرض نظام تبريد يماثل النظام المبين بشكل ٨،٥ فإن الضغط البيئي الناتج من اتزان تشغيل المرحلة الأولى مع المرحلة الثانية بالضاغط يمكن الحصول عليه من حل المعادلتين اللاخطيتين الآتيتين:

$$\dot{m} = \frac{3}{4v_1} \overline{PD} \eta_{v1} \quad (8.18)$$

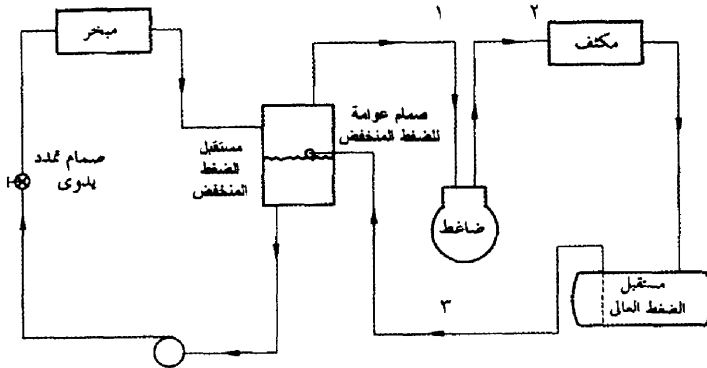
$$\dot{m} + \Delta \dot{m} = \frac{1}{4v_3} \overline{PD} \eta_{v2} \quad (8.19)$$

حيث $\overline{PD}$ هي إزاحة الكباس النظرية للضاغط، و η_{v1} و η_{v2} هما الكفاءة الحجمية للضاغط الترددي بالمرحلة الأولى والمرحلة الثانية على التوالي، و v هي الحجم

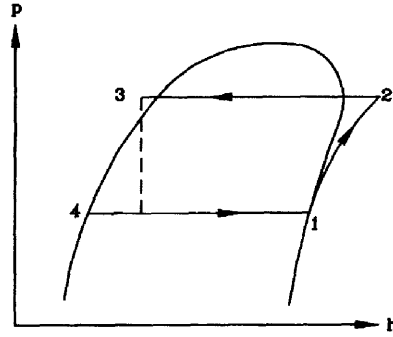
النوعي لبخار المبرد عند الحالة المعنية. ولمزيد من التفاصيل عن حسابات الضاغط الترددي، يمكن للقارئ الرجوع إلى الفصل الثالث عشر من الكتاب الحالي.

٨,٤ نظم التغذية الزائدة للسائل

في هذه النظم يغذى المبخر بسائل المبرد بمعدل يزيد عن معدل التبخير اللازم للحمل الحراري بالمبخر، مما يحسن عملية انتقال الحرارة بدرجة ملحوظة. ويتكون هذا النظام كما هو مبين بشكل ٨,٨ من المكونات الأساسية لدورة التبريد، وهى المكثف والضاغط والمبخر وصمام التمدد، بالإضافة إلى مستقبل لحفظ سائل المبرد عند الضغط العالي (ضغط المكثف)، ومستقبل آخر لحفظ سائل المبرد عند الضغط المنخفض (ضغط المبخر)، ومضخة ميكانيكية لتغذية سائل المبرد إلى المبخر. ويستخدم كما هو موضح بالشكل صمام عوامة للضغط المنخفض لخفض ضغط المبرد من ضغط المكثف بمستقبل الضغط العالي إلى ضغط المبخر بمستقبل الضغط المنخفض. ويوضح شكل ٨,٩ تمثيل العمليات المختلفة لنظام التبريد على خريطة الضغط- الإنثالبي للمبرد.



شكل ٨,٨ نظم تغذية زائدة للسائل باستخدام مضخة ميكانيكية.



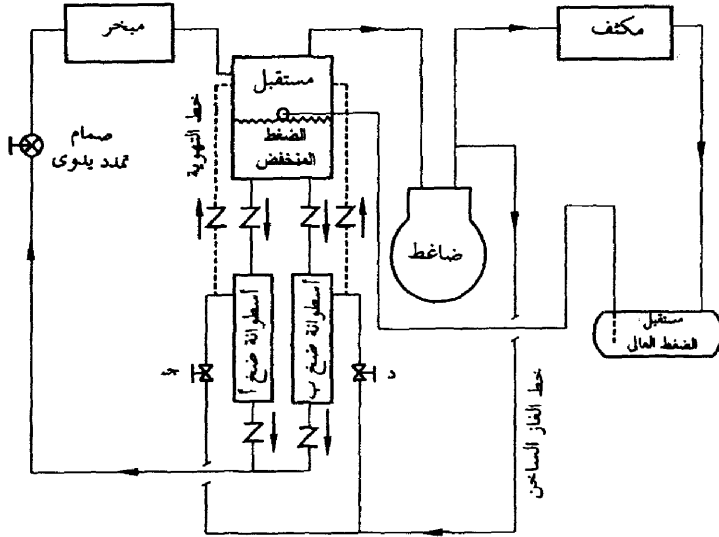
شكل ٨,٩ دورة التبريد لنظام تغذية زائدة للسائل (انظر شكل ٨,٨).

ويمتاز نظام التغذية الزائدة للسائل، بالإضافة إلى تحسين عملية انتقال الحرارة، بميزات أخرى عديدة، منها حماية الضاغط من احتمال دخول سائل إليه، حيث يعمل مستقبل الضغط المنخفض على فصل السائل عن البخار قبل سحب البخار إلى الضاغط (انظر الشكل ٨,٨). أيضًا يعمل النظام الحالي بفرق ضئيل للتحميم، مما يوفر في استهلاك الطاقة في عملية الانضغاط، وكذلك يقلل من درجة حرارة الغاز الساخن الخارج من الضاغط، مما يساعد على اختيار مكثف ذي سطح أصغر نسبيًا مقارنة بالمكثفات التي تعمل بالنظم الأخرى عند نفس الظروف. ويؤدي انخفاض درجة حرارة الغاز الساخن الخارج من الضاغط أيضًا إلى حماية زيت تزييت الضاغط من التحلل. أيضًا، يمتاز النظام الحالي للتغذية الزائدة للسائل بعدم السماح لبخار المبرد الناتج من عملية خفض الضغط من الضغط العالي إلى الضغط المنخفض، من دخول المبخر، حيث يعمل هذا البخار على خفض معدل انتقال الحرارة بالمبخر إذا دخل إليه. ومن المميزات الأخرى، أن تنذب درجة حرارة الجو المحيط لا يؤثر على معدل التبريد الذي يعطيه المبخر خلافًا لما هي عليه العادة في النظم الأخرى.

أما أهم عيوب نظام التغذية الزائدة فهي احتياجه إلى شحنة كبيرة من المبرد مقارنة بالنظم الأخرى، هذا بالطبع بالإضافة إلى ارتفاع التكلفة الأولية اللازمة لشراء المضخة وتركيبها وصيانتها، وكذلك التكلفة الإضافية نتيجة تركيب خطوط السائل بين المبخر ومستقبل الضغط المنخفض، وتكلفة عزل هذه الخطوط.

وتلزم الإشارة هنا أن اقتصاديات نظم التبريد بالتغذية الزائدة للسائل تكون أفضل من اقتصاديات نظم التبريد الأخرى في حالة النظم الكبيرة، أي النظم ذات الأحمال الكبيرة للتبريد. بينما يكون العكس صحيحاً، أي تقل اقتصاديات نظم التبريد بالتغذية الزائدة للسائل عن اقتصاديات النظم الأخرى في حالة النظم الصغيرة.

ويمكن الاستعاضة عن المضخة الميكانيكية لتغذية المبخر بسائل المبرد باستخدام ضخ الغاز، وفي هذا النظام يستخدم الغاز الساخن المضغوط بالضاغط لهذا الغرض. فكما هو مبين بشكل ٨،١٠، يضم النظام أسطوانتين للضخ، أحدهما "أ" والأخرى "ب". بفتح الصمام "ج" يتجه الغاز الساخن القادم من الضاغط إلى الأسطوانة "أ"، ثم يعمل هذا الغاز على ضخ سائل المبرد بالأسطوانة "أ" إلى المبخر، في هذه الأثناء تملئ الأسطوانة "ب" بالسائل من مستقبل الضغط المنخفض ويتجه البخار الموجود بالأسطوانة إلى مستقبل الضغط المنخفض خلال خط التهوية. عندما يتم إفراغ الأسطوانة "أ" من السائل، يقل الصمام "ج" ويفتح الصمام "د" تلقائياً، فيتجه الغاز الساخن إلى الأسطوانة "ب" لضخ السائل بها إلى المبخر، بينما تملئ الأسطوانة "أ" بسائل المبرد من مستقبل الضغط المنخفض، وهكذا.



شكل ٨،١٠ نظام تغذية زائدة للسائل باستخدام ضغ الغاز.

٨،٤،١ حساب معدل دوران السائل

يعرف معدل دوران السائل R في منظم التغذية الزائدة بأنه نسبة معدل سريان كتلة سائل المبرد للمبخر $\dot{m}_l$ ، إلى معدل المبرد الذي يتم تبخيره في المبخر $\dot{m}_v$ ، أي أن:

$$R = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_v} = \frac{\dot{m}_l h_{fg}}{\dot{Q}_l} \quad (8.20)$$

حيث $\dot{Q}_l$ هي حمل التبريد في المبخر و h_{fg} هي الحرارة الكامنة للتبخير عند درجة حرارة المبخر. ويلاحظ أنه توجد قيمة مثلى لمعدل الدوران R . وتعتمد هذه القيمة على درجة حرارة المبخر وحمل التبريد به وظروف التشغيل بالمبخر. فإذا زاد معدل الدوران R عن القيمة المثلى له زادت تكلفة ضغ سائل المبرد دون فائدة حقيقية في تحسين قيمة معامل انتقال الحرارة. أما إذا قلت

قيمة R عن هذه القيمة المثلى، قل معامل انتقال الحرارة بين المبرد داخل المبخر والحمل الحراري له. ويبين جدول ٨،٤ القيمة الموصى بها لمعدل الدوران R للأمونيا (مبرد ٧١٧) ولمبرد ٥٠٢ ولمبرد ٢٢. وتحسب قيمة h_{fg} من جداول التشبع للمبرد المستخدم (انظر ملحق أ)، وعليه يحسب معدل سريان سائل المبرد إلى المبخر كما يلي:

$$\dot{m}_l = \frac{\dot{Q}_l}{h_{fg}} R \quad (8.21)$$

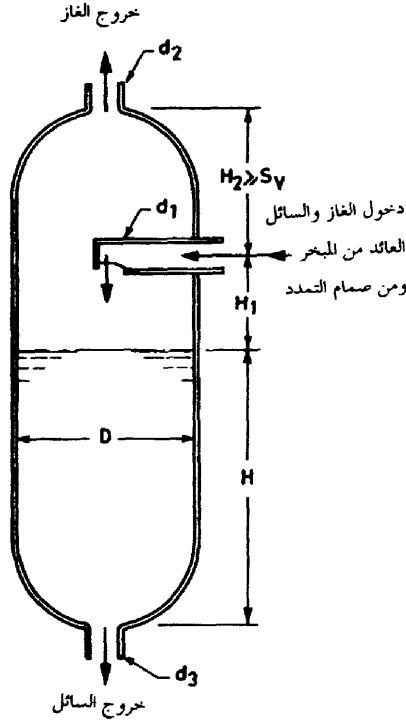
جدول ٨،٤ القيمة الموصى بها لمعدل دوران السائل (ASHRAE 1994).

المبرد	الحد الأدنى لمعدل دوران السائل
أمونيا (مبرد ٧١٧): تغذية رأسية لأسفل	٦ إلى ٧
أمونيا (مبرد ٧١٧): تغذية رأسية لأعلى	٢ إلى ٤
مبرد ٥٠٢ - تغذية رأسية لأعلى	٢
مبرد ٢٢ تغذية رأسية لأعلى	٣

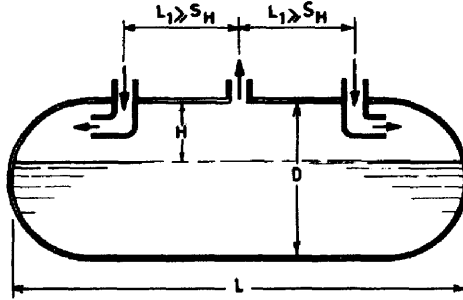
٨،٤،٢ تصميم مستقبل السائل للضغط المنخفض

كما بينا بشكل ٨،٨ تعمل نظم التغذية الزائدة للسائل بمستقبل للسائل عند الضغط المنخفض. ويستخدم هذا المستقبل لتخزين سائل المبرد، وكذلك لفصل بخار المبرد عن السائل قبل تغذيته إلى المبخر. ويجب أن تكفي سعة هذا المستقبل لحفظ الحجم اللازم من سائل المبرد، واستيعاب أي زيادة في حجم هذا السائل نتيجة تذبذب حمل التبريد أثناء التشغيل، بالإضافة إلى زيادة هذا الحجم نتيجة الرغاوي المصاحبة لعملية التبخير بسبب التمدد الفجائي لخفض الضغط ودرجة الحرارة عند دخول المبرد إلى المستقبل خلال صمام التمدد.

يُصمم المستقبل بشكل رأسي أو شكل أفقي كما هو مبين بشكلي ٨,١١ و ٨,١٢. ويُفضل بين الشكلين - الرأسي والأفقي - تبعاً للحيز المتاح للمستقبل في موقع التثبيت. ويعتمد تصميم المستقبل الرأسي أو الأفقي على مدة الوقت الذي يقضيه بخار المبرد في المستقبل وهو ما يعرف بـ زمن البقاء. فكلما زاد زمن البقاء لبخار المبرد داخل المستقبل، كلما تمكن السائل المصاحب له بالانفصال والترسب في قاع المستقبل. وبالمثل، كلما قل هذا الزمن كلما زاد مقدار السائل المسحوب (المحمول) بالبخار إلى خارج المستقبل.



شكل ٨,١١ رسم تخطيطي لمستقبل رأسي لفصل الغاز والسائل [ASHRAE 1989].



شكل ٨،١٢ رسم تخطيطي لمستقبل أفقي لفصل السائل [ASHRAE 1989].

يعتمد زمن البقاء لبخار المبرد في المستقبل الرأسي على سرعة البخار u داخل المستقبل، والمسافة الرأسية لفصل البخار S_v بين نقطة دخول البخار إلى المستقبل ونقطة خروجه منه. وللحصول على زمن بقاء مناسب تأخذ المسافة S_v تبعاً لقيمة u . فكلما قلت u صغرت قيمة S_v والعكس بالعكس. ويعطي جدول ٨،٥ الحد الأقصى لسرعة البخار u لعدة مبردات لقيم مختلفة للمسافة الرأسية S_v ، عند درجات حرارة مختلفة بالمستقبل الرأسي.

باختيار قيمة السرعة u والمسافة S_v من الجدول، يمكن تحديد الأبعاد المختلفة للمستقبل الرأسي المعطى بشكل ٨،١١ [ASHRAE 1994]. فتعطي المسافة H_1 (مم) كما يلي:

$$H_1 = \sqrt{51\dot{V}/u} \quad (8.22)$$

حيث u بالمتري/ث و $\dot{V}$ هي أقصى معدل لسريان البخار إلى المستقبل (لتر/ث). ويقدر قطر المستقبل D (مم) كما يلي:

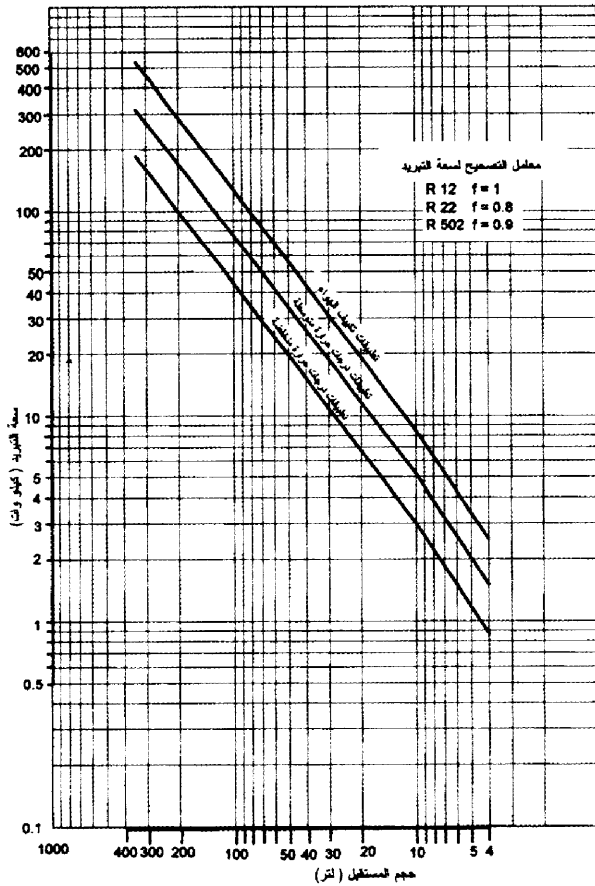
$$D = \sqrt{1270\dot{V}/u} \quad (8.23)$$

حيث u و V بنفس الوحدات المعطاة عاليه. وتقدر قيمة الارتفاع H تبعاً للحد الأقصى لشحنة المبرد المتوقع وجودها بالمستقبل في أي وقت أثناء التشغيل أو الإيقاف. وتأخذ النسبة L/D (حيث L هي الطول الكلي للمستقبل) عادة بين ١ إلى ١٠، وإن كان يفضل أن تكون من ٣ إلى ٥ لأسباب اقتصادية.

جدول ٨،٥ الحد الأقصى لسرعة البخار عند حالة الاستقرار لضمان عدم حمل سائل المبرد مع البخار الخارج من المستقبل، عند قيمة مختلفة للمسافة الرأسية S_v .

[ASHRAE 1994]

درجة حرارة				المسافة الرأسية		السرعة القصوى للبخار، م/ث	
				S_v			
				م	أمونيا	مبرد	مبرد
				م	م	م	م
				٢٥٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٦١٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٩١٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٢٥٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٦١٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٩١٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٢٥٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٦١٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٩١٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٢٥٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٦١٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٩١٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٢٥٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٦١٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٩١٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٢٥٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٦١٠	١٠٠	٢٢	١٢
				٩١٠	١٠٠	٢٢	١٢



شكل ٨،١٣ خريطة اختيار سعة المستقبل بدلالة سعة التبريد لمبردات ١٢، و٢٢، و٥٠٢.

ويصمم المستقبل الأفقي بطريقة مخالفة بعض الشيء لطريقة تصميم المستقبل الرأسى. ويمكن الرجوع إلى آشري (ASHRAE 1994) لهذا الغرض.

ولقد قامت عدة شركات بوضع خرائط لإعطاء حجم المستقبل بدلالة سعة التبريد لنظام التبريد. ويبين شكل ٨,١٣ واحدة من هذه الخرائط وتبين الخريطة العلاقة بين سعة المستقبل وسعة التبريد للنظام المستخدم. وتعتمد هذه العلاقة على

درجة حرارة التطبيق المستخدم، أي إن كانت درجة حرارة مرتفعة (تكييف هواء)، أو درجة حرارة متوسطة أو درجة حرارة منخفضة. ولقد تم إعداد الخريطة لمبرد ١٢، لذا يستخدم عامل التصحيح لسعة المستقبل إذا استخدم مبرد ٢٢ أو مبرد ٥٠٢ بدلاً من مبرد ١٢، كما هو معطى بالخريطة.

مثال ٨،٤

استخدم المعطيات الموجودة في مثال ٢،١ مع فرض ١٠ طن سعة تبريد لحساب سعة المستقبل الرأسي الذي يمكن استخدامه مع هذه المعطيات.

الحل

من حل مثال ٢،١ وباستخدام ١٠ طن تبريد بدلاً من ١ طن تبريد يكون معدل سريان المبرد في النظام كما يلي:

$$\dot{m} = 0.00616 \times 10 = 0.0616 \text{ kg/s}$$

وعليه يكون معدل سريان حجم المبرد من البخار إلى المستقبل هو:

$$\dot{V} = 0.0616 \times 0.0774 \times 1000 = 4.8 \text{ lit/s}$$

وبفرض استخدام مستقبل رأسي له S_v تساوى ٢٥٠ مم، ومع استخدام جدول ٨،٥ عند درجة حرارة مبخر قدرها -١٥°م نجد أن:

$$u = 0.12 \text{ m/s}$$

وباستخدام معادلة (8.22) نجد أن:

$$H_1 = \sqrt{51 \times 4.8 / 0.12} = 45 \text{ mm} = 0.045 \text{ m}$$

وباستخدام معادلة (8.23) نجد أن:

$$D = \sqrt{1270 \times 4.8 / 0.12} = 225 \text{ mm} = 0.225 \text{ m}$$

وحيث إن H_2 يجب أن تكون أكبر من S_v ، نفرض قيمة H_2 تساوى ٠,٣ متر. ومن جداول خواص مبرد ٢٢ نجد أن كثافة سائل مبرد ٢٢ عند الخروج من المكثف تساوى ١١٧٠,٧ كجم/متر^٣، وبفرض النسبة L/D حوالي ٤ عندئذ يقدر الارتفاع الكلي للمستقبل كما يلي:

$$L = 4 \times 0.225 = 0.9$$

ويقدر الحجم الكلي للمستقبل الرأسى كما يلي:

$$V_R = \frac{\pi}{4} D^2 \times L = \frac{\pi}{4} (0.225)^2 \times 0.9 = 0.036 \text{ m}^3 = 36 \text{ lit}$$

وعلى يقدر الارتفاع H كما يلي:

$$H = 0.9 - 0.3 - 0.045 = 0.555 \text{ m} = 555 \text{ mm}$$

وباستخدام شكل ٨,١٣ نجد أن حجم المستقبل المقترح عند سعة تبريد قدرها ٣٥ كيلووات ودرجة حرارة متوسطة بالمبخر هو:

$$V_R = 50 \times 0.8 = 40 \text{ lit}$$

وهى قريبة من القيمة التى حصلنا عليها عاليه، حيث تم أخذ معامل التصحيح ٠,٨ لمبرد ٢٢.

الرموز ومعانيها للفصل الثامن

COP	معامل أداء دورة التبريد [-]
C_{pl}	الحرارة النوعية لسائل المبرد [كجول/كجم.°م]
C_{pv}	الحرارة النوعية لبخار المبرد [كجول/كجم.°م]
d	القطر [م]
D	القطر الداخلي لمستقبل رأسي [م]
h	الإنثالبي [كجول/كجم]
H	ارتفاع سائل المبرد في المستقبل [م]
H_I	المسافة بين مستوى سائل المبرد ودخول المبرد إلى المستقبل [م]
HRF	معامل طرد الحرارة من المكثف []
L	الطول الكلي للمستقبل [م]
$\dot{m}$	معدل سريان الكتلة [كجم/ث]
PD	إزاحة الكباس [م ^٣ /ث]
$\dot{Q}_c$	معدل انتقال الحرارة من المكثف [وات]
r	نسبة الضغط بين مرحلتين [-]
R	معدل دوران السائل [-]
S_v	المسافة الرأسية لفصل البخار [م]
T_{wi}	درجة حرارة الماء الداخل [°م]
u	السرعة [م/ث]
$\dot{V}$	معدل السريان الحجمي [م ^٣ /كجم]
$\dot{W}_c$	قدرة المضاعط [كيلو وات]

التنزيل

fg	تحول طور المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية أو العكس
l	سائل
v	بخار، الحجم النوعي [م ^٣ /كجم]

الحروف الإغريقية

ε	فعالية المبادل الحراري [-]
η_r	الكفاءة النسبية لدورة التبريد [-]
η_v	الكفاءة الحجمية للضاغط [-]

الفصل التاسع

تصميم أنابيب ومواسير المبرد

٩,١ مقدمة

تعمل مخازن التبريد في معظم الأحوال بنظم تبريد لها مكونات منفصلة تتصل ببعضها البعض بأنابيب أو مواسير لنقل المبرد بين هذه المكونات. ويهدف الفصل الحالي إلى تقديم الاعتبارات الهندسية والاقتصادية لتصميم مسار هذه الخطوط وتحديد أقطارها، لضمان عمل نظام التبريد بصورة مرضية. ويلزم التنويه هنا إلى أن عدم العناية بتصميم هذه الخطوط قد يؤدي إلى تلف بعض المعدات مثل الضواغط، أو إلى عدم استقرار الأداء لنظم التبريد.

٩,٢ أساسيات فقد الضغط في خطوط المبردات

يلزم عند تصميم خطوط المبردات حساب فقد الضغط في هذه الخطوط. وبالرجوع إلى أساسيات علم ميكانيكا الموائع والفصل الرابع من الكتاب الحالي نجد أن فقد الضغط في مواسير وأنابيب المبرد هو نتيجة جزئيين رئيسيين هما: الفقد الرئيسي للضغط $\Delta P'$ ، والفقد الثانوي للضغط $\Delta P''$. ويكون الفقد الكلي للضغط ΔP هو مجموع هذين الجزئيين، أي إن:

$$\Delta P = \Delta P' + \Delta P'' \quad (9.1)$$

ويعرف الفقد الرئيسي للضغط بأنه فقد الضغط في مسار مستقيم ثابت مساحة المقطع، أما الفقد الثانوي للضغط فهو الفقد في الضغط لأي جزء في مسار خطوط المبرد خلاف الفقد الرئيسي، مثل فقد الضغط الناشئ عن تغير مساحة المقطع، أو فقد الضغط في الوصلات المختلفة كالأكواع والتفريعات والمحابس، وغيرها. ويمكن إيجاد الفقد في الضغط الرئيسي والثانوي باستخدام المعادلتين الاتيتين:

$$\Delta P' = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (9.2)$$

$$\Delta P'' = K \cdot \rho \frac{V^2}{2} \quad (9.3)$$

حيث تم تعريف الرموز السابقة في الفصل الرابع.

يعرف الفقد الثانوي للضغط في خطوط المبرد بأنه فقد الضغط نتيجة مرور المبرد في ماسورة أو أنبوبة غير ثابتة مساحة المقطع، أو غير مستقيمة، أو في الوصلات المختلفة كالأكواع والمحابس وغيرها. ويلزم الإشارة هنا إلى أن الفقد الثانوي للضغط قد يزيد في بعض الحالات عن الفقد الرئيسي للضغط. وينتج الفقد الثانوي للضغط عادة نتيجة انفصال سريان المبرد عن سطح ماسورة التبريد أو عن سطح الوصلة الموجودة بالماسورة، وأيضاً كنتيجة للدوامات التي قد توجد في السريان، بالإضافة إلى احتكاك السريان مع أي سطح صلب. ويمكن أيضاً حساب الفقد الثانوي باستخدام علاقة مشابهة لعلاقة الفقد الرئيس في الضغط كالآتي:

$$\Delta P'' = f \cdot \frac{L''}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (9.4)$$

حيث تم استخدام طول مكافئ L'' لماسورة مستقيمة لها مساحة المقطع ثابتة وفقد ضغط مساو للفقد الثانوي للضغط. ويبين جدول ٩،١ قيم الطول المكافئ L'' لعدة محابس ووصلات لخطوط مبرد بأقطار مختلفة. وباستخدام المعادلتين (9.2) و (9.4)، يحسب فقد الضغط الكلي:

$$\Delta P = f \frac{L_e}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (9.5)$$

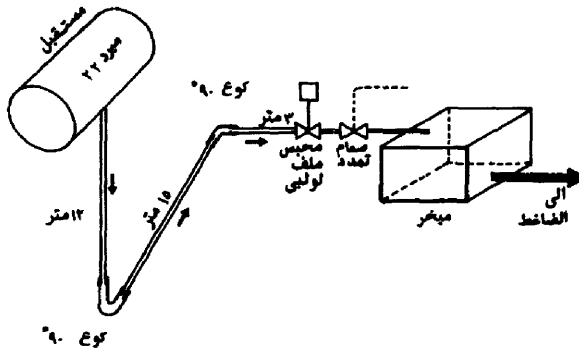
حيث الطول المكافئ L_e هو مجموع الطولين L و L'' .

جدول ٩,١ الطول المكافئ لفقد الضغط في بعض المحابس والوصلات المستخدمة في خطوط المبردات [Pita, 1984, ASHRAE 1990].

الطول المكافئ							القطر الاسمي
محبس	محبس	تقريعة	تقريعة	كوع	كوع ٤٥	كوع ٩٠	للماسورة أو الأنبوب مم
بوابي	كروي أو صمام ذو ملف لوبي	الخط الرئيسي	الخط الفرعي	١٨٠ (قياسي)	(قياسي)	(قياسي)	
٠,٢	٥,٢	٠,٣	٠,٨	٠,٧	٠,٢	٠,٤	١٠
٠,٢	٥,٥	٠,٣	٠,٩	٠,٨	٠,٢	٠,٥	١٥
٠,٣	٦,٧	٠,٤	١,٢	١,٠	٠,٣	٠,٦	٢٠
٠,٣	٨,٨	٠,٥	١,٥	١,٢	٠,٤	٠,٨	٢٥
٠,٥	١٢	٠,٧	٢,١	١,٧	٠,٥	١,٠	٣٢
٠,٥	١٣	٠,٨	٢,٤	١,٩	٠,٦	١,٢	٤٠
٠,٧٣	١٧	١,٠	٣,٠	٢,٥	٠,٨	١,٥	٥٠
٠,٩	٢١	١,٢	٣,٧	٣,٠	١,٠	١,٨	٦٥
١,٠	٢٦	١,٥	٤,٦	٣,٧	١,٢	٢,٣	٨٠
١,٢	٣٠	٢,٠	٥,٥	٤,٦	١,٤	٢,٧	٩٠
١,٤	٣٧	٢,٥	٦,٤	٥,٢	١,٦	٣,٠	١٠٠
١,٨	٤٣	٣,٠	٧,٦	٦,٤	٢,٠	٤,٠	١٢٥
٢,١	٥٢	٤,٠	٧,٦	٧,٦	٢,٤	٤,٩	١٥٠
٢,٧	٦٢		١٠,٠	١٠,٠	٣,٠	٦,١	٢٠٠

مثال ٩,١

احسب فقد الضغط في خط مبرد ٢٢ الواصل بين المستقبل وصمام التمدد لجزء نظام التبريد الموضح بشكل ٩,١. افرض درجة حرارة تشبع بالمكثف قدرها 40°C ودرجة حرارة تشبع بالمبخر قدرها -10°C ، وأن سعة التبريد بالمبخر هي ١٠٠ كيلووات، وأن خط المبرد يستخدم أنابيب نحاس بقطر داخلي قدره ٢٦ مم.



شكل ٩,١ رسم تخطيطي لمثال ٩,١.

الحل

يعمل خط المبرد عند ضغط يساوي ضغط المكثف (أي ضغط مناظر لدرجة حرارة تشبع قدرها ٤٠°م). من ملحق "أ" نجد الآتي:

- إنثالبي السائل المشبع عند الخروج من المكثف = ٢٤٩,٦٥ كيلوجول/كجم
- إنثالبي البخار المشبع عند الخروج من المبخر = ٤٠١,٢ كيلوجول/كجم
- كثافة السائل المشبع عند الخروج من المكثف = ١١٢٨,٥ كجم/م^٣
- لزوجة السائل المشبع عند الخروج من المكثف = ١٣٩,٤ × ١٠^{-٦} باسكال-ث

يقدر معدل السريان خلال خط السائل باستخدام سعة التبريد كما يلي

$$\dot{m} = \frac{100}{401.2 - 249.65} = 0.660 \text{ kg/s}$$

وتقدر سرعة السريان خلال الأنبوب كما يلي:

$$V = \frac{0.660}{\frac{\pi}{4} (0.026)^2 \times 1128.5} = 1.102 \text{ m/s}$$

ويقدر رقم رينولدز كما يلي:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1128.5 \times 1.102 \times 0.026}{136.4 \times 10^{-6}} = 2.32 \times 10^5$$

من جدول ٤,١ نجد أن معامل الخشونة لأنابيب النحاس هو ٠,٠٠١٥ مم، وبالتالي تقدر الخشونة النسبية للأنبوب كما يلي:

$$\varepsilon = \frac{e}{D} = \frac{0.0015}{26} = 5.7 \times 10^{-5}$$

من خريطة مودي بشكل ٤,١ نجد أن $f = ٠,٠١٥$ ، وباستخدام شكل ٩,١ وجدول ٩,١ يقدر الطول المكافئ للخط كما يلي:

$$L_e = L + 2L''_{90^\circ \text{elb}} + L''_{\text{solnoid}}$$

$$= (12+15+3) + 2 \times 0.8 + 8.8 = 40.4 \text{ m}$$

باستخدام معادلة (9.5) يقدر فقط الضغط في خط المبرد عندئذ كما يلي:

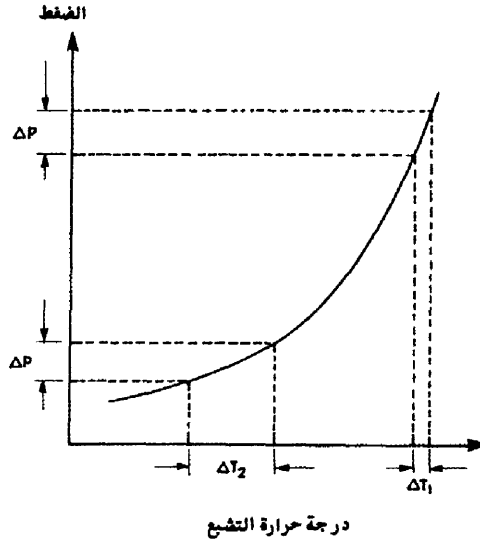
$$\Delta P = 0.015 \times \frac{40.4}{0.026} \times \frac{1}{2} \times 1128.5 \times (1.102)^2 = 15971 \text{ Pa}$$

أي تقريباً ١٦ كيلوبسكال.

٩,٣ التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط

يختلف التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط لمبرد ما تبعاً لضغط المبرد الموجود بالخط، والعلاقة بين الضغط ودرجة حرارة التشبع للمبرد تحت الدراسة. ويوضح شكل ٩,٢ هذه العلاقة لمبرد ما. ويلاحظ من الشكل أن التغير ΔT في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط ΔP يزيد بانخفاض درجة حرارة التشبع (أو الضغط). ومن الشائع في تصميم خطوط

المبردات استخدام تغير درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط بدلاً من فقد الضغط. ولقد أثبتت الخبرة أنه بأخذ ΔT حوالي 1°C أو أقل في جميع خطوط نظم الأمونيا فإن فقد الضغط المناظر يكون تقريباً هو أفضل قيمة للتشغيل الاقتصادي لهذه النظم.



شكل ٩,٢ التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط.

مثال ٩,٢

في المثال السابق، احسب التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط في خط المبرد الواصل بين المستقبل وصمام التمدد.

الحل

من جدول مبرد ٢٢ بملحق أ، نحسب معدل تغير الضغط مع درجة حرارة التشبع المناظرة (أي عند درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط المبرد داخل الخط تحت الدراسة):

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{1609.8 - 1460.10}{42 - 38} = 37.4 \text{ kPa/}^{\circ}\text{C}$$

ويكون التغير في درجة حرارة التثبع المكافئ لفقد الضغط في خط السائل

هو:

$$\Delta T = \Delta P / \left(\frac{\Delta P}{\Delta T} \right)_{40} = 16.0 / 37.4 = 0.43 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

٩,٤ الاعتبارات الهندسية لتصميم مسارات خطوط المبردات

يلزم على مصمم مسار أنابيب ومواسير المبرد مراعاة أن يحقق المسار الشروط العامة الآتية:

(أ) التقليل ما أمكن من فقد الضغط في المسار لتوفير استهلاك الطاقة بالضاغط والحصول على سعة تبريد جيدة. ويتم ذلك باختيار مسارات قصيرة ومستقيمة ما أمكن مع استخدام أقل عدد ممكن من الأكواع والتفريعات.

(ب) دوران زيت تزييت الضاغط في دورة التبريد، وبالتالي عودته إلى الضاغط وعدم ترسيبه في أي جزء من الأنابيب والمواسير.

(ج) تشغيل مترن لدورة التبريد مع المحافظة على سلامة المعدات.

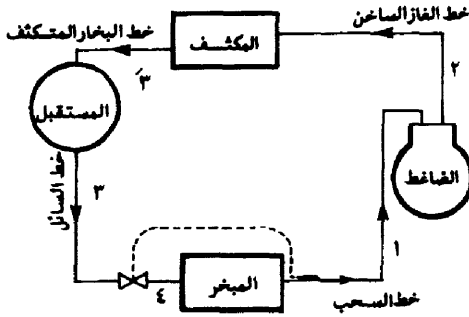
(د) سهولة الصيانة لهذه المسارات عندما تتطلب الظروف إجراء صيانة لها.

(هـ) انخفاض مستوى الضوضاء التي قد تنشأ عن هذه المسارات تحت ظروف تشغيل مختلفة.

وتعتبر الشروط السابقة عامة بالنسبة للنظم التي تستخدم الهالوكربونات أو الأمونيا كمبرد. إلا أن الشرط (ب) يخص نظم التبريد التي تستخدم

الهالوكربونات فقط، حيث لا يخلط زيت التزييت بالأمونيا جيداً، مما يستلزم استخدام فاصل للزيت في خط الغاز الساخن الخارج من الضاغط، وبالرغم من استخدام فواصل الزيت هذه، إلا أن بعض الزيت المحمول بالأمونيا يتم ترسيبه بالفعل في قاع المبخر، مما يستلزم وجود توصيلات خاصة لإرجاعه مرة أخرى إلى الضاغط. كما يجب ملاحظة أن التطبيقات التي تعمل عند درجة حرارة مبخر منخفضة نسبياً (أقل من -28°C) يفصل بها قدر كبير من زيت التزييت في المبخر وتزداد لزوجته بانخفاض درجة الحرارة، مما يصعب معه إرجاعه إلى خط السحب ثم حمله إلى الضاغط، عندئذ ينصح بتركيب فاصل زيت بعد الضاغط.

تتقسم خطوط المبرد تبعاً لحالة المبرد داخل هذه الخطوط كما هو مبين بشكل ٩،٣ إلى الآتي:



شكل ٩،٣ رسم تخطيطي لدورة التبريد مع توضيح خطوط المبرد المختلفة.

(أ) خط السائل، وهو الخط الحامل لسائل المبرد إلى صمام التمدد. ويبدأ هذا الخط عادة من المكثف، إلا إذا كان هناك مستقبل فيبدأ الخط من المستقبل.

(ب) خط السحب، وهو الخط الواصل بين المبخر والضاغط، ويحمل هذا الخط بخار المبرد المخلوط بنسبة من زيت التزييت العائد للضاغط.

(ج) خط الغاز الساخن الواصل بين الضاغط والمكثف، ويحمل هذا الخط غاز المبرد الساخن المخلوط بنسبة من زيت التزييت الهارب من الضاغط.

(د) خط البخار المكثف، وهو الخط الواصل بين المكثف والمستقبل. ويلغى هذا الخط في حالة عدم وجود مستقبل.

ويراعى عند تصميم مسارات هذه الخطوط عموماً ألا يوضع أي منها على الأرضية مباشرة، وإنما يجب أن تعلق على الحوائط والأسقف، وأن تكون المسارات مستقيمة ما أمكن وفي أماكن لا تعيق صيانة أجهزة ومعدات التبريد. وتعلق خطوط المبرد الموجودة على الحوائط بحوامل جانبية على ألا تزيد المسافة بين كل حاملين عن ٣ أمتار، أما الخطوط الموجودة بالسقف فتعلق بحمالات على مسافات لا تزيد أيضاً عن ٣ أمتار. وتدعم الخطوط الرأسية من أعلى أو من أسفل على حد سواء. ويجب أن يؤخذ في الاعتبار التمدد الحراري لهذه الخطوط، وهو يقدر عادة بحوالي ٢٠ مم لكل ٣٠ متراً. ويراعى هذا التمدد في تصميم خطوط المبرد بالألا يثبت أي خط أفقي من طرفيه، وإنما يكفى التثبيت من طرف واحد فقط مع ترك الطرف الآخر حر الحركة. ونظراً لطبيعة خطوط المبرد التي تحوي دائماً خطوط رأسية وكذا مصائد لتجميع السائل، فإن شكل الخطوط تأخذ عادة حروف L و Z و U في أماكن كثيرة منها، مما يساعد ضمان عدم التعرض لأي مشكلة ناجمة عن التمدد الحراري لهذه الخطوط.

وفيما يلي سنعرض الاعتبارات الهندسية الأخرى الخاصة بتصميم مسارات خطوط المبرد المختلفة كل على حده مع طريقة حساب أقطار هذه الخطوط.

٩,٥ جداول حساب أقطار خطوط المبرد

ببنا في الأجزاء السابقة الاعتبارات الهندسية لتصميم مسار خطوط المبرد المختلفة، كما أن إجمالي فقد الضغط في أي خط نتيجة فقد الضغط الرئيسي أو الثانوي لسريان المبرد (سائل أو بخار) يعطى بالمعادلة (9.5). كما ببنا أيضًا أن كل خط من خطوط المبرد يصمم أساسًا على حد السماح الأمثل لفقد الضغط ΔP خلال الخط، بالإضافة إلى الاعتبارات الهندسية الأخرى. وبناء على ذلك، إذا عرفت ΔP للخط والطول الكلي المكافئ L_e له، وكذلك سرعة المبرد بالخط V ، يمكن حساب القطر الداخلي للخط من المعادلة (9.5). ويتطلب هذا الحساب استخدام أحد طرق المحاولة والخطأ، حيث إن معامل الاحتكاك f يعتمد على القطر وسرعة سريان المبرد وخشونة سطح مادة الأنابيب أو المواسير المستخدمة إن كان السريان مضطربًا، كما ببنا في الجزء ٩,٢. ويتضح أن حساب القطر الداخلي لكل خط من خطوط المبرد عملية صعبة حسابيًا ومملة.

لتسهيل حساب قطر خط المبرد، دعنا نفكر بطريقة أخرى. بفرض حد السماح لفقد الضغط لوحدة أطوال قياسية، يمكن عندئذ تصميم جداول باستخدام الطريقة الموضحة عاليه للعلاقة بين m (أي V) و D حيث يمثل D قطر الخط لأنبوب أو ماسورة قياسية، و m هي معدل سريان الكتلة بالخط الذي يحقق حد السماح لفقد الضغط في الوحدة القياسية للأطوال. ويمكن استبدال معدل السريان m بسعة التبريد بفرض دائرة تبريد بسيطة بدلالة درجة حرارة التشبع للمكثف والمبخر. وتعتبر هذه هي الفكرة الأساسية لجداول حساب أقطار خطوط المبرد والمعدة من قبل الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء [ASHRAE]، وكذلك من قبل بعض الشركات الصناعية العاملة في هذا المجال. ويبين الجدول ٩,٢ قيم سعة التبريد لمبرد ٢٢ باستخدام أنابيب نحاسية ومواسير صلب بالمقاسات الاسمية المبينة بالجدول. ولقد صمم الجدول بفرض أن حد

السماح لفقد الضغط يناظر تغير درجة حرارة تشبع قدره ٠,٠٤ درجة مئوية لكل متر طولي من خط السحب و ٠,٠٢ درجة مئوية لكل متر من خط الغاز الساخن وخط السائل. ويعطي الجدول البيانات الآتية: سعة التبريد لخط السحب وخط الغاز الساخن عند درجات حرارة تشبع مختلفة بخط السحب. كما يبين الجدول أيضاً سعة التبريد المناظرة إذا اختير خط السائل وخط البخار المتكثف بالأقطار المبينة بالجدول. وذلك لنظام مرحلة وسطى أو مرحلة منخفضة.

ويبين جدول ٩,٣ نفس المعلومات السابقة لمبرد ٢٢ لنظام بمرحلة واحدة أو مرحلة عليا. وأخيراً يعطي جدول ٩,٤ نفس المعلومات عند استخدام الأمونيا كمبرد. ويجب ملاحظة الآتي عند استخدام الجداول ٩,٢ و ٩,٣ و ٩,٤:

(أ) إذا اختلف طول الخط عن الطول القياسي بالجدول (متر واحد) واختلف التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط عند القيمة المعطاة بالجدول، فإن سعة التبريد المعطاة يجب تصحيحها بالعلاقة التالية:

$$\dot{Z} = \dot{Z}_i (1/L_e)^{0.55} \left(\frac{\Delta T_i}{\Delta T} \right)^{0.55} \quad (9.6)$$

حيث $\dot{Z}_i$ و $\dot{Z}$ هما قيمتا سعة التبريد بالجدول والفعالية على التوالي (كيلووات)، و L_e هي الطول المكافئ الفعلي (متر) لخط المبرد، و ΔT_i و ΔT هما التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط من الجدول والفعالي على التوالي ($^\circ\text{م/متر}$).

(ب) إذا استخدمت الخطوط لسعات تبريد فعلية $\dot{Z}$ تختلف عن تلك المعطاة بالجدول $\dot{Z}_i$ ، فإن تغير درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط المعطى بالجدول يجب تصحيحه كما يلي:

$$\Delta T = \Delta T_i L_e \left(\frac{\dot{Z}}{\dot{Z}_i} \right)^{1.8} \quad (9.7)$$

حيث الرموز لها نفس التعريفات والوحدات المعطاة سابقاً.

ج) تعطي الجداول قيمة سعة التبريد لدرجة حرارة تشبع قياسية بالمكثف (٤٠ أو ٣٠ أو -١٥°م) فإذا اختلفت درجة حرارة المكثف عن هذه الدرجة القياسية للجدول، وجب تصحيح سعة التبريد بالجدول كما يلي:

$$\dot{Z} = F \dot{Z}_i \quad (9.8)$$

حيث F هي معامل التصحيح. وتعطى قيم F أسفل كل جدول. وستوضح الأمثلة في الأجزاء التالية كيفية استخدام هذه الجداول.

٩,٦ تصميم مسار خط السائل

يراعى عند تصميم خط السائل الممتد من المستقبل إلى دخول محبس التمدد عدم وجود أي عوائق للسريان، وأن يكون الخط مستقيماً ما أمكن، وألا يزيد الفقد في الضغط عن حد السماح. ويعرف حد السماح لفقد خط السائل بأنه فقد الضغط الذي يؤدي إلى تبخر جزء من السائل. ومن أهم عيوب هذا التبخر أنه يعوق أداء محبس التمدد ويؤدي إلى انخفاض معدل سريان المبرد إلى المبخر. أضف إلى هذا فإن تبخر جزء من سائل المبرد يزيد حجم سريان سائل المبرد وبخاره المارين بمحبس التمدد مما يعمل على تآكل مقعد الصمام. ويعتبر حد السماح لفقد الضغط هو العامل الوحيد الذي يؤخذ في الاعتبار عند تصميم خط السائل، ولا يوجد هناك أي من الاحتياطات الخاصة بسريان زيت التزييت إلى المبخر لعودته إلى الضاغط نظراً لوجود خليط الزيت والمبرد في الحالة السائلة.

جدول ٩,٢ سعة التبريد بالكيلوات لمبرد ٢٢ (المرحلة الوسطى أو المرحلة المنخفضة)
لخطوط السحب، والغاز الساخن، والسائل* [ASHRAE 1990].

خط السائل	خط الطرد	خط السحب ($\Delta t=0.04$ كلفن/م)					القطر الاسمي (مم)
		٣٠-°م	٤٠-°م	٥٠-°م	٦٠-°م	٧٠-°م	
		الضغط المقابل باسكال/م					
راجع		٢٢٨	١٢١	٨١,٥	٥١,٣	٣١,٠	
جدول ٩,٣		٠,٧٤	٠,٧٣	٠,٤٧	٠,٢٧	٠,٠٩	١٢
		١,٤٣	١,٣٩	٠,٩٠	٠,٥٢	٠,٣١	١٥
		٢,٤٩	٢,٤٣	١,٥٧	٠,٩١	٠,٥٥	١٨
		٤,٤١	٤,٣٠	٢,٧٨	١,٦٢	٠,٩٧	٢٢
		٨,٧٤	٨,٥٢	٥,٥٢	٣,٢٢	١,٩٤	٢٨
		١٦,٠٨	١٥,٦٨	١٠,١٧	٥,٩٥	٣,٦٠	٣٥
		٢٦,٧٣	٢٦,٠٧	١٦,٩٣	٩,٩٢	٦,٠٠	٤٢
		٥٣,٢٨	٥١,٩٨	٣٣,٧٥	١٩,٨٣	١٢,٠٣	٥٤
		٩٥,٠٦	٩٢,٧٦	٦٠,٣٨	٣٥,٤٧	٢١,٥٧	٦٧
		١٧٤,٢٢	١٤٣,٦٩	٩٣,٧٢	٥٥,٢٠	٣٣,٥٤	٧٩
		٣١٦,١٣	٣٠٨,٠٢	٢٠١,٢٠	١١٨,٦٦	٧٢,٣٣	١٠٥
		٥٦١,٨٩	٥٤٨,٦٦	٣٥٨,٥٢	٢١١,٧٠	١٢٩,١٧	١٣٠
		٩١٥,٠٢	٨٩١,٧١	٥٨٣,١٦	٣٤٤,٩٩	٢١٠,٨٣	١٥٦

* القيم في الجدول على أساس درجة حرارة التشبع في المكثف -١٥°م. عند اختلافها عن ذلك تضرب القيمة من الجدول في عامل التصحيح F الآتي بناء على درجة حرارة التشبع في المكثف.

درجة حرارة التشبع في المكثف [°م]	خط السحب	خط الطرد
٣٠-	١,٠٨	٠,٧٤
٢٠-	١,٠٣	٠,٩١
١٠-	٠,٩٨	١,٠٩
٠	٠,٩١	١,٢٩

السحب، والغاز الساخن، والسائل" [ASHRAE 1990].

- القيم في الجدول على أساس درجة حرارة التبخر في المكثف 40°C ، عند اختلافها عن ذلك تضرب القيمة من الجدول في عامل التصحيح F الآتي بناء على درجة حرارة التبخر في المكثف.

خط الطرد	خط السحب	درجة حرارة التشبع في المكثف [م°]
٠,٨٠	١,١٨	٢٠
٠,٨٨	١,١٠	٣٠
١,٠	١,٠	٤٠
١,١١	٠,٩١	٥٠

جدول ٩،٤ سعة التبريد بالكيلوات للأمونيا (مرحلة واحدة أو المرحلة العليا) لخطوط السحب، والغاز الساخن، والسائل* [ASHRAE 1990].

خط السحب ($\Delta t = 0.02$ كلفن/م)					خط الطرد			خط السائل		
حديد صلب	درجة حرارة التشبع للسحب					$\Delta t = 0.02$ كلفن/م			السرعة ١,٥ م/ث	$\Delta p = 450$
						$\Delta p = 684$ بيسكل/م				
قطر الاسمي (مم)	$\Delta p = 0.4$	$\Delta p = 0.3$	$\Delta p = 0.2$	$\Delta p = 0.1$	$\Delta p = 0$	$\Delta p = 0.4$	$\Delta p = 0.2$	$\Delta p = 0$		
١٠	٠,٨	١,٢	١,٩	٣,٥	٤,٩	٨,٠	٨,٣	٨,٥	٣,٩	٦٣,٨
١٥	١,٤	٢,٣	٣,٦	٦,٥	٩,١	١٤,٩	١٥,٣	١٥,٧	٦٣,٢	١١٨,٤
٢٠	٣,٠	٤,٩	٧,٧	١٣,٧	١٩,٣	٣١,٤	٣٢,٣	٣٣,٢	١١٠,٩	٢٥٠,٢
٢٥	٥,٨	٩,٤	١٤,٦	٢٥,٩	٣٦,٤	٥٩,٤	٦١,٠	٦٢,٦	١٧٩,٤	٤٧٣,٤
٣٢	١٢,١	١٩,٦	٣٠,٢	٥٣,٧	٧٥,٤	١٢٢,٧	١٢٦,٠	١٢٩,٤	٣١١,٠	٩٧٨,٠
٤٠	١٨,٢	٢٩,٥	٤٥,٥	٨٠,٦	١١٣,٣	١٨٤,٤	١٨٩,٤	١٩٤,٥	٤٢٣,٤	١٤٦٩,٤
٥٠	٣٥,٤	٥٧,٢	٨٨,١	١٥٥,٧	٢١٨,٦	٣٥٥,٢	٣٦٤,٩	٣٧٤,٧	٦٩٧,٨	٢٨٤٠,٥
٦٥	٥٦,٧	٩١,٦	١٤٥,٦	٢٤٨,٦	٣٤٨,٩	٥٦٥,٩	٥٨١,٤	٥٩٧,٠	٩٩٤,٨	٤٥٢٤,٨
٨٠	١٠١,٠	١٦٢,٤	٢٤٩,٠	٤٣٩,٨	٦١٦,٩	١٠٠١,٩	١٠٢٩,٣	١٠٥٦,٩	١٥٣٦,٣	٨٠٠٨,٨
١٠٠	٢٠٦,٩	٣٣٢,٦	٥٠٩,٢	٨٩٧,٨	١٢٥٨,٦	٢٠٤٢,٢	٢٠٩٨,٢	٢١٥٤,٣	—	—
١٢٥	٣٧٥,٢	٦٠١,٨	٩٠٢,٦	١٦٢٢	٢٢٧١,٤	٣٦٨٢,١	٣٧٨٣	٣٨٨٤,٢	—	—
١٥٠	٦٠٨,٧	٩٧٥,٦	١٤٩١,٤	٢٦٢٥,٤	٣٦٧٢,٥	٥٩٥٤,٦	٦١١٧,٤	٦٢٨١	—	—
٢٠٠	١٢٥٢,٣	٢٠٠٠,٣	٣٠٥٦	٥٣٨٢,٥	٧٥٣٠,٤	١٢١٩٥,٣	١٢٥٢٩,٧	١٢٨٦٨	—	—
٢٥٠	٢٢٧١	٣٦٢٥,٩	٥٥٣٩,٩	٩٧٢٢,٧	١٣٦١٩,٦	٢٢٠٢٨,٢	٢٢٦٢٢,٢	٢٢٦٢٧,٥	—	—
٣٠٠	٣٦٤٠,٥	٥٨١٣,٥	٨٨٧٢,٤	١٥٥٦٨,٩	٢١٧٨٧	٣٥٢٣٩,٧	٣٦٢٠,٦٠	٣٦١٧٤,٣	—	—

يتكون فقد الضغط في أنابيب سائل المبرد من الفرق بين الضغط عند الخروج من المستقبل والضغط عند الدخول لمحبس التمدد، ويكون فقد الضغط الكلي هو حاصل جمع فقد الضغط ΔP_f نتيجة الاحتكاك بين سائل المبرد وجدار الأنابيب أو المواسير والفقد أو الزيادة ΔP_h في الضغط الناتج عن ارتفاع أو انخفاض سائل المبرد عن مستوى الخروج من المستقبل. فتبعًا لمعادلة برنولي لميكانيكا الموائع لاتزان طاقة الوضع مع طاقة السريان الناشئة عن الضغط (عند ثبات طاقة الحركة)، فإن فقد الضغط ΔP_h نتيجة ارتفاع السائل لمسافة h عن مستوى سطح السائل بالمستقبل تعطى بالعلاقة التالية:

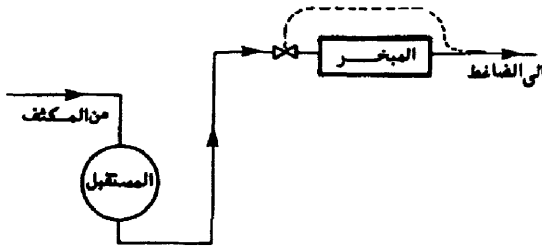
$$\Delta P_h = \rho gh \quad (9.9)$$

حيث ρ هي كثافة سائل المبرد و g هي عجلة الجاذبية الأرضية. وتكون قيمة ΔP_h سالبة (أي ارتفاع قيمة الضغط) إذا كانت قيمة h سالبة أي انخفاض السائل عن مستواه بالمستقبل، وبناء عليه يكون الفقد الكلي ΔP في الضغط لخط السائل هو:

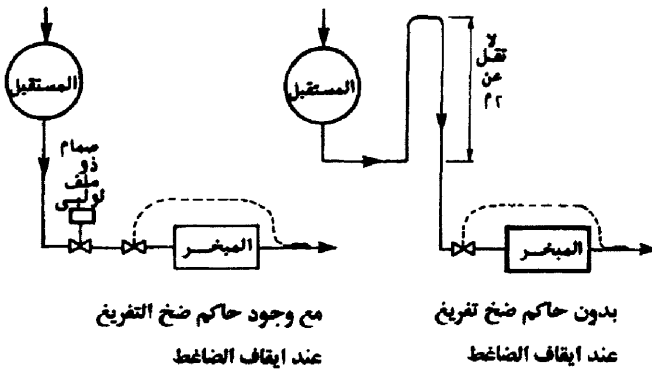
$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_h \quad (9.10)$$

ويعتمد مسار خط السائل بين المستقبل والمبخر على وضع المستقبل بالنسبة للمبخر، وعلى كون النظام يعمل ذاتيًا بنظام ضخ تفريغ عند إيقاف الضاغط أم لا. فإذا كان المستقبل أسفل المبخر، فإن مسار خط السائل لا يحتاج إلى أي اعتبارات هندسية، ويكون المسار كما هو موضح بشكل ٩،٤ (أ). أما إذا كان موقع المستقبل أعلى من المبخر فيصمم مسار خط السائل تبعًا لكون النظام يعمل بتحكم لضخ التفريغ عند التوقف أم لا. ويوضح شكل ٩،٤ (ب) (الرسم الأيسر) مسار خط السائل لهاتين الحالتين، حيث يلاحظ عند وجود تحكم في ضخ التفريغ عند إيقاف الضاغط وضع صمام ملف لولبي قبل دخول سائل

المبرد إلى محبس التمدد، ويقلل هذا الصمام فور وقوف الضاغط، لمنع سريان السائل إلى الضاغط عند بدء التشغيل، مما يتلف الضاغط. أما إذا لم تشمل الدائرة نظام تحكم لضخ التفريغ عند الإيقاف، فيلزم عندئذ أن يأخذ المسار الشكل الموضح بشكل ٩,٤ (ب) (الرسم الأيمن) لمنع سريان سائل المبرد من المستقبل إلى المبخر عند إيقاف الضاغط.



(أ) مستوى قاعدة المبخر أعلى من مستوى سطح السائل في المستقبل



(ب) مستوى قاعدة المبخر تحت مستوى سطح السائل في المستقبل

شكل ٩,٤ مسار خط السائل تبعاً لمستوى قاعدة المبخر بالنسبة لمستوى السائل بالمستقبل.

يحسب قطر خط السائل بمراعاة ألا يزيد فقد الضغط الكلي المعطى بالمعادلة (9.2) خلال الخط عن القيمة التي قد تسبب تبخر جزء من سائل المبرد فجائياً في خط السائل. لذا يلزم حساب تغير درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط الكلي ومقارنته بمقدار درجات التبريد التحتي عند الخروج من المستقبل للتأكد من عدم تبخر جزء من سائل المبرد فجائياً في خط السائل. ولاستخدام معادلة (9.2) لحساب فقد الضغط الكلي، يحسب فقد الضغط الناتج عن الاحتكاك أولاً باستخدام الجداول ٩,٢ إلى ٩,٤، ثم يحسب فقد أو زيادة الضغط الناتج عن تغير طاقة وضع السائل بين المستقبل والمبخر من معادلة (9.9)، وسيوضح المثال التالي كيفية حساب قطر خط السائل.

مثال ٩,٣

في مثال ٩,٢، استخدم الجداول لاختيار أنبوباً من النحاس لخط السائل. ناقش ماذا يحدث إذا كان طول الأنبوب الرأسي الهابط ٢ متراً بدلاً من ١٢ متراً، وكان طول الأنبوب الأفقي ٥٥ متراً بدلاً من ١٥ متراً. افرض في جميع الأحوال خروج السائل من المستقبل عند درجة حرارة قدرها 38°C .

الحل

من جدول ٩,٣ لمبرد ٢٢، باستخدام أنبوباً نحاسياً بقطر اسمي قدره ٢٨ مم، فإن سعة التبريد تكون ١٣١,٠ كيلووات. من جدول ٩,١ نحسب الطول المكافئ كما يلي:

$$L_e = 12 + 15 + 3 + 2 \times 0.8 + 8.8 = 40.4 \text{ m}$$

وباستخدام معادلة ٩,٧ يكون التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط نتيجة الاحتكاك هو:

$$\begin{aligned}(\Delta T_e)_f &= \Delta T_i L_e \left(\frac{\dot{Z}}{\dot{Z}_i} \right)^{1.8} \\ &= 0.02 \times 40.4 \left(\frac{100}{131} \right)^{1.8} = 0.5^\circ \text{C}\end{aligned}$$

مقارنة بالقيمة 0.43°C التي حصلنا عليها في مثال ٩,٢.

ويحسب الفقد/الزيادة في الضغط نتيجة تغير مستوى السائل من معادلة ٩,٩ كما يلي:

$$\Delta P_h = \rho g h = 1128.4 \times 9.81 \times (-12) = -132.8 \text{ kPa}$$

حيث أخذت الكثافة بالقيمة 1128.4 كجم/م^3 من ملحق أ. ويكون معدل تغير الضغط مع درجة حرارة التشبع (عند درجة تشبع قدرها 40°C) كما هو معطى بالمثال ٩,٢.

عندئذ يقدر التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ للقيمة ΔP_h كما يلي:

$$(\Delta T_e) = -132.8 / 37.4 = -3.55^\circ \text{C}$$

ويكون إجمالي التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط هو:

$$\begin{aligned}\Delta T_e &= (\Delta T_e)_f + (\Delta T_e)_h \\ &= 0.5 - 3.55 = -3.05^\circ \text{C}\end{aligned}$$

أي إن درجات التبريد التحتي ستزيد بمقدار 3.05°C . ويعني هذا إمكانية تصغير القطر الاسمي للأنبوب توفيراً للتكلفة الأولية لخط السائل دون خشية الإقلال من درجات التبريد التحتي.

ندرس الآن اختيار مقاس خط السائل إذا انخفض طول الأنبوب الرأسي إلى مترين وزاد طول الأنبوب الأفقي إلى ٥٥ متراً وبقاء ظروف التشغيل ثابتة.

من جدول ٩,٣ نختار أيضًا أنبوبًا نحاسيًا بقطر اسمي قدره ٢٨ مم وسعة تبريد قدرها ١٣١,٠ كيلووات. نحسب الطول المكافئ للخط بالأبعاد الجديدة كما يلي:

$$L_e = 2 + 55 + 3 + 2 \times 0.8 + 8.8 = 70.4 \text{ m}$$

وبالتالي يكون:

$$(\Delta T_e)_f = 0.02 \times 70.4 \left(\frac{100}{131} \right)^{1.8} = 0.87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

وتقدر ΔP_h كما يلي:

$$\Delta P_h = 1128.4 \times 9.81(-2) = -22.1 \text{ kPa}$$

أي إن:

$$(\Delta T_e)_h = -22.1 / 37.4 = -0.59 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ويكون:

$$\Delta T_e = 0.87 - 0.59 = 0.28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

أي إن درجات التبريد التحتي ستقل بمقدار ٠,٢٨°م وهي أقل من ٢°م المعطاة في بيانات المثال. مرة أخرى يمكن تصغير المقاس الاسمي للأنبوب توفيرًا للتكلفة الأولية.

٩,٧ تصميم مسار خط السحب

يصمم مسار خط السحب بحيث لا يزيد فقد الضغط خلاله عن حد السماح لفقد الضغط، وبحيث تكون سرعة بخار المبرد في الأجزاء الرأسية من الخط كافية لحمل زيت التزييت الموجود ببخار المبرد إلى الضاغط. فزيادة فقد الضغط تزيد الطاقة المستهلكة بالضاغط وتقل سعة التبريد، وبنقص فقد الضغط يتحسن أداء الضاغط، إلا أن هذا يتطلب أنابيب ومواسير كبيرة القطر، مما يعني

ارتفاع التكاليف الأولية. أضيف إلى هذا أن انخفاض فقد الضغط نتيجة كبر قطر خط السحب يعني انخفاض سرعة البخار بخط السحب، مما يعني عدم قدرة البخار على حمل زيت التزييت معه بالأجزاء الرأسية من الخط لإعادة هذا الزيت إلى الضاغط، وبالتالي يقصر عمر الضاغط. وعليه يعتبر فقد الضغط في خط السحب وسرعة بخار المبرد في الأجزاء الرأسية لهذا الخط هما الأساسان المستخدمان لحاسب القطر الداخلي للخط، ما لم يستخدم النظام فاصل زيت عندئذ يصمم خط السحب على أساس تقليل فقد الضغط بالخط فقط.

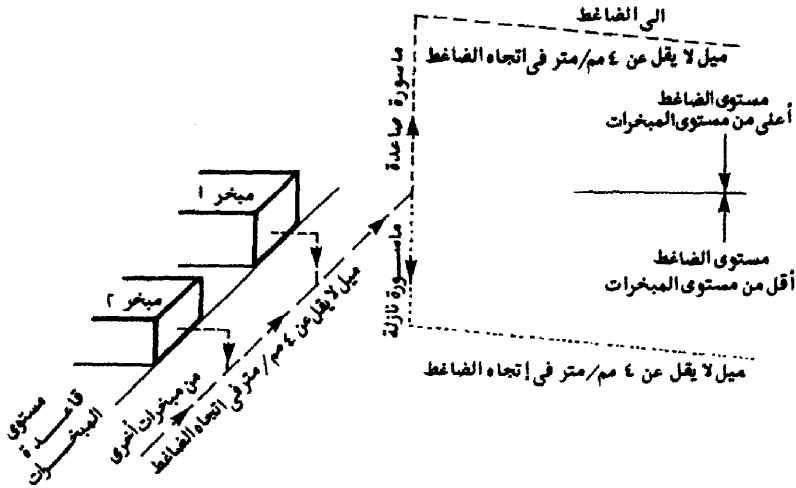
ويراعى أيضاً عند تصميم مسار خط السحب العمل على تقليل فقد الضغط ما أمكن عن طريق تحاشي أي انحناءات لا داعي لها. كذلك يلزم أن تميل الخطوط الأفقية في اتجاه الضاغط بميل لا يقل عن ٤ مم لكل متر لمساعدة عودة الزيت إلى الضاغط. ويتحدد مسار ووصلات خط السحب بناء على المعلومات الآتية:

- (أ) عدد المبخرات الموجودة بالنظام.
- (ب) الوضع النسبي لمستوى قاعدة بعض المبخرات إلى مستوى بعضها الآخر.
- (ج) مستوى دخول البخار للضاغط بالمقارنة بمستوى خروجه من المبخر.
- (د) استخدام حاكم ضخ عند إيقاف الضاغط أم لا.
- (هـ) استخدام حاكم سعة تيريد أم لا.
- (و) عدد الضواغط الموجودة بالنظام.

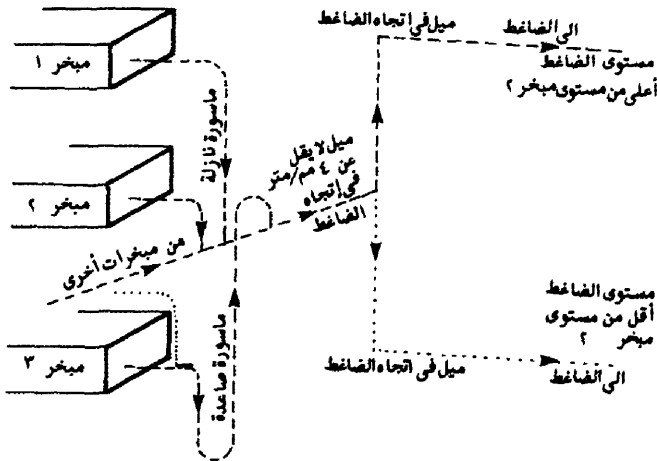
ويوضح شكل ٩,٥ رسماً تخطيطياً لمسار خط السحب عند خروجه من المبخر بنظام متعدد المبخرات في حالة ما إذا كان مستوى دخول البخار للضاغط أعلى أو أقل من مستوى خروجه من المبخرات. وكما هو موضح

بالرسم، يتم تجميع البخار الخارج من جميع المبخرات في خط واحد قبل تمريره إلى الماسورة الصاعدة أو الماسورة النازلة إلى وصلة خط سحب الضاغط. أما إذا كانت المبخرات عند مستويات مختلفة فيأخذ مسار خط السحب الشكل الموضح بشكل ٩,٦. وفي هذا المسار يتم أيضاً تجميع بخار المبرد القادم من جميع المبخرات في خط أفقي واحد قبل مرور هذا البخار إلى الماسورة الصاعدة أو الماسورة النازلة إلى الضاغط. لاحظ الآن في الشكل الآتي: أولاً إذا كان المبخر يستخدم محبس تمدد ثرموستاتي بعيد البصيلة، كمبخر ٣، فإنه لتركيب البصيلة يجب أن يأخذ مسار خط البخار من المبخر شكل مصيدة سائل (حرف U) كما هو موضح بالشكل. ثانياً إذا كان مستوى المبخر أقل من مستوى الخط الرئيسي لسحب بخار المبخرات، فإن وصلة الماسورة الصاعدة من المبخر (مبخر ٣ في الشكل) تلتقي بالخط الرئيسي بوصلة على شكل حرف U مقلوب، وذلك لمنع زيت التزييت القادم من المبخرات الأخرى من الرجوع إلى مبخر ٣، انظر الشكل ٩,٥.

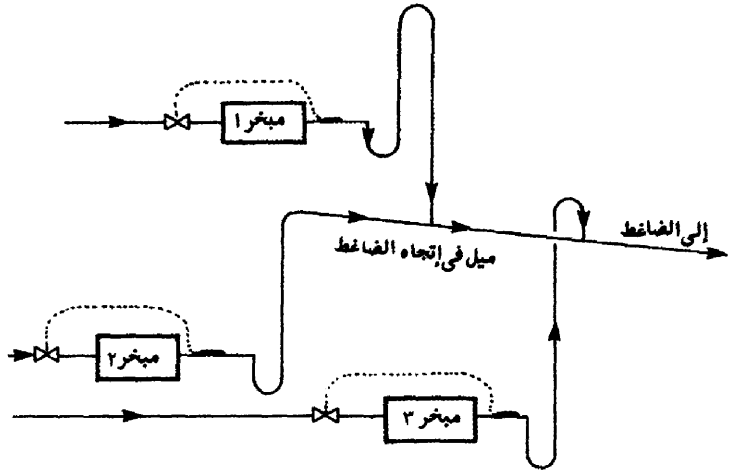
في خط السحب للمثالين الموضحين بالشكلين ٩,٥ و ٩,٦ عند مستوى ضاغط أقل من مستوى المبخرات، يتعرض الضاغط لطفح سائل المبرد من المبخرات المختلفة عند إيقاف الضاغط ثم بدء التشغيل مرة أخرى، إلا إذا كان نظام التبريد يحوي حاكم ضخ تفريغ عند إيقاف الضاغط. فإذا لم يشمل نظام التبريد هذا النوع من التحكم لزم وجود ماسورة صاعدة للبخار الخارج من أي مبخر عند مستو أعلى من مستوى الضاغط، كما هو الحال للمبخرات في شكل ٩,٧. لاحظ أيضاً في هذا الشكل وجود حرف U كمصيدة سائل لخط سحب البخار من كل مبخر لتركيب بصيلة محبس التمدد الثرموستاتي لكل مبخر.



شكل ٩,٥ مسار خط السحب لمبخرات في مستوى واحد مع بعضها البعض في حالة إذا كان مستوى الضاغط أعلى أو أقل من مستوى المبخرات.



شكل ٩,٦ مسار خط السحب لمبخرات في عدة مستويات.

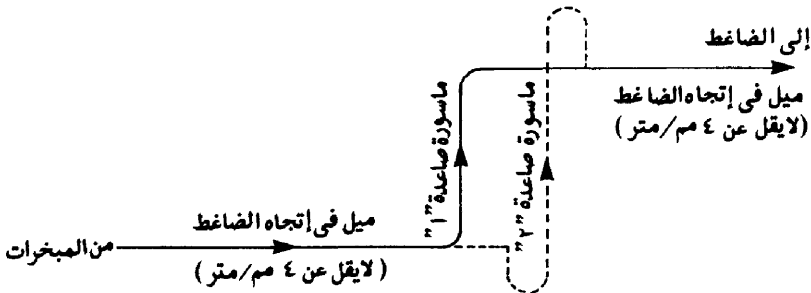


شكل ٩,٧ مسار خط السحب لعدة مبخرات في مستويات مختلفة بدون حاكم لضخ التفريغ عند إيقاف الضاغط.

في جميع الأمثلة الموضحة حتى الآن يتم تحديد قطر خط السحب الصاعد، بحيث تكون سرعة البخار بالماسورة الصاعدة كافية لسحب سائل زيت التزييت إلى أعلى لإرجاعه إلى الضاغط، ويكون هذا الشرط كافياً لتصميم الخطوط الصاعدة في جميع نظم التبريد ما لم يحتوي النظام على حاكم سعة تبريد. فإذا احتوى نظام التبريد على مثل هذا الحاكم أمكن لبعض هذه النظم تبعاً لطريقة التحكم في سعة التبريد، من إقلال سعة التبريد حتى ١٠٪ من السعة القصوى لتبريد النظام، عندئذ ينخفض معدل سريان بخار المبرد في الخط الصاعد إلى الحد الذي يجعل سرعته غير كافية لحمل زيت التزييت إلى أعلى الماسورة الصاعدة وإرجاعه إلى الضاغط، وبالتالي تنخفض كفاءة التزييت بالضاغط مما يؤدي إلى تلفه.

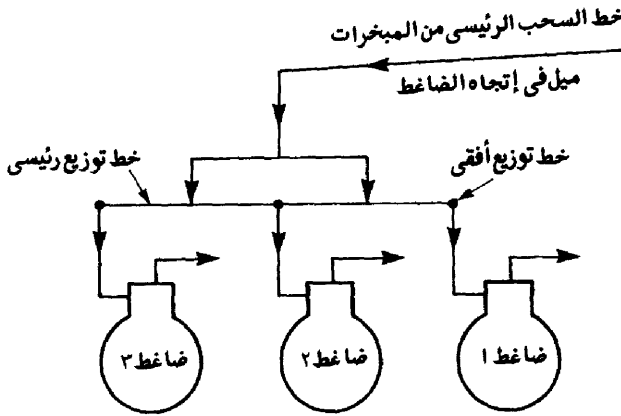
وللتغلب على هذه المشكلة يستبدل أي خط صاعد بمسار خط السحب بخط مزدوج، كما هو مبين بشكل ٩,٨. في هذه الحالة يتم حساب قطر الماسورة

الصاعدة "١" بخط السحب، بحيث تكفي سرعة البخار بها عند الحد الأدنى لسعة التبريد من حمل زيت التزييت إلى أعلى الماسورة. أما الماسورة الصاعدة "٢"، فيحسب قطرها بحيث تكون سرعة البخار المار في الماسورة الصاعدة "١"، كافية لحمل زيت التزييت إلى أعلى الماسورة "٢". فإذا انخفضت سعة التبريد بالنظام، انخفضت سرعة بخار المبرد في ماسورة "٢" إلى الحد الذي لا يمكن للبخار معه حمل الزيت إلى أعلى. عندئذ يترسب الزيت في قاع الماسورة "٢" - والتي على شكل حرف U- مما يزيد مقاومة سريان البخار في الماسورة "٢" إلى الحد الذي يمنع معه بخار المبرد من السريان في هذه الماسورة، تحول كل البخار إلى ماسورة "١"، وبهذا تكون سرعته كافية لحمل الزيت عند الحد الأدنى لسعة التبريد. ويجب مراعاة توصيل الماسورة "٢" إلى خط السحب المتجه إلى الضاغط بماسورة مقلوبة (حرف U مقلوب) لمنع عودة الزيت القادم من الماسورة الصاعدة "١" إلى الماسورة الصاعدة "٢"، كما هو موضح بشكل ٩,٨.



شكل ٩,٨ استخدام ماسورتين صاعنتين في خط السحب لضغط أعلى من مستوى خط سحب المبخرات، ويعمل الضاغط بحكم سعة تبريد.

ويوضح شكل ٩،٩ توصيل خط السحب من المبخرات إلى ثلاثة ضواغط متصلة على التوازي. ويراعى عند التصميم أن يكون توزيع زيت التزييت العائد إلى الضواغط متساو في المقدار، كما يراعى أن تكون ماسورة السحب الرئيسي عند التوزيع أفقية تمامًا وثابتة القطر. كما يجب أن يكون خط السحب من المبخرات عند مستو أعلى من مستوى دخول البخار إلى الضواغط حتى يمكن للزيت الرجوع إلى أعلى الضواغط المختلفة من جانب خط التوزيع لضمان تساوي توزيع الزيت إليها، كذلك يجب أن تكون هذه الفروع بنفس قطر خط التوزيع الرئيسي، وإذا لزم الأمر تصغير قطر ماسورة الفرع، فيجب أن يتم هذا عند بداية الجزء الرأسي من الفرع، وبعد انتهاء الجزء الأفقي الأولي منه.



شكل ٩،٩ توصيل خط السحب إلى ثلاثة ضواغط متصلة على التوازي.

تصمم خطوط السحب لمبرد ٢٢ بحيث لا يزيد فقد الضغط الكلي بها عن تغير درجة حرارة تشبع مكافئ قدره 1°C . وتصمم هذه الخطوط في حالة مبرد الأمونيا لتغير مكافئ قدره 0.5°C . وهذا هو الشرط الوحيد لتصميم أي خط سحب أفقي، أما الخطوط الرأسية الصاعدة فيشترط أن تعطي أقطارها الحد الأدنى لسرعة البخار التي تمكن البخار من حمل زيت التزييت معه إلى أعلى

الخط الصاعد في اتجاه الضاغط، إذا لم يشمل النظام فاصل زيت. ويستخدم هذا الشرط للمبردات التي تختلط بزيت التزيت، مثل مبرد ٢٢، حيث يدور زيت التزيت مع المبرد في دائرة التبريد ويعود مرة أخرى إلى الضاغط، أما في حالة الأمونيا، حيث لا تختلط الأمونيا بزيت التزيت، فيستخدم عادة فاصل زيت في خط الغاز الساخن لفصل الزيت عن الأمونيا، وبالتالي لا يمثل زيت التزيت الدائر مع الأمونيا غير نسبة ضئيلة يتم فصلها عادة في فاصل زيت يوضع بخط السحب قبل الضاغط مباشرة. وبناء على ذلك يحسب قطر خط السحب الصاعد بنظم الأمونيا بنفس طريقة حساب خط السحب الأفقي.

يجب عند تصميم خط السحب الصاعد (إن وجد) لمبرد ٢٢ في نظم التبريد التي تعمل بحاكم سعة تبريد، أن تكون سرعة بخار المبرد عند الحد الأدنى لسعة التبريد كافية لحمل زيت التزيت مع بخار المبرد إلى أعلى الخط الصاعد. ويوضح جدول ٩،٥ الحد الأدنى لسعة التبريد اللازمة لحمل زيت التزيت إلى أعلى الخط الصاعد لمبرد ٢٢. ويبين المثال التالي كيفية استخدام الجدول.

مثال ٩،٤

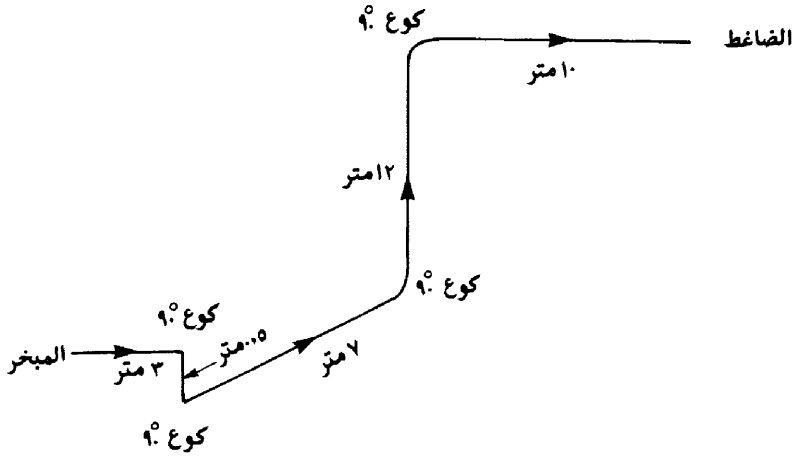
يبين شكل ٩،١٠ رسمًا تخطيطيًا بالأبعاد لخط السحب بنظام تبريد بمبرد ٢٢ بسعة تبريد قدرها ١٠٠ كيلوات ودرجة حرارة تشبع بالمكثف قدرها 50°م ، ودرجة حرارة تشبع بالمبخر قدرها -5°م . إذا كانت درجة حرارة البخار عند الدخول للضاغط تساوي 10°م ، اختر المقاس المناسب لخط السحب. افرض أن نظام التبريد يستخدم حاكم سعة تبريد، حيث يمكن عمل نظام تبريد بخفض سعة التبريد إلى ٤٠ كيلوات.

جدول ٩,٥ أنفى سعة تبريد بالكيلوات لحمل زيت التزيت أعطى خط السحب الصاعد
لأنابيب نحاس ومبرد ٢٢ [ASHRAE 1990]

درجة حرارة التبريد	درجة حرارة غاز السحب	القطر الخارجي الاسمي (مم)	١٢	١٥	١٨	٢٢	٢٨	٣٥	٤٢	٥٤	٦٧	٧٩	١٠٥	١٣٠
٤٠-	٣٥-		٠,١٨٢	٠,٣٣٤	٠,٥٦١	٠,٩٥٦	١,٨١٧	٣,٢٢٣	٥,٢٠٣	٩,٩٧٧	١٤,٢٥٨	١٦,١٥٥	٥٣,٩٦٣	٩٣,٤١٩
	٢٥-		٠,١٧٣	٠,٣١٧	٠,٥٢٢	٠,٩٠٧	١,٧٢٣	٣,٠٥٧	٤,٩٣٤	٩,٤٦٤	١٢,٣٧١	١٤,٨١١	٥١,١٨٩	٨٨,٦١٧
	١٥-		٠,١٦٨	٠,٣٠٧	٠,٥١٦	٠,٨٨٠	١,٦١٢	٢,٩٦٧	٤,٧٩١	٩,١٨٥	١٥,٨٨٨	١٥,٧٣٩	٤٩,٦٨١	٨٦,٠٠٦
٢٠-	١٥-		٠,٢٨٧	٠,٥٢٧	٠,٨٨٥	١,٥٠٨	٢,٨٦٧	٥,٠٨٧	٨,٧١٣	١٥,٧٤٨	٢٧,٧٣٩	٤١,٧٨٣	٨٥,١٧٣	١٤٧,٤٤٩
	٥-		٠,٢٧٣	٠,٥٠١	٠,٨٤١	١,٤٣٣	٢,٧٢٤	٤,٨٣٤	٧,٨٠٤	١٤,٩١٣	٢٥,٨٨٢	٣٩,٢٢٦	٨٠,٩٢٩	١٤١,١٠٢
			٠,٢٦٤	٠,٤٨٥	٠,٨١٥	١,٣٨٨	٢,٦٣٨	٤,٦٨٠	٧,٥٥٥	١٤,٤٨٧	٢٥,٠٥٨	٣٧,٩٧٧	٧٨,٣٥٣	١٣٥,٦٤٢
٥-			٠,٣٨٩	٠,٧١٣	١,١٩٨	٢,٠٤١	٣,٨٧٩	٦,٨٨٣	١١,١١٢	٢١,٣٠٦	٣٦,٨٥٤	٥٥,٨٥٦	١١٥,٢٤٠	١٩٩,٤٩٩
			٠,٣٦٩	٠,٦٧٦	١,١٣٦	١,٩٣٥	٣,٦٧٨	٦,٥٢٦	١٠,٥٣٥	٢٠,٢٠٠	٣٤,٩٤٠	٥٢,٩٥٤	١٠٩,٢٥٤	١٨٩,١٣٦
			٠,٣٥٤	٠,٦٥٠	١,٠٩٢	١,٨٦١	٣,٥٣٧	٦,٢٧٥	١١,١٢١	١٩,٤٢٥	٣٢,٦٠٠	٥٠,٩١٢	١٠٥,٠٦٥	١٨١,٨٨٤
٥			٠,٤٧٠	٠,٨٦٢	١,٤٤٩	٢,٤٦٨	٤,٦٩٢	٨,٣٣٥	١٣,٤٤٦	٢٥,٨٧١	٤٤,٥٧٧	٦٧,٥٦٠	١٣٩,٣٨٧	٢٤٦,٣٠٢
			٠,٤٤٠	٠,٨٠٧	١,٣٥٦	٢,٣١١	٤,٣٩٣	٧,٧٩٤	١٢,٥٨٢	٢٤,١٢٦	٤١,٧٣١	٦٣,٢٤٦	١٣٠,٤٨٨	٢٢٥,٩٩٦
			٠,٤٢٢	٠,٧٧٤	١,٣٠١	٢,٢١٧	٤,٢١٢	٧,٤٧٦	١٢,٠٢٩	٢٢,٦٤١	٤٠,٠٢٧	٦٠,٦٦٥	١٢٥,٦٦١	٢١٦,٦٥٥

* القيم في الجدول (٩,٥) على أساس درجة حرارة التشبع في المكثف ٤٠°م ، عند اختلافها عن هذه القيمة تضرب قيم الجدول في عامل التصحيح F الآتي:

درجة حرارة السائل			
المبرد	٢٠°م	٣٠°م	٥٠°م
مبرد ٢٢	١,١٧	١,٠٨	٠,٩١
مبرد ١٣٤	١,٢٠	١,١٠	٠,٨٩
مبرد ٥٠٢	١,٢٦	١,١٢	٠,٨٦



شكل ٩,١٠ رسم تخطيطي لخط السحب لمثال ٩,٤.

الحل

باستخدام جدول ٩,٣ عند درجة حرارة تشبع قدرها ٥°م بخط السحب وباختيار أنبوباً نحاسياً بقطر اسمي قدره ٥٤ مم، نجد أن سعة التبريد بالجدول تساوي ٨٩,٦٩ كيلووات. يؤخذ معامل التصحيح لدرجة حرارة المكثف من أسفل الجدول، عندئذ تصحح قيمة سعة التبريد من الجدول كما يلي:

$$\dot{Q}_t = 0.91 \times 89.69 = 81.6 \text{ kW}$$

نحسب الطول المكافئ لخط السحب كما يلي:

$$L_e = L + 4L_{90^\circ \text{ elbow}} \\ = (3 + 0.5 + 7 + 12 + 10) + 4 \times 1.6 = 38.9 \text{ m}$$

يقدر التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط من معادلة (9.9) كما يلي:

$$\Delta T = 0.04 \times 38.9 \times \left(\frac{100}{81.6}\right)^{1.8} = 2.24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

أي تزيد ΔT عن 1°C ، وبالتالي يجب اختيار مقاساً أكبر لخط السحب. نختار الآن أنبوباً بقطر اسمي قدره ٦٧ مم، فنحصل على الآتي:

$$\dot{Z}_t = 0.91 \times 159.5 = 145.1$$

$$L_e = 32.5 + 4 \times 1.9 = 40.1$$

$$\Delta T = 0.04 \times 40.1 \left(\frac{100}{145.1}\right)^{1.8} = 0.82 \text{ } ^\circ\text{C}$$

أي تقل ΔT عن 1°C وبالتالي يكون هذا المقاس لخط السحب مناسباً.

ندرس الآن ملائمة قطر خط السحب في الجزء الصاعد منه لحمل زيت التزيت إلى أعلى عندما يعمل نظام التبريد عند الحد الأدنى لسعة التبريد، أي عند ٤٠ كيلووات. بالرجوع إلى جدول ٩،٥ نجد أن الحد الأدنى لسعة التبريد اللازمة لحمل زيت التزيت إلى أعلى خط السحب هي ٣٤،٩٤ كيلووات، أي أقل من ٤٠ كيلووات، وذلك عند استخدام أنبوباً نحاسياً مقاسه الاسمي هو ٦٧ مم. ومن هذا نجد أن مقاس الأنبوب مناسباً.

٩،٨ تصميم مسار خط الغاز الساخن

يحمل الغاز الساخن الخارج من الضاغط بعض قطرات زيت التزيت معه، ولا يمكن عملياً الحد من ذلك، لذا يصمم خط الغاز الساخن - كما هو الحال في خط السحب- بحث يكون فقد الضغط في هذا الخط أقل ما يمكن،

ولكن إلى الحد الذي تكفي معه سرعة البخار على حمل قطرات الزيت المحمولة بالبخار إلى المكثف ومنع عودتها إلى الضاغط من خلال صمام الطرد، وذلك لحماية الضاغط. ويلزم على المصمم التوفيق بين فقد الضغط وسرعة البخار في الخطوط المساعدة من الخط لضمان كفاءة تصميم خط الغاز الساخن. ويتم هذا عن طريق مراعاة الآتي، بالإضافة إلى حساب القطر الداخلي الأمثل للخط:

(أ) ألا يوجد بالخط أي تعرجات أو دورانات لا داعي لها، مما يزيد من فقد الضغط بالخط.

(ب) أن تميل الأجزاء الأفقية لخط الغاز الساخن في اتجاه سريان الغاز - أي في اتجاه المكثف - بما لا يقل عن ٤ مم لكل متر طولي، وذلك لمنع عودة قطرات زيت التزييت إلى صمام الطرد بالضاغط.

(ج) أن يوجد مصيدة سائل بالقرب من خروج البخار من الضاغط، وذلك لمنع ارتداد زيت التزييت، وكذلك قطرات سائل المبرد المتكثف في خط الغاز الساخن، إلى الضاغط مرة أخرى.

ويعتمد مسار خط الغاز الساخن على بدائل التصميم الآتية:

(أ) مستوى الخروج من الضاغط بالمقارنة بمستوى الدخول للمكثف.

(ب) وجود أو عدم وجود حاكم للتحكم في سعة التبريد بنظام التبريد.

(ج) وجود أو عدم وجود فاصل زيت بنظام التبريد.

(د) عدد الضواغط الموجودة بنظام التبريد.

(هـ) عدد المكثفات المستخدمة بنظام التبريد.

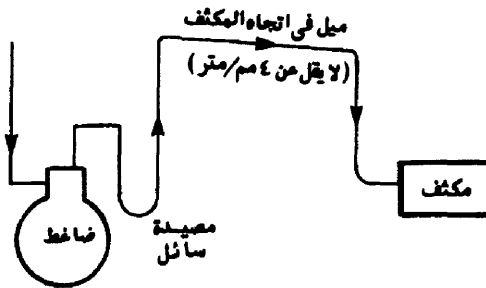
وفيما يلي سنوضح كيفية تصميم مسار الغاز الساخن في بدائل التصميم السابقة.

يوضح شكلا ٩،١١ و ٩،١٢ مسار خط الغاز الساخن تبعاً لاختلاف مستوى الضاغط والمكثف. فإذا كان مستوى الضاغط والمكثف متقارباً كما هو موضح في شكل ٩،١١ (أ) لزم وضع خط صاعد لا يزيد عادة عن ٢،٥ متر كشرط لضمان عدم ارتداد أي سائل للمبرد أو نقط زيت التزييت إلى الضاغط مرة أخرى. لاحظ هنا أيضاً وجود خط نازل للوصول إلى مستوى المكثف، وكذلك وجود مصيدة السائل بالقرب من خروج الضاغط، بالإضافة إلى ميل الخط في اتجاه المكثف. أما إذا كان مستوى المكثف أعلى من مستوى الضاغط، كما هو موضح بالرسم (ب) بنفس الشكل، فتحذف الماسورة النازلة فقط ويطول الخط الصاعد للوصول إلى مستوى المكثف. ويجب مراعاة وضع مصيدة سائل كل ٧،٥ متر من طول الخط الصاعد نظراً لزيادة احتمال تساقط قطرات الزيت كلما زاد طول الخط الصاعد، وتكون شكل هذه المصيدة على شكل حرف U أحدهما في الوضع الطبيعي والأخرى مقلوبة، كما هو موضح بشكل ٩،١٢.

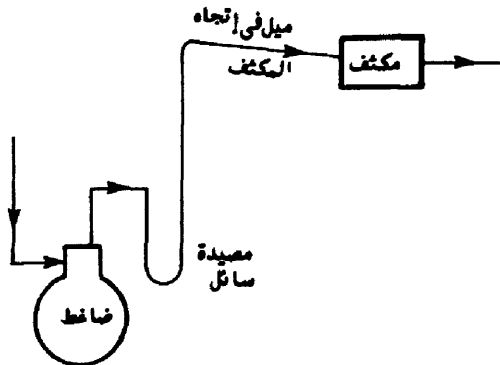
وكما سبق أن قدمنا في تصميم مسار خط السحب، يخشى في نظم التبريد المستخدمة لحاكم تحكم في سعة التبريد أن تتخفض سرعة البخار في الخط الصاعد- نتيجة انخفاض سعة التبريد- إلى الحد الذي لا يمكن البخار من حمل زيت التزييت إلى أعلى الخط الصاعد. عندئذ يستخدم خط صاعد مزدوج، كما هو الحال عند تصميم خط السحب، وتكون فكرة عمل هذا الخط كما قدمنا سابقاً في تصميم خط السحب. ويوضح شكل ٩،١٣ مسار خط الغاز الساخن في هذه الحالة.

ويفضل في العديد من نظم التبريد استخدام فاصل زيت في خط الغاز الساخن، ومن هذه النظم على سبيل المثال: النظم التي تعمل عند درجات حرارة

منخفضة نسبيًا، والنظم التي تستخدم بعض أنواع المبخرات التي لا تساعد على إرجاع الزيت إلى الضاغط، كالمبخرات المغمورة، أو النظم التي بها حاكم تحكم سعة ويصعب استخدام خط مزدوج صاعد في خط الغاز بها، وغيرها من النظم. وفي هذه الحالة يصمم خط الغاز الساخن بحيث تميل الأنابيب الأفقية بالخط إلى اتجاه فاصل الزيت كما هو موضح بشكل ٩،١٤.

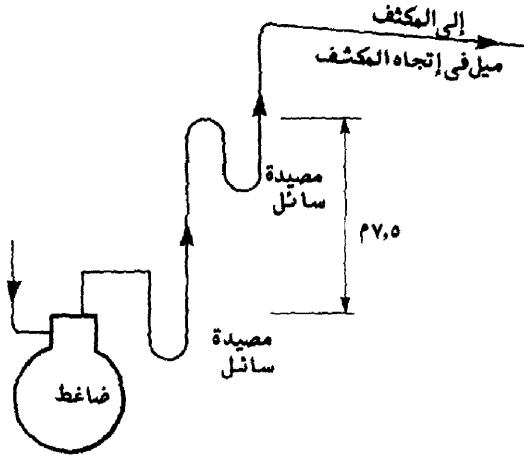


(أ) مستوى المكثف في مستوى الضاغط

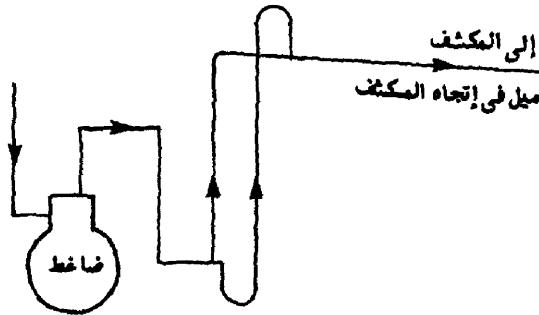


(ب) مستوى المكثف أعلى من مستوى الضاغط

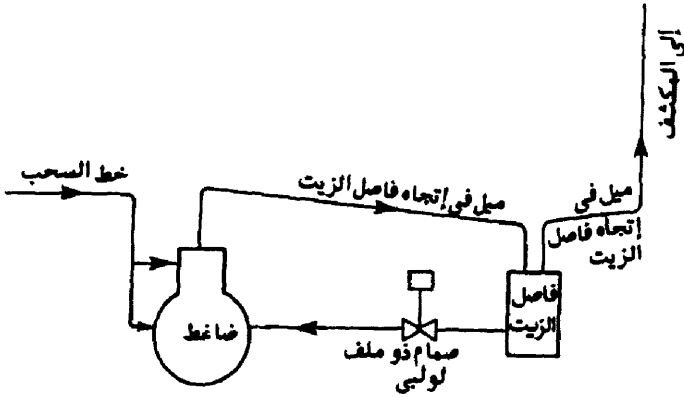
شكل ٩،١١ مسار الخط الساخن لمكثف عند مستوي الضاغط أو أعلى منه.



شكل ٩,١٢ مسار الخط الساخن لمكثف أعلى من الضاغط بمسافة راسية تزيد عن ٧,٥ متر وتقل عن ١٥ متراً.



شكل ٩,١٣ استخدام ماسوريتين صاعدتين بالخط الساخن لنظام تبريد به حاكم سعة.



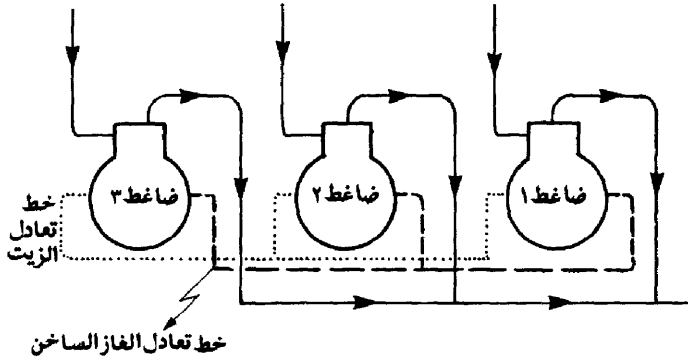
شكل ٩،١٤ مسار الخط الساخن باستخدام فاصل زيت.

كما يلزم أيضاً توصيل فاصل الزيت بحوض مرافق الضاغط بخط لإعادة الزيت إلى الضاغط. ويركب على هذا الخط صمام ذو ملف لولبي للتحكم في سريان الزيت إلى الضاغط تبعاً لمستوى هذا الزيت بحوض مرافق الضاغط.

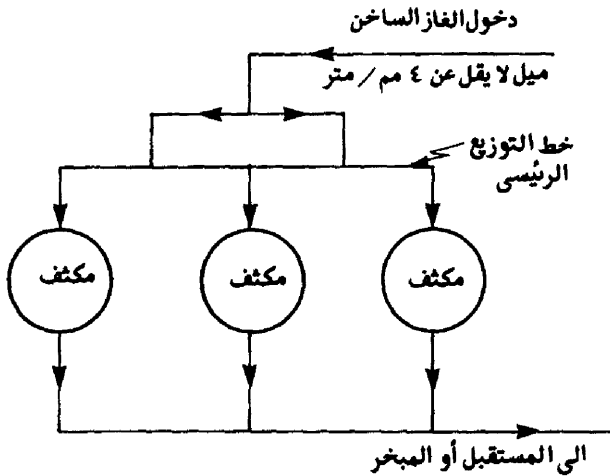
يوضح شكل ٩،١٥ مسار الغاز الساخن عند الخروج من عدة ضواغط متصلة على التوالي. وكما هو موضح بالشكل يجب توصيل هذه الضواغط على خط رئيسي عند مستوى أقل من مستوى الخروج من الضواغط لمنع ارتداد زيت التزييت إلى الضواغط. كما يلزم أيضاً توصيل خط خارجي لتعادل الغاز الساخن في أحواض مرافق الضواغط لضمان عدم اندفاع الزيت في أحد هذه الضواغط بمعدل أكبر من الضواغط الأخرى. كما يجب أيضاً توصيل أحواض مرافق الضواغط بخط خارجي لتعادل زيت التزييت لضمان مستوى زيت متساو في هذه الأحواض.

يوضح شكل ٩،١٦ توصيل خط الغاز الساخن إلى ٣ مكثفات متصلة على التوالي. ويجب في هذه الحالة أن يكون خط الغاز الساخن مائلاً في اتجاه المكثفات، أما خط التوزيع الرئيسي فيجب أن يكون أفقياً تماماً لعدالة توزيع الغاز الساخن بين المكثفات المختلفة. أيضاً يجب أن يؤخذ في الاعتبار عند

تصميم هذه الوصلات أن يوزع الغاز الساخن على المكثفات المختلفة بالتساوي لأفضل استفادة من سطح انتقال الحرارة بكل مكثف.



شكل ٩،١٥ مسار خط الغاز الساخن لعدة ضواغط متصلة على التوالي. يوضح الرسم أيضا خط تعادل الغاز الساخن وكذلك خط تعادل الزيت لأحواض المرافق للضواغط.



شكل ٩،١٦ توصيل خط الغاز الساخن إلى عدة مكثفات متصلة على التوالي.

يحسب قطر خط الغاز الساخن بنفس طريقة حساب قطر خط السحب، أي أن يكون فقد الضغط في الخط أقل من حد السماح لفقد الضغط. ويؤخذ حد السماح مكافئاً لتغير في درجة حرارة التشبع قدره 0.5°C لمبرد ٢٢ وللأمونيا. على أن هذا ليس هو الشرط الوحيد، فيجب أيضاً أن تكون سرعة الغاز بأي خط صاعد كافية لحمل زيت التزييت إلى أعلى الخط الصاعد، لحماية الضاغط. وكما بينا سابقاً، لا ينطبق هذا الشرط عند استخدام الأمونيا كمبرد حيث يركب فاصل زيت بخط الغاز الساخن في أبعد نقطة ممكنة عن الضاغط.

ويوضح جدول ٩،٦ الحد الأدنى لسعة التبريد التي تعطي سرعة غاز كافية لحمل الزيت أعلى خط الغاز الساخن الصاعد. وفي المثال التالي نبين كيفية حساب قطر خط الغاز الساخن.

مثال ٩،٥

احسب قطر خط الغاز الساخن بدائرة تبريد تعمل عند نفس المواصفات المعطاة بمثال ٩،٤، علماً بأن درجة حرارة الغاز الساخن الخارج من الضاغط هي 90°C وطول الخط المكافئ هو ٣٠ مترًا منها ٧ أمتار طول الخط الصاعد.

الحل

من جدول ٩،٣ عند درجة حرارة تشبع بخط الطرد قدرها -5°C باستكمال الجدول خطياً، وخط مقاس ٤٢ مم، فإن سعة التبريد بالجدول تكون ٨٧،٨ كيلووات. ويقدر التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط من معادلة (9.7) كما يلي:

$$\Delta T = 0.02 \times 30 \times \left(\frac{100}{87.8 \times 1.11} \right)^{1.8} = 0.63^\circ\text{C}$$

جدول ٩,٦ أنقى سعة تبريد بالكيلوات لحمل زيت التبريت أعلى خط الغاز الساخن الصاعد لأجابيب نحاس و
مبرد ٢٢ [ASHRAE 1990]

درجة حرارة التشبع غاز الامتصاص	درجة حرارة الغاز	القطر الخارجي الاسمي (مم)										(°F)	(°C)
		١٢	١٥	١٨	٢٢	٢٨	٣٥	٤٢	٥٤	٦٧	٧٩	١٠٥	١٣٠
٢٠	٦٠	٠,٥٦٣	٠,٣٢	٠,٧٣٥	١,٩٥٦	٢,٩٥٦	٤,٩٦٩	٩,٩٦٩	١٦,٠٩٤	٢٠,٨٥٩	٢٤,٣٧٧	٤٨,٨٩٧	٧٨٨,٩٣٨
٧٠	٧٠	٠,٥٤٩	٠,٣٠٦	١,٦٩١	٢,٨٨١	٥,٤٧٧	٩,٧١٧	١٥,٦٨٧	٢٠,٠٧٨	٢٠,٠٢٧	٤٨,٨٥١	١٦٢,٦٨٣	٢٨١,٦٣٠
٨٠	٨٠	٠,٥٣٥	٠,٢٨٨	١,٦٥٠	٢,٨١١	٥,٣٤٣	٩,٤٨٠	١٥,٣٠٥	٢٩,٣٤٦	٥٠,٧٦١	٧٦,٩٣٣	١٥٨,٧٢٦	١٧٣,٧٨٠
٩٠	٩٠	٠,٥٩٦	٠,٣١٢	١,٨٣١	٢,١٢٧	٥,٩٤٥	١٠,٥٤٧	١٧,٠٨١	٣٢,٦٤٩	٥٦,٤٤٤	٨٥,٥٩١	١٧٦,٥٨٨	٣٠٥,٧٠٢
٨٠	٨٠	٠,٥٧٩	٠,٢٩٢	١,٧٨٥	٢,٠٤٠	٥,٧٧٩	١٠,٣٥٤	١٦,٠٥٤	٣١,٧٤٠	٥٤,٩٠١	٨٣,٢٠٨	١٧١,٦٧١	٢٩٧,١٩٠
٩٠	٩٠	٠,٥٦٥	٠,٢٨٥	١,٧٤٠	٢,٠٦٤	٥,٦٣٥	٩,٩٩٨	١٦,١٤٠	٣٠,٩٤٨	٥٣,٥٦١	٨١,١٣١	١٦٧,٣٨٦	٢٨٩,٧٧٣
٤٠	٤٠	٠,٦١٨	٠,٣١٢	١,٩٠٣	٢,٢٤٢	٦,١٦٣	١٠,٩٣٤	١٧,٦٥٣	٣٢,٨٤٧	٥٨,٥٤٦	٨٨,٧٣٢	١٨٣,٠٦٩	٣١٦,٩٢٢
٩٠	٩٠	٠,٦٠١	٠,٣٠٣	١,٨٥٣	٢,١٥٧	٥,٨٣٠	١٠,٦٤٧	١٦,٨٩٩	٣٢,٩٥٩	٥٨,٠٠٩	٨٦,٤٠٣	١٧٨,٢١٣	٣٠٨,٦٠٣
٩٠	٩٠	٠,٥٨٤	٠,٢٩١	١,٨٠٠	٢,٠٦٧	٥,٨٣٠	١٠,٣٤٣	١٦,٦٩٨	٣٢,٠١٨	٥٥,٣٨٢	٨٣,٩٣٦	١٧٣,١٧٣	٢٩٩,٧٩١
٥٠	٥٠	٠,٦٣٠	٠,٣٥٦	١,٩٤٣	٢,٣١٠	٦,٢٩١	١١,١٦٢	١٨,٠٠٠	٣٤,٥٥٢	٥٩,٧٦٦	٩٠,٥٨٠	١٨٦,٨٨٢	٣٢٣,٥٢٣
١٠٠	١٠٠	٠,٦١١	٠,٣١٤	١,٨٨٤	٢,٢٠٩	٦,٢٠٠	١٠,٨٢٣	١٦,٤٧٣	٣٢,٥٠٣	٥٧,٩٥١	٨٧,٨٣١	١٨١,٢٠٩	٣١٣,٧٠٢
١١٠	١١٠	٠,٥٩٥	٠,٢٩٢	١,٨٣٤	٢,١٢٥	٥,٩٤١	١٠,٥٤٠	١٧,٠١٦	٣٢,١٢٧	٥٦,٤٣٥	٨٥,٥٣٢	١٧٦,٤٦٧	٣٠٥,٤٩٣

* القيم في الجدول على أساس درجة حرارة التشبع في المبخر -5°C ، عند اختلافها عن هذه القيمة تضرب قيم الجدول في عامل التصحيح F الآتي:

المبرد	درجة حرارة التشبع للسحب (في المبخر) $^{\circ}\text{C}$					
	١٠	٥	٠	٢٠-	٣٠-	٤٠-
مبرد ٢٢	-	١,٠٢	-	٠,٩٦	٠,٩٣	٠,٩٠
مبرد ١١٣٤	١,٠٦	١,٠٤	١,٠٤	-	-	-
مبرد ٥٠٢	-	١,٠٤	-	٠,٩٣	٠,٨٨	٠,٨٣

وهي أقل قيمة من 1°C وبالتالي يقبل التصميم. وبمراجعة جدول ٩,٦ تكون أدنى سعة تبريد بالخط تكفي لأن يحمل الغاز الساخن زيت التزييت معه إلى أعلى الخط الصاعد هي $18,02$ كيلوات، أي أقل من 40 كيلوات، وبالتالي يصلح التصميم.

٩,٩ تصميم مسار خط البخار المتكثف

تستخدم بعض نظم التبريد مستقبلاً لتخزين سائل المبرد القادم من المكثف، وعموماً لا ينصح باستخدام المستقبلات إلا إذا استلزم التصميم ذلك، فإذا استخدم نظام التبريد مستقبلاً لزم توصيل هذا المستقبل إلى المكثف. ويصمم هذا الخط بحيث يسري البخار المتكثف إلى المستقبل بسهولة دون أي عوائق، كما يجب أن تسمح هذه التوصيلة بإعادة البخار الذي قد ينتج في المستقبل - نتيجة ارتفاع درجة الحرارة به نسبياً عن درجة حرارة المكثف - إلى المكثف حيث يعاد تكثفه مرة أخرى.

ويعتمد مسار وخط البخار المتكثف على نوع المستقبل المستخدم. وتنقسم المستقبلات عموماً إلى نوعين أساسيين. يعرف النوع الأول بالمستقبل خلالي النوع، حيث يسري البخار المتكثف القادم من المكثف خلال المستقبل ثم يسحب من المستقبل سائل المبرد حسب حاجة المبخر (انظر شكل ٩,١٧). ويعرف النوع الثاني بالمستقبل ممتدد النوع، حيث يسري البخار المتكثف القادم من المكثف إلى

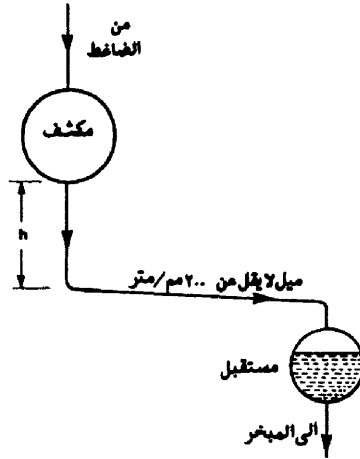
المبخر مباشرة مع توصيل هذا الخط بالمستقبل لسحب أي مقدار إضافي من سائل المبرد من المستقبل أو لتخزين الزائد منه حسب احتياج المبخر (انظر شكل ٩،١٨). وبالتالي يتمدد حجم السائل داخل المستقبل حسب ظروف التشغيل.

ويوضح شكل ٩،١٧ توصيل مستقبل خلالي النوع إلى المكثف. لاحظ ضرورة ألا تقل المسافة الرأسية للخط عن حد أدنى لضمان تغلب السريان على: فقد الضغط خلال الخط، وفرق الضغط بين المستقبل والمكثف، حيث يزيد ضغط الأول عن ضغط الثاني نتيجة انتقال الحرارة من الجو المحيط إلى المستقبل.

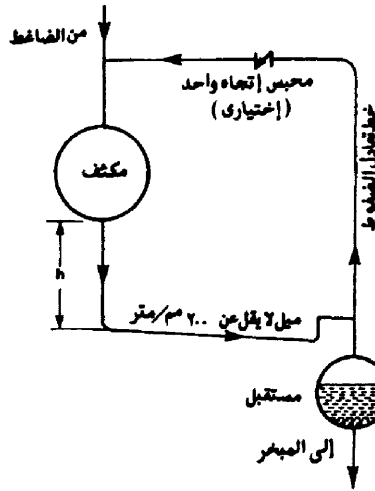
ويلزم أيضًا أن يميل هذا الخط إلى المستقبل بما لا يقل عن ٢٠٠ مم/متر لتيسير سريان السائل إلى المستقبل، كما هو موضح بشكل ٩،١٧. ويجب أن يكون قطر هذا الخط كافيًا لسريان السائل من المكثف إلى المستقبل بالإضافة إلى سريان البخار الناتج في المستقبل، من المستقبل إلى المكثف، أي في الاتجاه العكسي، حيث يعاد تكثيفه في المكثف. ويتحقق هذا الشرط عادة إذا لم ترد سرعة البخار المكثف عن ٠،٥ متر/ث. ويوضح جدول ٩،٧ الحد الأدنى لطول الخط النازل من المكثف إلى المستقبل. كما يوضح شكل ٩،١٧ (ب) استخدام خط خارجي لمعادلة ضغط المستقبل مع ضغط المكثف. لاحظ عندئذ استخدام مصيدة السائل في نهاية خط البخار المتكثف القادم من المكثف لمنع البخار المتولد في المستقبل من الدخول إلى هذا الخط. أيضًا يمكن تركيب محبس أحادي الاتجاه (اختياريًا) على خط تعادل الضغطين لمنع الغاز الساخن، القادم الضاغط، الدخول إلى خط التعادل.

جدول ٩،٧ أقل مسافة رأسية مسموح بها بين المستقبل والمكثف [Pita, 1984].

المقاس الاسمي للخط	مم	٢٥-١٥	٤٠-٢٥	١٠٠-٥٠
أقل طول مسموح به	مم	٢٠٠	٣٨٠	٤٦٠



(أ) توصيل المستقبل إلى المكثف بدون خط تعادل

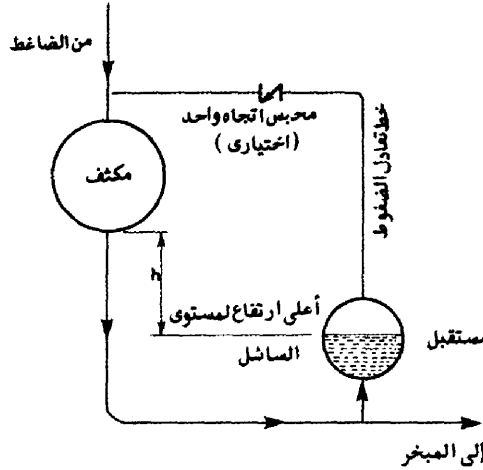


(ب) توصيل المستقبل إلى المكثف بخط تعادل

شكل ٩،١٧ توصيل مستقبل خلالي النوع مع المكثف ويكون استخدام خط تعادل.

يوضح شكل ٩،١٨ توصيل مستقبل ممتد النوع إلى المكثف. في هذه الحالة يجب على المصمم مراعاة أن يكفي ارتفاع عمود السائل h التغلب على

فقد الضغط في الخط الواصل بين المكثف والمستقبل وفقد الضغط بالمكثف، بالإضافة إلى فقد الضغط في خط التهوية بين المستقبل والمكثف (خط تعادل الضغوط)، ويجب عادة ألا يقل طول المسافة h عن ٣٦٠ مم.



شكل ٩,١٨ توصيل مستقبل ممتد النوع إلى المكثف.

تصمم خطوط البخار المتكثف عادة بحيث لا تزيد سرعة هذا البخار المتكثف داخلها عن ١٠,٥ م/ث، كما بينا سابقاً. وتوضح جداول ٩,٢ إلى ٩,٤ أقصى سعة تبريد ممكنة مع أقطار مختلفة لهذا الخط لمبرد ٢٢ وللأمونيا.

مثال ٩,٦

في مثال ٩,٤ أوجد قطر خط البخار المتكثف الذي يمكن استخدامه مع نظام التبريد، إذا كان النظام يستخدم مستقبلاً خلافي النوع.

الحل

من جدول ٩,٣ نجد أن أنابيب نحاس مقاس ٤٢ مم تعطي سعة تبريد ١٠٣,٤ كيلوات، حيث تساوي سرعة البخار المتكثف ٠,٥ متر/ث.

٩,١٠ الاهتزازات والضوضاء والعزل الحراري لخطوط المبرد

تنشأ الاهتزازات والضوضاء في خطوط المبرد المختلفة أساسًا من الضاغط، حيث إنه هو المصدر الوحيد للحركة الميكانيكية. لذا يجب عند توصيل خط السحب وخط الغاز الساخن إلى الضاغط مراعاة التقليل من الاهتزازات، وبالتالي الضوضاء المنقولة من الضاغط إلى خطوط الأنابيب، ويجب أن يعمل المصمم على التقليل من هذه الاهتزازات. وتنشأ الاهتزازات بالضاغط من أحد المصادر الثلاث الآتية: الحركة الميكانيكية للضاغط وما يصاحبها من اهتزازات، والسريان المتردد الناتج من الضواغط الترددية، والسريان المضطرب عند الخروج من الضاغط. ويتم عمومًا خفض هذه الاهتزازات بعدة طرق أهمها الآتي :

- (أ) خفض سرعة دوران الضاغط إلى الحد الأدنى المتاح بالصناعة.
- (ب) خفض سرعة خروج الغاز الساخن والبخار المسحوب من وإلى الضاغط باختيار خطوط كبيرة نسبيًا، وإن كان هذا على حساب زيادة التكلفة الأولية.
- (ج) تركيب وصلات مرنة بين خطوط السحب والطرْد (الغاز الساخن) والضاغط لتخفيف الاهتزازات المنقولة من الضاغط، وفي كثير من الأحيان، خاصة في النظم الصغيرة التي قد تستخدم أنابيب نحاس طري تشكل هذه الأنابيب على هيئة ملف بالقرب من الضاغط لتخفيف نقل الاهتزازات.

- (د) تقليل الاهتزازات والضوضاء بخطوط المبرد بمراعاة عدم تثبيت خطوط السحب والغاز الساخن على مسافات أقل من ١٥ قطر الخط

من موضع التوصيل بالضاغط، وقد تستخدم أيضًا وصلات مرنة بين خطوط السحب والغاز الساخن مع الضاغط لتخفيف هذه الاهتزازات والضوضاء.

هـ) استخدام كاتم صوت على خط الغاز الساخن عند الخروج من الضاغط.

يتم عادة عزل خطوط السحب حراريًا عن الجو المحيط بعازل حراري به حاجز بخار، وذلك لحماية هذه الخطوط من العرق وتقليل مقدار الحرارة المكتسبة من الجو المحيط. أما خطوط السائل فلا تعزل حراريًا إلا في الأحوال التي تقل درجة حرارة السائل بها عن الجو المحيط. وفي بعض الأحيان يفضل أن تمر خطوط السائل وخطوط السحب جنبًا إلى جنب، حيث يعزلا معًا بعازل حراري بغرض أن يعمل الخطان كمبادل حراري لتبريد خط السائل. وتترك خطوط الغاز الساخن في معظم الأحوال بدون عزل حراري للمساعدة على تبريد الغاز الساخن بالجو المحيط، إلا أنه في بعض الأحيان قد تمثل الحرارة المفقودة من هذه الخطوط حملاً حراريًا غير مرغوب فيه في الأماكن التي تمر بها، أو قد تمثل خطرًا حراريًا إذا لمسها بعض الأشخاص بطريقة عفوية، عندئذ ينصح بعزلها.

الرموز ومعانيها للفصل التاسع

L	طول الأنبوب أو الماسورة [م]
L''	الطول المكافئ للفقد في الضغط الثانوي [م]
L_e	الطول المكافئ للفقد في الضغط الكلي [م]
e	خشونة السطح [م]
F	معامل التصحيح [-]
V	السرعة [م/ث]
$\dot{Z}$	سعة التبريد من الفعلية [كيلو وات]
$\dot{Z}_i$	سعة التبريد من الجدول [كيلو وات]

الحروف الإغريقية

ε	الخشونة النسبية [-]
ΔP	الفقد في الضغط الكلي [باسكال]
$\Delta P'$	الفقد في الضغط الرئيسي [باسكال]
$\Delta P''$	الفقد في الضغط الثانوي [باسكال]
ΔP_f	الفقد في الضغط نتيجة الاحتكاك [باسكال]
ΔP_h	الفقد أو الكسب في الضغط نتيجة الصعود أو النزول [باسكال]
ΔT	التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ الفعلي [°م]
ΔT_i	التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ من الجدول [°م]

الفصل العاشر

نظم التحكم الآلي

١٠،١ مقدمة

التحكم الآلي ضرورة لا غنى عنه في التطبيقات الهندسية والصناعية، وذلك لضمان عمل الأجهزة والمعدات بشكل آمن، وتغير ساعاتها حسب الحاجة، إضافة لتوفير وترشيد استخدام الطاقة. يعمل على سبيل المثال مفتاح الضغط المنخفض في دائرة التبريد على إيقاف (أو فصل التيار عن) الضاغط عند وصول ضغط السحب إلى قيمة صغيرة حفاظاً على سلامة الضاغط. هذه القيمة يتم برمجة الحاكم عليها، وكذلك الحال بالنسبة لضغط الطرد. كما يقوم نظام التحكم في غرفة تخزين المواد الغذائية بإيقاف وتشغيل نظام التبريد حسب الحاجة الفعلية عن طريق قياس درجة الحرارة في غرفة التخزين.

يتناول هذا الفصل المكونات الأساسية لمنظومة التحكم الآلي بصورة عامة ويستعرض أنواع التحكم المختلفة، ثم يتم تقديم أنظمة التحكم وأمثلة عليها في دائرة التبريد، ثم عرض لأجهزة القياس والاستشعار الأكثر استخداماً في مخازن التبريد، ثم عرض لأنواع أداة التحكم المستخدمة، وأخيراً يتم تقديم نبذة مختصرة عن التحكم الرقمي.

١٠،٢ المكونات الأساسية لمنظومة التحكم الآلي

للتحكم في متغير معين (درجة الحرارة على سبيل المثال في غرفة التبريد) لا بد من جهاز لقياس هذا المتغير ثم مقارنته بالقيمة المراد الوصول لها (نقطة الضبط). أيضاً يلزم وجود متحكم لإعطاء إشارة لأداة التحكم لعمل اللازم نحو تقليل الفرق بين هاتين القيمتين (المتغير ونقطة الضبط). هذا هو بإيجاز ما

يتم عمله في دائرة التحكم المغلقة (closed control loop)، ويوضح الشكل ١٠,١ المكونات الرئيسية لهذه الدائرة، وهي:

- جهاز قياس يعرف بالمجس أو الحاس (sensor)

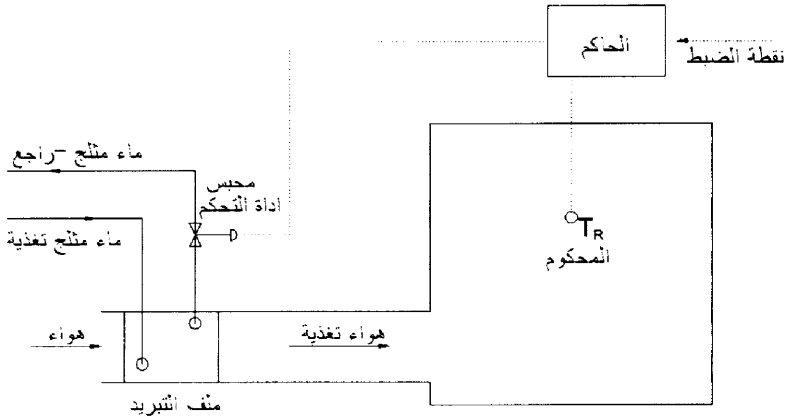
- المتحكم أو الحاكم (controller)

- أداة التحكم (controlled device)

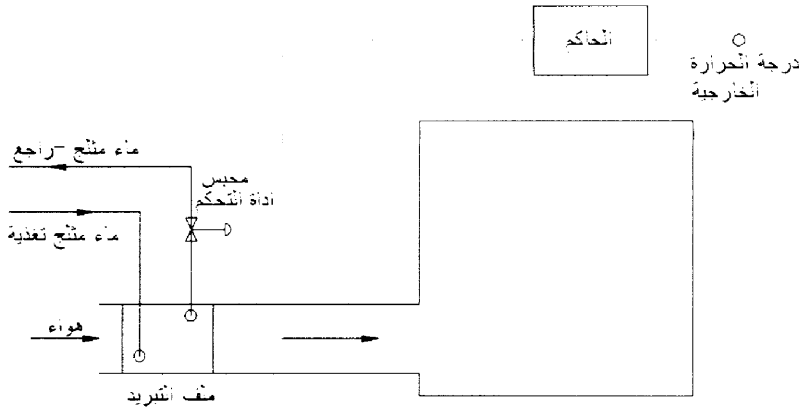
ففي المثال السابق يقوم المجس بقياس درجة الحرارة ويرسلها إلى الحاكم، في نفس الوقت يستقبل المتحكم إشارة نقطة الضبط (وهي درجة الحرارة المطلوب المحافظة عليها داخل الغرفة). عند وجود فرق (أو حيود) بين درجتَي الحرارة التي يستقبلها الحاكم، يقوم بدوره بإرسال إشارة لأداة التحكم (مثل: محبس، أو مضخة، أو مروحة، أو خانقة هواء) لأخذ الإجراء اللازم. في المثال الموضح في شكل ١٠,١ يمكن أن تكون إشارة التحكم إما بفتح المحبس أو بإغلاقه.

لاحظ أن المتغير المراد التحكم فيه (المحكوم) هو درجة حرارة الغرفة وأن أداة التحكم هي المحبس (الصمام)، كما أن عنصر أو وسيط التحكم (control agent) هو الماء المثلج الواصل لملف التبريد، وأن العملية (process) هي تبريد الغرفة باستخدام ملف التبريد.

يمكن تقسيم أنواع التحكم إلى تحكم في دائرة مغلقة (closed control loop) مثل المثال الموضح بالشكل ١٠,١، أو تحكم في دائرة مفتوحة (open control loop). في الدائرة المفتوحة لا توجد علاقة أو إشارة بين المحكوم والحاكم، ويمكن اعتبار التحكم في درجة حرارة الغرفة بناء على قياس درجة الحرارة الخارجية للجو كمثال على دائرة التحكم المفتوحة. فالحاكم ليس له علم بدرجة حرارة الغرفة. ويبين الشكل ١٠,٢ دائرة تحكم مفتوحة.



شكل ١٠,١ المكونات الرئيسية لمنظومة تحكم آلي (دائرة تحكم مغلقة).



شكل ١٠,٢ دائرة تحكم مفتوحة.

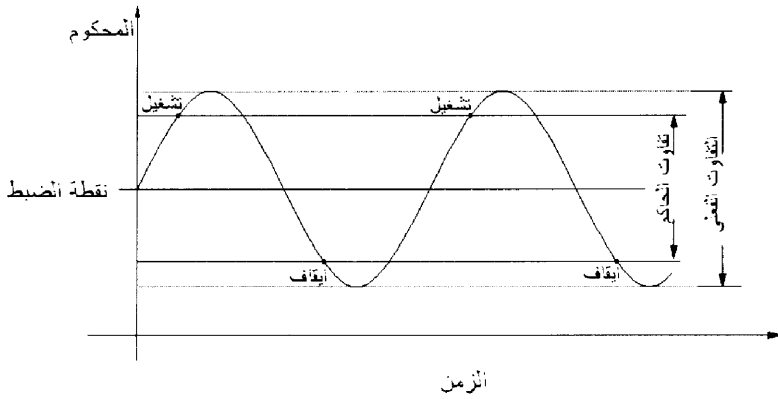
١٠,٣ نظام تحكم بسيط من نوع تشغيل/إيقاف

يعمل هذا النظام في وضع التشغيل أو في وضع الإيقاف، وأمثلة هذا النظام كثيرة، مثل التحكم في تشغيل وإيقاف التلاجة المنزلية أو وحدة التكييف من نوع الشباك أو المنفصل. بالرجوع إلى شكل ١٠,١ يعطي الحاكم إشارة للمجس بقبل أو بفتح صمام الماء المنتلج تبعاً للفرق بين درجتي حرارة الغرفة

ونقطة الضبط. فمثلا بفرض أن نقطة ضبط غرفة التبريد ٥ درجات مئوية، وبفرض مدى تفاوت التيرموستات حول نقطة الضبط، قدره درجتين، درجة أعلى من نقطة الضبط ودرجة أقل من نقطة الضبط. أي إن درجة الحرارة داخل الغرفة تتفاوت بين ٤ و ٦ درجات مئوية. بالنظر إلى التغير الفعلي لدرجة الحرارة داخل الغرفة مع الزمن سنجد أنه يتغير بتفاوت أكثر من درجتين. ويوضح الشكل ١٠،٣ أنه عندما تصل درجة الحرارة إلى ٦ درجات يقوم الحاكم بإرسال إشارة إلى أداة التحكم بفتح الصمام لكن بسبب التأخر الزمني ستزيد درجة الحرارة عن ٦ درجات، أي إن درجة حرارة الغرفة لن تهبط حال فتح الصمام مباشرة، وذلك بسبب الحرارة المخزنة في الغرفة والملف. وتسمى قيمة الزيادة فوق الـ ٦ درجات بالشطح العلوي (overshoot)، ونفرض أن هذا الشطح يساوي نصف درجة. أيضا عندما تقل درجة حرارة الغرفة إلى ٤ درجة فإن الحاكم يرسل إشارة لأداة التحكم بوقف الصمام وإيقاف الماء المثلج عن ملف التبريد، ونظرًا للتأخر الزمني فسوف تقل درجة الحرارة داخل الغرفة إلى أقل من ٤ درجات، ويسمى الفرق بين أدنى قيمة تصل لها درجة الحرارة داخل الغرفة والأربع درجات بالشطح السفلي (undershoot)، وبفرض أن قيمة هذا الشطح أيضا بنصف درجة، لذلك يصبح التفاوت الفعلي لهذا الحاكم ٣ درجات. أي إن درجة حرارة الغرفة ستكون محصورة بين ٣،٥ و ٦،٥ درجة، بالرغم أن تصميم الحاكم كان بتفاوت للحاكم بين ٤ و ٦ درجات [McQuiston et al. 2005].

١٠،٤ أنواع التحكم

يمكن تقسيم أنظمة التحكم إلى أنواع مختلفة حسب نوع التقسيم، فمثلا من ناحية نوعية الطاقة المستخدمة بين الحاكم وأداة التحكم يمكن تقسيم أنظمة التحكم إلى:



شكل ١٠,٣ تغير درجة الحرارة داخل الغرفة مع الزمن لنظام تحكم من نوع تشغيل/إيقاف.

(أ) هوائية (pneumatic)

(ب) كهربائية (electric)

(ج) إلكترونية (electronics)

كما يمكن تقسيم أنظمة التحكم من حيث نوع إجراء التحكم إلى:

(أ) نظام تشغيل/ إيقاف (ON-OFF)

(ب) نظام تشغيل/إيقاف موقوت (timed ON-OFF)

(ج) نظام التحكم العائم (floating control)

(د) نظام التحكم المتغير (modulating control)

تحدثنا في الجزء السابق من هذا الفصل عن نظام التحكم من نوع

تشغيل/إيقاف، وفيما يلي سيتم استعراض لبقية أنواع أنظمة التحكم الأخرى.

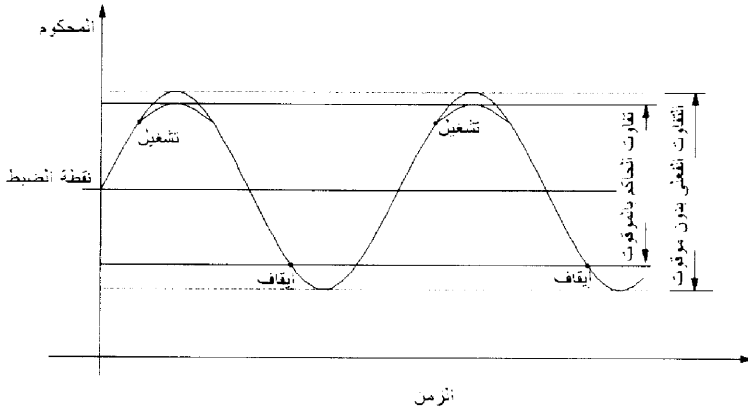
١٠,٤,١ نظام تحكم من نوع تشغيل/إيقاف موقوت

يشبه هذا النظام نظام التحكم من نوع تشغيل/إيقاف ماعدا أنه يتم وضع سخان صغير قريب من المجس، ويعمل هذا السخان خلال فترة الإيقاف. يقوم هذا السخان بتضليل (إن صح التعبير) المجس لقياس درجة الحرارة وإعطاء إشارة للحاكم ومن ثم لأداة التحكم بتشغيل (أو فتح الصمام). عندما يُعطي المجس أن درجة الحرارة أعلى من درجة الحرارة الفعلية، فإن الحاكم سيأمر بفتح الصمام قبل أن تصل درجة حرارة الغرفة لدرجة الحرارة التي كان من المفترض أن يصلها بدون السخان الصغير. وعند ذلك فإن الشطح العلوي يكون أقل في هذه الحالة إذا ما قورن بنظام تشغيل/إيقاف. ولذلك فإن هذا النوع من التحكم يقلل من التفاوت الفعلي ويجعله أقرب إلى تفاوت الحاكم. ويمكن التعميم بصورة أشمل أن كل أنواع التحكم الأخرى ما هي إلا طرق مختلفة لتقريب التفاوت الفعلي ليكون مماثلاً أو قريباً من تفاوت الحاكم مع سرعة في الاستجابة واستقرار في الأداء. ويبين الشكل ١٠,٤ تغيير المحكوم (درجة الحرارة) مع الزمن لنظام تحكم تشغيل/إيقاف موقوت. في أنظمة التسخين (بدلاً من التبريد) يعمل السخان الصغير بجانب المجس خلال فترات عملية تشغيل التسخين [ASHRAE 2005, Schneider 1981].

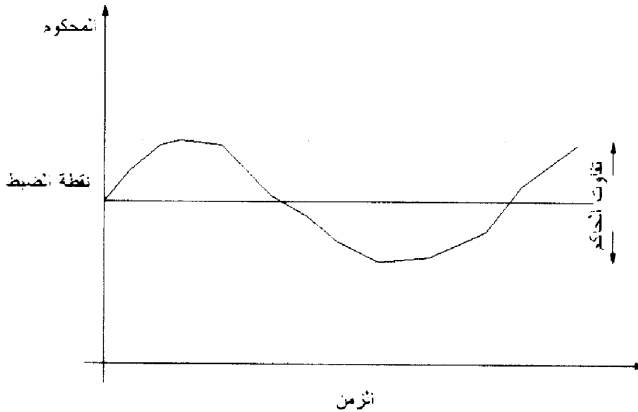
١٠,٤,٢ التحكم العائم

تتمحور آلية التحكم في هذا النوع من أداة التحكم حول أن إجراء التحكم له ثلاث حالات، هي: الاتجاه نحو الإغلاق، أو الاتجاه نحو الفتح، أو ترك الحال على ما هو عليه، ويكون الاتجاه نحو الفتح أو الإغلاق بمعدل ثابت [ASHRAE 2001]. يوضح الشكل ١٠,٥ تغيير درجات الحرارة مع الزمن لنظام تحكم شبيه بنظام التحكم في غرفة تبريد، ما عدا أن أداة التحكم تعمل على التحكم في صمام الماء المثالج بأسلوب التحكم العائم. عندما تكون درجة حرارة الغرفة واقعة في

مدى التفاوت للحاكم، فإن الحاكم ومن ثم أداة التحكم لا تعطي إشارة لعمل أي شيء. أما إذا وصلت درجة حرارة الغرفة للحد الأعلى من التفاوت فإن الحاكم يأمر الصمام بالاتجاه نحو الفتح، فإذا لم تنخفض درجة الحرارة فيعيد الحاكم أمر الصمام نحو الفتح. وكذلك الحال عندما تقل درجة الحرارة عن الحد الأدنى من تفاوت الحاكم، فعندئذ يعطي الحاكم إشارة نحو القفل، وهكذا [Schneider 1981].



شكل ١٠،٤ تغير درجة الحرارة في نظام تحكم من نوع تشغيل/إيقاف موقوت (تطبيق تبريد).



شكل ١٠،٥ تغير درجة الحرارة في نظام تحكم عائم.

١٠,٤,٣ نظام التحكم المتغير

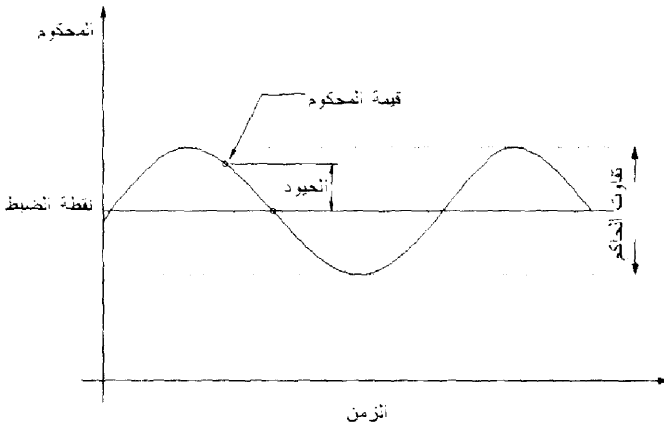
تتغير هنا الإشارة الموجهة لأداة التحكم حسب قيمة الخطأ (الحيود) أو الفرق بين درجة حرارة الغرفة الفعلية ودرجة حرارة الضبط. هناك أنواع من نظم التحكم المتغير، وقبل الدخول في أنواعها ينبغي معرفة بعض التعريفات كما يظهرها الشكل ١٠,٦، وهي:

(أ) نقطة الضبط (set point)، وهي القيمة التي يُراد من الحاكم أن يحافظ عليها للمحكوم (المتغير الذي يراد التحكم فيه).

(ب) قيمة المحكوم (control point)، وهي قيمة المحكوم الفعلية عند أي وقت.

(ج) الحيود أو الخطأ (offset, shift or error)، هو الفرق بين قيمة المحكوم ونقطة الضبط.

(د) مدى التحكم (throttling rang)، وهو مقدار التغير في المحكوم الذي يؤدي إلى تغير في إجراء التحكم من الحد الأدنى (الإغلاق مثلاً) إلى الحد الأعلى (الفتح تماماً).



شكل ١٠,٦ تعريفات لبعض المتغيرات لنظام تحكم متغير.

توجد ثلاثة أنواع مشهورة للتحكم المتغير تبعاً لتأثير أداة التحكم، وهي:

(أ) تحكم تناسبي (proportional controller).

(ب) تحكم تناسبي - تكاملي (proportional - integral controller).

(ج) تحكم تناسبي - تكاملي - تفاضلي (proportional - integral - derivative controller).

وفيما يلي عرض لهذه الأنواع الثلاثة.

تحكم تناسبي

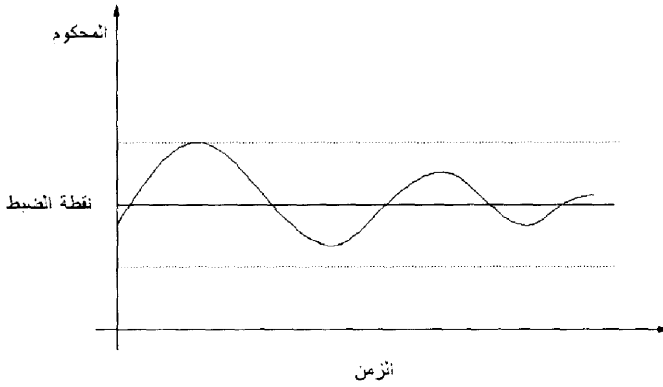
يكون إجراء أداة التحكم في هذا النوع متناسباً مع الحیود أو الخطأ، أي يمكن تمثيل ناتج (output) أداة التحكم بالمعادلة الآتية:

$$O = A + eK_p \quad (10.1)$$

حيث "O" هو التأثير الناتج من أداة التحكم (أو موجه التحكم)، و "A" هو إجراء أداة التحكم عندما يكون الحیود مساوياً للصفر، و "e" هو الحیود أو الخطأ، و "K_p" هو ثابت التناسب.

كلما زادت قيمة K_p كلما كان نظام التحكم أسرع في الاستجابة، حتى وإن كان الحیود صغيراً فإن تأثير أداة التحكم يكون كبيراً، ولكن هذا قد يؤدي إلى عدم استقرار النظام (unstable system).

يبين الشكل ١٠،٧ نظام تحكم من نوع متغير التأثير (تحكم تناسبي) في حالة الاستقرار، حيث إن إجراء التحكم أوصلت النظام إلى فرق بسيط في الحیود. لاحظ أن نظام التحكم التناسبي لا يصل بالحیود إلى الصفر.



شكل ١٠,٧ تغير المحكوم لنظام تحكم تناسبي.

تحكم تناسبي - تكاملي (P+I)

لا يتناسب إجراء التحكم هنا فقط مع الحiod ولكن يتناسب أيضا مع تكامل الحiod مع الزمن. وتعطي المعادلة الآتية صيغة الناتج:

$$O = A + eK_p + K_i \int e dt \quad (10.2)$$

ويرمز لهذا النوع من التحكم بـ PI اختصارا للتناسب والتكامل، وكما هو واضح بالمعادلة فإن إجراء التحكم يتكون من ثلاثة أجزاء، هي: حد ثابت، وحد يتناسب مع الحiod e ، وحد يتناسب مع تكامل الحiod بالنسبة للزمن.

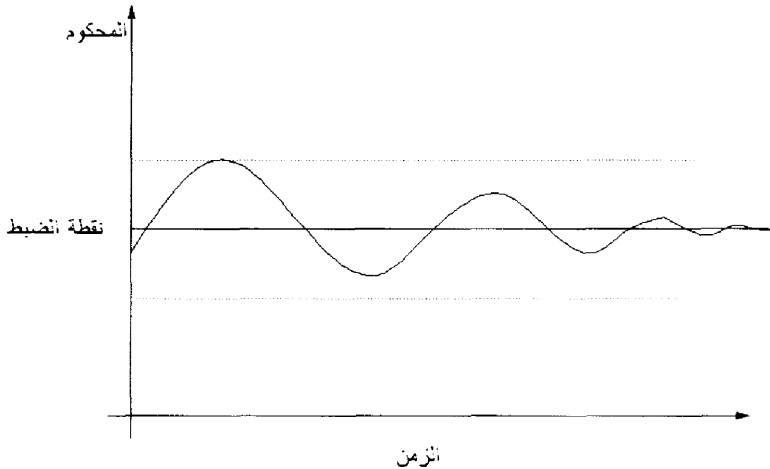
ويضمن هذا النوع من نظم التحكم أن يصل الحiod تقريبا إلى الصفر. ويستخدم هذا النوع من نظم التحكم في كثير من التطبيقات الهندسية، ومنها على سبيل المثال التحكم في درجات حرارة نظم تكييف الهواء.

تحكم تناسبي - تكاملي - تفاضلي (P+I+D)

يكون التأثير الناتج هنا من أداة التحكم متناسبا مع الحiod، وتكامل الحiod بالنسبة للزمن، وتفاضل الحiod بالنسبة للزمن ممثلا بالمعادلة الآتية:

$$O = A + eK_p + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (10.3)$$

حيث تم تعريف الثلاثة حدود الأولى في الطرف الأيمن من المعادلة السابقة. ويعبر الحد الرابع عن الجزء الناتج من أداة التحكم الذي يتناسب مع تفاضل الحيوود مع الزمن، بينما يكون K_D ثابتاً [ASHRAE 2005].



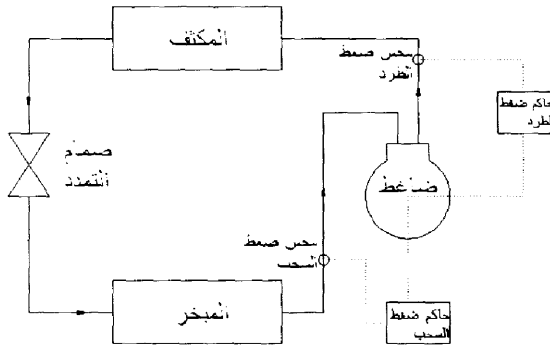
شكل ١٠,٨ تغير المحكوم لنظام تحكم تناسبي-تكاملي.

١٠,٥ أمثلة على تطبيقات التحكم الآلي في دورة التبريد بانضغاط البخار

في هذا الجزء سنستعرض بعضاً من تطبيقات التحكم في دورات التبريد بانضغاط البخار. ويعتبر الضاغط في دورة التبريد هو القلب النابض المحرك للدورة، فإذا ما تم إيقافه فإن الدورة تقف. لذلك يلزم وجود بعض أجهزة التحكم لسلامة عمل الضاغط وتوفير الطاقة اللازمة للتشغيل والتقليل من التدخل البشري.

فاصل الضغط المنخفض (السحب) والضغط العالي (الطرد)

يوجد في كثير من دوائر التبريد مفتاح تحكم أمني عند خط السحب (low pressure cutout) لإيقاف عمل الضاغط عندما يصل ضغط السحب إلى قيمة دنيا يتم برمجة الحاكم عليها. وكذلك الحال بالنسبة لضغط الطرد (high pressure cutout). يبين الشكل ١٠,٩ دائرة تبريد انضغاط البخار بها فاصل تيار للعمل حاكم أمان لضغط السحب، وفاصل تيار لضغط الطرد. يدمج الحاكمان (الضغط السحب وضغط الطرد) في بعض التطبيقات في حاكم واحد، وفي كل الأحوال يتم ضبط الضغطين ومدى التفاوت حسب الحاجة [Dossat 1991].



شكل ١٠,٩ دائرة تبريد بها حاكم أمان لضغط السحب وضغط الطرد.

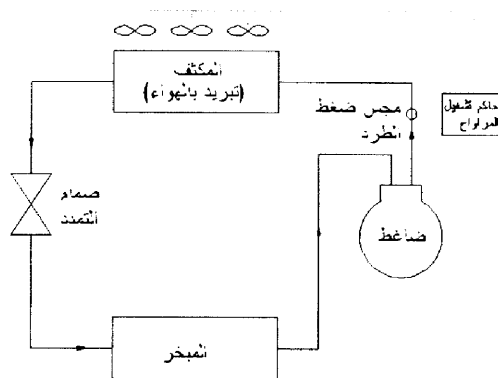
التحكم في تشغيل مراوح المكثف

يوجد في بعض التطبيقات الكبيرة (خصوصاً في الأجواء الباردة) لدورات التبريد حاكم للتحكم في تشغيل مراوح المكثف المبرد بالماء، وذلك للمحافظة على عدم تجاوز الحد الأدنى لضغط الطرد في الدائرة ضماناً لعمل الدورة بشكل سليم، وللحفاظ على فرق ضغط مناسب لصمام التمدد. يقوم هذا النوع من الحاكمات بالتحكم في تشغيل مراوح المكثف تبعاً لضغط الطرد حسب ما يتم

برمجته. فيفرض أن للمكثف ثلاث مراوح فإن الحاكم تبعاً لقيمة ضغط الطرد المقاس يرسل إشارة لتشغيل أو إيقاف المراوح. فلو قل الضغط عن حد السماح الأول يتم تشغيل مروحة واحدة فقط، وعندما يكون الضغط بين حد السماح الأول وحد السماح الثاني يرسل إشارة لتشغيل مروحتين، وعندما يزيد ضغط الطرد عن حد السماح الثاني فيتم تشغيل الثلاث مراوح. ويساعد هذا النظام على ثبات ضغط الطرد ضمن مدى معين، ولكن يلزم التنويه هنا بتحسين قيمة معامل أداء دورة تبريد بانضغاط البخار كلما انخفض ضغط الطرد (أي كلما انخفضت درجة حرارة الجو الخارجي). ويوضح الشكل ١٠،١٠ دورة تبريد بها حاكم للتحكم في تشغيل مراوح المكثف تبعاً لقيمة ضغط الطرد [McQuiston 2005].

حاكم ضغط زيت التزيت في الضاغط

يستخدم زيت التزيت في الضاغط لتوفير اللزوجة اللازمة لحركة أجزاء الضاغط. وللمحافظة على سلامة الضاغط عند انخفاض ضغط التزيت، يقوم مصنعو الضواغط بتركيب حاكم لقياس ضغط الزيت وإرسال إشارة عند انخفاض ضغط الزيت لإيقاف الضاغط.



شكل ١٠،١٠ حاكم تشغيل وإيقاف مراوح المكثف وحاكم ضغط الزيت.

دورة تخفيض الضغط

في هذه الدائرة يتم إعطاء فترة زمنية للاستمرار في تشغيل دائرة التبريد قبل إيقاف الضاغط، وفترة زمنية قبل تشغيل الضاغط. بدلا من إيقاف الضاغط حال وصول درجة حرارة المبخر لدرجة الحرارة المطلوبة، فإن الضاغط يظل يعمل ويتم تخزين وسيط التبريد في مستقبل مائع التبريد، كما هو موضح بالشكل ١٠،١١. عندما تستمر الدورة في العمل بهذه الصورة، فإن ضغط السحب ينخفض. يقوم حاكم ضغط السحب بإيقاف الضاغط عند وصول ضغط السحب إلى حد السماح الأدنى [McQuiston 2005, Dossat 1991].

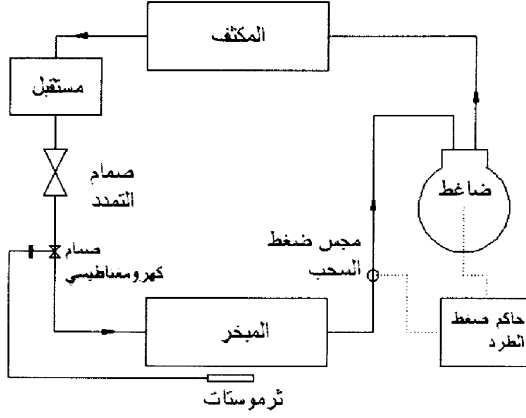
تقوم فكرة عمل هذه الدورة على وجود صمام كهرومغناطيسي (solenoid valve) بين المستقبل وصمام التمدد، كما يوضح الشكل ١٠،١١. ويقوم هذا الصمام باستقبال إشارة من مجس الحرارة (الترموستات) في المبخر وتتم عملية خفض الضغط وإيقاف الوحدة كما يلي:

أ) عندما تصل درجة حرارة المبخر إلى حد السماح فإن الترموستات يرسل إشارة للصمام الكهرومغناطيسي بالقليل ويستمر الضاغط بالعمل ويتم تخزين وسيط التبريد في المستقبل.

ب) نظراً لوجود حاكم لضغط السحب، فإن هذا الحاكم يقوم بإيقاف الضاغط عند وصول ضغط السحب إلى حد السماح.

وفي حالة تشغيل الوحدة، فإن عملية التشغيل تتم كما يلي:

أ) عند ارتفاع درجة حرارة المبخر يرسل الترموستات إشارة للصمام الكهرومغناطيسي بالفتح، مما يسمح بمرور وسيط التبريد من المستقبل إلى صمام التمدد، ومن ثم إلى المبخر، و يؤدي هذا إلى زيادة ضغط السحب.



شكل ١٠,١١ دورة خفض الضغط.

(ب) عند ارتفاع ضغط السحب ووصوله إلى قيمة معينة حسب تصميم حاكم ضغط السحب فإنه يقوم بإرسال إشارة للضاغط بالبدء في التشغيل، ويمكن استنتاج أن دائرة خفض الضغط وإيقاف الوحدة تتميز بالآتي:

(أ) كمية كبيرة لوسيط التبريد بالدائرة ويتم تخزين الزائد في مستقبل مائع التبريد.

(ب) وجود فترة زمنية قبل إيقاف الضاغط للحد من تكرار تشغيل وإيقاف الضاغط.

١٠,٥,١ مكونات أخرى في دائرة التبريد

منظم ضغط المبخر

يستخدم منظم ضغط المبخر للحفاظ على ضغط المبخر من الانخفاض إلى حده الأدنى، حتى تكون درجة حرارة المبخر تقريبا ثابتة، ولا تصل إلى درجات

حرارة منخفضة، ويوضع هذا المنظم قبل الضاغط. ويسمى بـ KVP تبعًا لشركة دانفوس [شركة دانفوس].

منظم ضغط المكثف

ويستخدم للمحافظة على ضغط المكثف عند مستوى ثابت، ويستخدم بكثرة في المناطق الباردة، وترمز شركة دانفوس له بـ KVR [شركة دانفوس].

منظم ضغط السحب (منظم حفظ صندوق المرفق)

ويوضع على خط السحب لوقاية الضاغط عند زيادة الحمل و ترمز شركة دانفوس له بـ KVL.

صمام لا عودة (لا مرجعي) NRV

وهو صمام يسمح بمرور وسيط التبريد في اتجاه واحد فقط.

صمام الضغط الفرقي (NRD)

ويستخدم لضمان ضغط كاف في خزان السائل (المستقبل).

ويوضح الشكل ١٠،١٢ دائرة تبريد مع مكوناتها لمخزين تبريد أحدهما عند درجة حرارة فوق الصفر والآخر تحت الصفر، وتظهر المنظمات المختلفة على الدائرة. وتتكون الدائرة من مكثف واحد، وخزان لوسيط التبريد، ومبخرين يعملان على التوازي، أحدهما عند درجة حرارة فوق الصفر المثوي (تبريد) والآخر تحت الصفر (تجميد). ويقوم الضاغط بسحب وسيط التبريد من المبخرين. وقبل دخول وسيط التبريد إلى الضاغط تم وضع منظم حفظ المرفق KVL لحماية موتور الضاغط من زيادة الحمل. ويغادر الغاز الساخن تحت الضغط العالي إلى المكثف، حيث يتم تكثيف وسيط التبريد، وفي نهاية المكثف وقبل دخول سائل التبريد إلى المستقبل تم وضع منظم ضغط المكثف KVR

لضمان ثبات ضغط المكثف. كما يوجد حول المكثف (بين نقطة دخول وسيط التبريد للمكثف والمستقبل) صمام NRD لضمان وجود ضغط كافٍ في المستقبل.

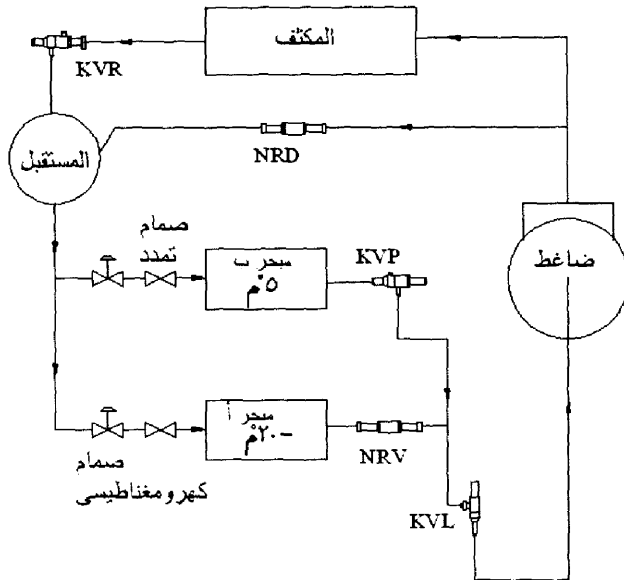
يتم تغذية المخزنين (أ) و(ب) من خزان وسيط التبريد عند درجتي الحرارة -٢٠ و ٥°م، وذلك من خلال صمام كهرومغناطيسي عند مدخل كل مبخر. يقوم كل صمام بتنظيم تدفق سائل وسيط التبريد إلى المبخر حسب درجة حرارة المبخر المطلوبة، حيث يرتبط عمل الصمام الكهرومغناطيسي بالفرق بين درجة حرارة المبخر ونقطة الضبط. يوجد صمام تمدد بعد الصمام الكهرومغناطيسي وقبل دخول الوسيط مباشرة إلى المبخر. ونظرًا لأن أحد المخزنين عند درجة حرارة -٢٠°م (ضغط متدني) لذلك لزم تركيب صمام غير رجعي NRV على خط الأنبوب الخارج من المبخر (أ). كما تم تركيب منظم لضغط المبخر (ب) كما هو واضح من الشكل ١٠،١٢. يتم خلط وسيط التبريد الخارج من المبخر (أ) و المبخر (ب)، ومن ثم يمر الوسيط على منظم KVL [شركة دانفوس].

١٠،٦ أجهزة القياس والاستشعار

لغرض التحكم يتم قياس بعض المتغيرات، مثل: درجة الحرارة، ورطوبة الهواء، والضغط في بعض تطبيقات التبريد وتكييف الهواء، وفيما يلي نستعرض بعض المجسات المستخدمة في قياس هذه المتغيرات [Holman 2001, Figliola et al. 2006]:

١٠،٦،١ مجسات قياس درجة الحرارة

يمكن قياس درجة الحرارة بعدة طرق سنبين بعضًا منها في ما يلي:

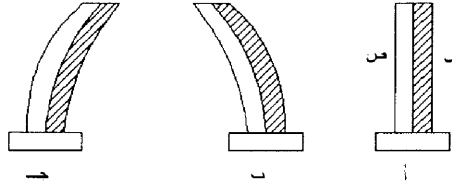


شكل ١٠، ١٢ منظمات ومحركات في دائرة تبريد بها مخزنين تبريد عند درجتي حرارة مختلفتين.

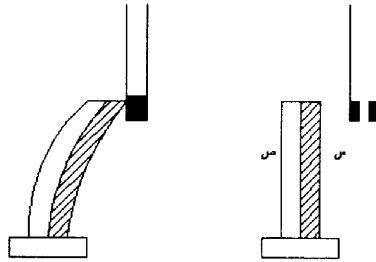
ثنائي المعدن (Bimetallic)

هنا يتم لصق معدنيين مختلفي معاملي التمدد عند درجة حرارة مرجعية T، حيث يكون لأحدهما معامل تمدد طولي كبير مقارنة بالآخر. فمثلاً بالرجوع إلى شكل ١٠،١٣ (أ)، نفترض أن معامل التمدد للمعدن (س) أكبر من معامل التمدد للمعدن (ص). عند تعرض هذا الثنائي إلى جو درجة حرارته مرتفعة. ينحني ثنائي المعدن نظراً لاختلاف معامل التمدد للمعدنين، كما يظهر في شكل ١٠،١٣ (ب). وكذلك عند تعرض الثنائي لدرجة حرارة منخفضة ينحني ثنائي المعدن كما يظهر في الشكل ١٠،١٣ (ج). ويستفاد من هذا التمدد في تمرير أو عزل التيار الكهربائي عن أي معدة. يوضح الشكل ١٠،١٤ تطبيقاً لاستخدام ثنائي المعدن في إيقاف أو تشغيل ضاغط على سبيل المثال. نظراً لكثرة الحالات

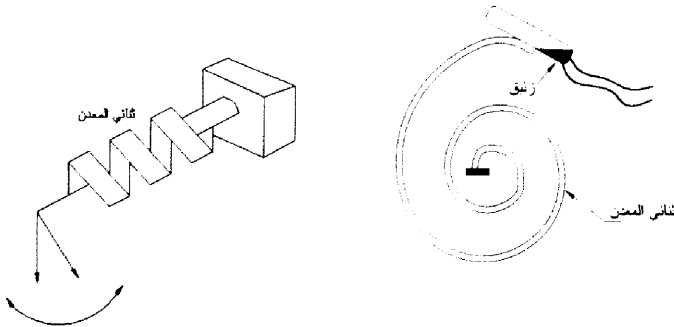
التي يتم فيها التحكم في درجات الحرارة، فهناك أنواع مختلفة من الثرموستات، ويبين الشكلان ١٠,١٤ و ١٠,١٥ أنماط مختلفة للثرموستات [Figliola *et al.* 2006].



شكل ١٠,١٣ ثنائي المعدن.



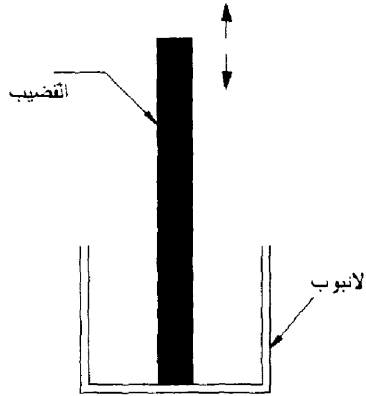
شكل ١٠,١٤ استخدام ثنائي المعدن في إيقاف أو تشغيل موتور كهربائي.



شكل ١٠,١٥ أشكال أخرى للثرموستات باستخدام ثنائي المعدن.

القضيب والأنبوب

يتكون هذا المجس من أنبوب ذي معامل تمدد كبير، وقضيب معدني ذي معامل تمدد صغير. عند تعرض الأنبوب لدرجة حرارة مختلفة عن القيمة المرجعية، فإن تمدد أو انكماش الأنبوب يؤدي إلى تحرك القضيب. يتم الاستفادة من حركة القضيب في التحكم. يوضح الشكل ١٠،١٦ فكرة عمل هذا النوع من مجسات درجة الحرارة.

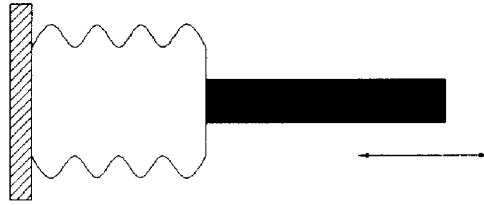


شكل ١٠،١٦ فكرة عمل مجس درجة الحرارة من نوع الأنبوب والقضيب.

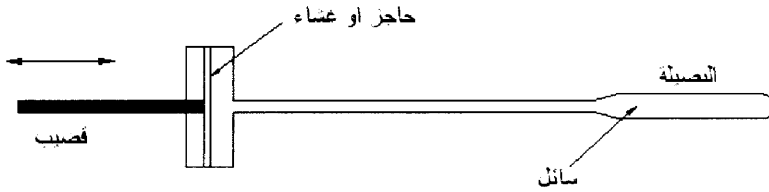
المنفاخ والبصيلة (Bellow & Bulb)

هنا يتم ملء منفاخ بسائل أو بخار ويتم توصيل المنفاخ بقضيب. عند تعرض المنفاخ لدرجات حرارة مرتفعة، يتمدد المنفاخ مما يؤدي إلى تحرك القضيب، انظر الشكل ١٠،١٧. ويمكن أيضا استخدام بصيلة متصلة بمنفاخ وقضيب أو يتم توصيلها بغشاء (حاجز) وقضيب، كما هو موضح في شكل

١٠،١٨ [أساسيات التحكم، Althouse et al. 1992].



شكل ١٠,١٧ قياس درجة الحرارة باستخدام المنفاخ.

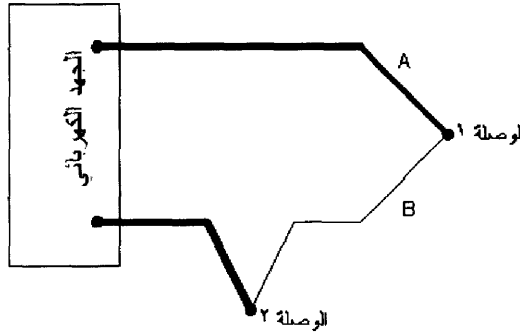


شكل ١٠,١٨ قياس درجة الحرارة باستخدام البصيلة.

الازدواج الحراري (Thermocouple)

عند توصيل طرفي معدنين مختلفين وتعرض هذه الوصلة لدرجة حرارة مختلفة عن وصلة الطرفين الآخرين، فإنه يتولد جهد (حث) كهربائي يتناسب مع الفرق في درجتي الحرارة. وبسبب هذه العلاقة المميزة بين الجهد الكهربائي ودرجة الحرارة يسمى هذان المعدنان بالازدواج الحراري الذي يعرف أيضا في بعض الأحيان بالسلك الكهروحراري. وكما موضح في شكل ١٠,١٩ توضع الوصلة الأولى في الموضع المراد قياس درجة الحرارة وتحفظ الوصلة الأخرى عند درجة حرارة مرجعية (في العادة تستخدم درجة حرارة صفر مئوي أو درجة تجمد الماء) ويكون الجهد المقاس متناسبا مع الفرق بين درجتي الحرارة.

$$(T_2 - T_1).$$



شكل ١٠،١٩ الازدواج الحراري.

ويوجد أنواع مختلفة من الازدواجات الحرارية تعمل عند مدى مختلف لقياس درجات الحرارة وبدقة متفاوتة. يبين الجدول ١٠،١ بعض أنواع الازدواجات الحرارية المستخدمة تجارياً والمدى المقترح لاستخدامها والطرف الموجب لكل منها. ومن المعروف تميز كل نوع تجاري مستخدم من الازدواجات الحرارية بحرف مميز. فعلى سبيل المثال يعرف الازدواج الحراري المكون من النحاس والكونستانتان بالنوع T، انظر الجدول ١٠،١.

وتستخدم الازدواجات الحرارية بكثرة في مختلف التطبيقات الهندسية والصناعية.

جدول ١٠،١ بعض خواص والمدى الحراري لبعض الازدواجات الحرارية [Figliola *et al.*, 2006].

النوع	المعدنان المكونان للازدواج	الطرف الموجب	مدى درجة الحرارة المقترح للاستخدام
E	كروميل-كونستانتان	كروميل	أقل من ١٠٠٠°م
J	حديد - كونستانتان	حديد	أقل من ٧٦٠°م
K	كروميل-الوميل	كروميل	أقل من ١٣٧٠°م
S	بلاتين ١٠٪ راديوم - بلاتين	بلاتين ١٠ راديوم	أقل من ١٧٦٨°م
T	نحاس-كونستانتان	نحاس	أقل من ٤٠٠°م

قياس درجة الحرارة باستخدام المقاومة الحرارية (RTD)

تتغير مقاومة الموصل الكهربائي مع درجة الحرارة، ولذلك يمكن عن طريق قياس المقاومة الكهربائية معرفة درجة الحرارة. فعند استخدام مواد تزداد مقاومتها الكهربائية مع درجة الحرارة، يمكن تقريب العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة الكهربائية بالمعادلة الآتية

$$R = R_0(1 + \alpha T) \quad (10.4)$$

حيث R_0 هي مقاومة السلك عند درجة حرارة مرجعية T_0 ، و α هي معامل درجة الحرارة بالنسبة للمقاومة. وتعتمد α على نوع المعدن المستخدم، فمثلاً تساوي $0.003927 (1/^\circ\text{M})$ للبلاتين، ويمكن الرجوع لأحد مراجع القياسات الحرارية [Holman 2001, Beckwith and Marangoni 1990] للمزيد من المعلومات حول قياس درجة الحرارة عن طريق قياس المقاومة الكهربائية.

الثيرمستور (Thermistor)

يتكون الثيرمستور من مادة شبه موصلة - مثل السيرميك - حيث تقل مقاومة هذه المادة مع ارتفاع درجة الحرارة (على عكس RTD). ويستخدم الثيرمستور عند الرغبة في قياس درجة الحرارة بسرعة استجابة أكبر من تلك الخاصة بمجس RTD. وتبين المعادلة الآتية العلاقة بين المقاومة الكهربائية ودرجة الحرارة

$$R = R_0 e^{(1/T - 1/T_0)} \quad (10.5)$$

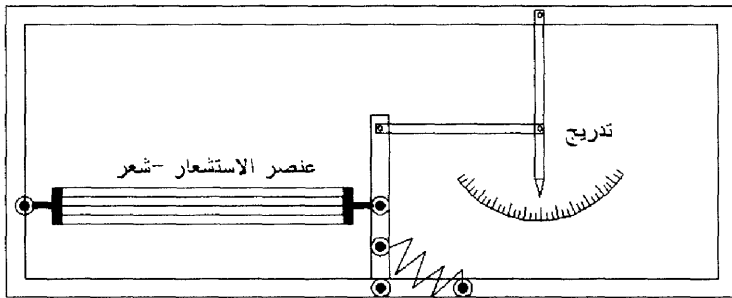
حيث R_0 هي مقاومة الثيرمستور عند درجة حرارة مرجعية T_0 . ويلزم أن تكون T و T_0 بالدرجة المطلقة.

١٠,٦,٢ قياس الرطوبة النسبية للهواء

كما سبق الحديث في الفصل الثالث، يتكون الهواء الرطب من الهواء الجاف (الغازات المختلفة مثل: الأكسجين وثنائي أكسيد الكربون وغيرهما) وبخار الماء. عندما تصل كمية بخار الماء في الهواء إلى الحد الأقصى يصبح الهواء مشبعاً (أي إن الرطوبة النسبية تساوي ١٠٠ ٪، وعندما يكون الهواء جافاً لا يحتوي على بخار ماء فإن الرطوبة النسبية تساوي ٠ ٪. ويعرف الجهاز الذي يقيس الرطوبة النسبية بالهيجروميتر (Hygrometer).

يمكن قياس الرطوبة النسبية للهواء باستخدام مواد تتغير خواصها مع تغير الرطوبة. وتقسم أجهزة قياس الرطوبة النسبية إلى أجهزة تستخدم تغير الخواص الميكانيكية، وتسمى الهيجروميتر الميكانيكية، وأجهزة تسمى هيجروميتر إلكترونية، حيث يتم الاستفادة من تغير الخواص الكهربائية مثل المقاومة (resistance) أو السعة (capacitance) مع الرطوبة النسبية.

يستخدم الهيجروميتر الميكانيكي مادة تتمدد بارتفاع نسبة الرطوبة مثل شعر الإنسان أو شعر الحيوان أو الخشب أو النايلون. و يوضح الشكل ١٠,٢٠ فكرة عمل الهيجروميتر الميكانيكي [أساسيات التحكم].



شكل ١٠,٢٠ فكرة عمل الهيجروميتر الميكانيكي.

يتوفر حالياً أنواع إلكترونية ومتحركة لقياس الرطوبة تعتمد على تغير المقاومة الكهربائية أو السعة الكهربائية مع نسبة الرطوبة. تستخدم هذه الأجهزة لقياس الرطوبة النسبية مباشرة أو تسجيل تغيرها مع الزمن، وينبغي الإشارة إلى أنه يمكن قياس الرطوبة النسبية عن طريق قياس أي درجتين من درجات الحرارة الآتية: درجة حرارة البصيلة المبتلة، ودرجة حرارة البصيلة الجافة، ودرجة حرارة نقطة الندى، ومن ثم إرسال إشارة بقيمة الرطوبة النسبية.

١٠,٦,٣ أجهزة قياس الضغط

يتم قياس الضغط الجوي بالباروميتر (Barometer) وأبسط أشكاله عبارة عن أنبوب مفتوح من أحد جانبيه يملأ بسائل له كثافة معينة ثم يغمس مقلوبا في نفس السائل بدون أن نعرض الجانب المفتوح للهواء. يصبح ارتفاع السائل في الأنبوب عبارة عن قياس للضغط للجو باستخدام المعادلة

$$P = \rho gh \quad (10.6)$$

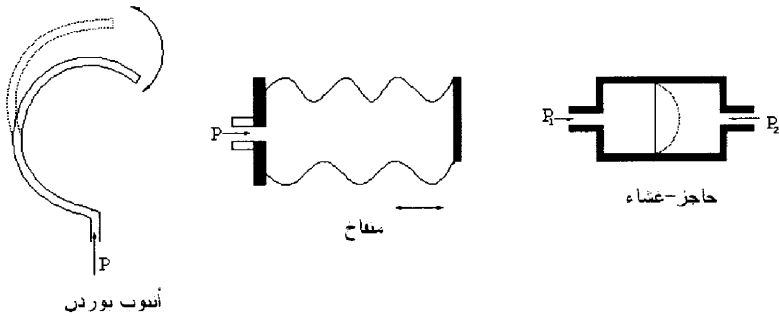
حيث ρ كثافة السائل، و g عجلة الجاذبية الأرضية، و h ارتفاع السائل في الأنبوب.

ويمكن أيضا قياس فرق الضغط باستخدام المانوميتر (Manometer)، وهو ببساطة أنبوب على شكل حرف U. توصل فتحة أحد الساقين لضغط معروف والآخر يوضع في المكان المراد قياس ضغطه.

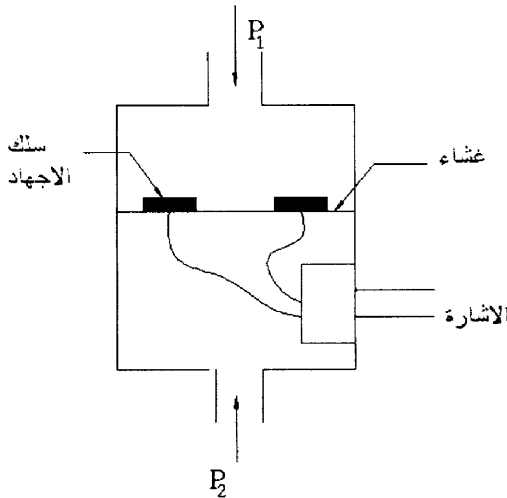
وفيما يخص التحكم فإن أجهزة قياس الضغط تؤدي إلى حركة مرنة. يوضح الشكل ١٠,٢١ بعضاً من أشكال الأجهزة التي تستخدم لقياس الضغط [Figliola et al. 2006].

ويعتبر سلك الانفعال (strain gauge) واحداً من أجهزة قياس الضغط الشائعة الاستخدام. ويعمل هذا الجهاز على ترجمة الحركة بسبب فرق الضغط

إلى إشارة كهربائية (فولت أو تيار). وبين الشكل ١٠,٢٢ جهاز قياس للضغط عبارة عن غشاء معرض جانبيه لضغطين مختلفين، ويستخدم سلك الانفعال لتوليد إشارة كهربائية تتناسب مع الفرق في الضغطين، وذلك تبعا لحركة الغشاء الفاصل بين الضغطين.



شكل ١٠,٢١ بعض أجهزة قياس الضغط.



شكل ١٠,٢٢ جهاز قياس الضغط باستخدام سلك الإجهاد.

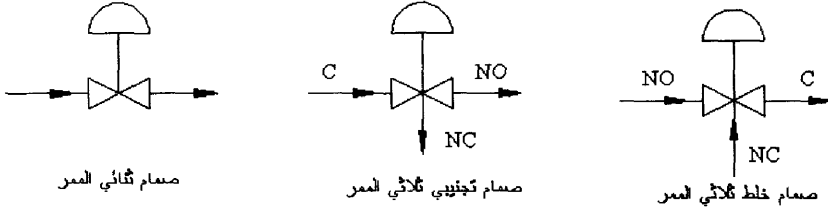
١٠,٧ أجهزة التحكم (Controlled Devices)

يرسل الحاكم إشارة إلى جهاز التحكم الذي يعمل للوصول بالمحكوم إلى قيمة نقطة الضبط. تقسم أجهزة التحكم تبعاً لوسيط التحكم إلى عدة أقسام. تصل إشارة التحكم إلى المحرك أو المحفز (actuator) الذي يقوم فعليا إما عن طريق هواء مضغوط أو شغل كهربائي بتحريك أداة التحكم. في الغالب يكون وسيط التحكم إما سائل أو غاز. بالنسبة للسوائل وبخار الماء يمكن استخدام أحد أنواع الصمامات الآتية [Stoecker 1981]:

- صمام ثنائي الممر (two way valve)
- صمام خلط ثلاثي الممر (mixing three way valve)
- صمام تجنيبي ثلاثي الممر (diverting three way valve)

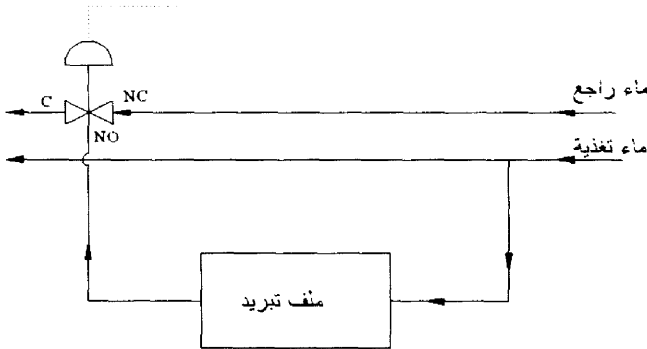
يبين شكل ١٠,٢٣ صمام ثنائي الممر أحدهما للدخول والآخر للخروج، أي إن السريان في اتجاه واحد. ويوضح شكل ١٠,٢٣ صمام خلط ثلاثي الممر له فتحتين للدخول وفتحة للخروج، ويتم خلط سريانين من وسيط التحكم للحصول على معدل السريان المرغوب فيه عند فتحة الخروج حسب إشارة التحكم التي يتلقاها الصمام. ويتم تميز حالة كل فتحة بالصمام عادة بأي من الحالات التالية: مقفول بالعادة (NC= Normally Closed)، ومفتوح بالعادة (NO= Normally Open)، ومشارك (C= Common). ففي الشكل ١٠,٢٣ للصمام الخلط ثلاثي الممر، فإن أحد فتحتي الدخول للصمام تكون غالبا مفتوحة (NO) والأخرى مغلقة (NC) أما فتحة الخروج فتكون مفتوحة (C). وفي حالة عدم وصول أي إشارة من الحاكم للصمام فإن السريان يكون بين الفتحة (NO) والمشارك (C). وإذا استقبل الصمام إشارة بالتحرك، فإن مشغل الصمام (actuator) يتحرك لكي يتم خلط سريانين من فتحتي الدخول. يبين الشكل ١٠,٢٣ أيضا النوع الثالث من الصمامات وهو صمام تجنيبي ثلاثي الممر،

حيث يقوم هذا الصمام بتوزيع السريان القادم من فتحة الدخول إلى مخرجين حسب إشارة الحاكم.

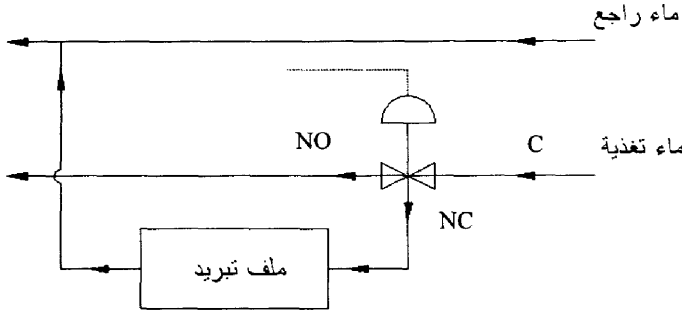


شكل ١٠,٢٣ أنواع صمامات التحكم في سريان السائل أو البخار.

كتطبيق على استخدام صمام الخلط ثلاثي الممر، يوضح الشكل ١٠,٢٤ ملف تبريد، حيث تم تركيب هذا النوع من الصمامات عند خروج الماء المتلج من الملف. يقوم الحاكم بالتحكم في الصمام لتمرير الكمية المرغوبة من الماء في الملف. لاحظ أن صمام الخلط تم تركيبه على خط الماء المتلج الراجع. بالمثل يمكن تركيب صمام تجنيبي ثلاثي الممر على خط ماء التغذية للملف، كما يوضح الشكل ١٠,٢٥، كي يؤدي نفس الغرض وهو التحكم في كمية الماء المتلج المار في ملف التبريد [Stoecker 1982].

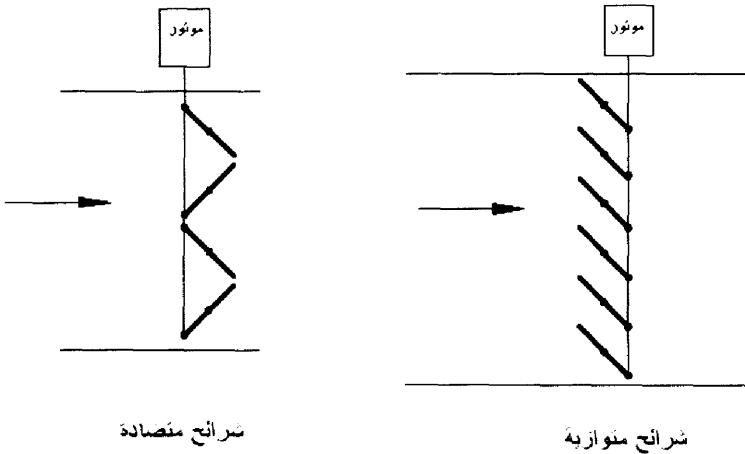


شكل ١٠,٢٤ تطبيق على استخدام صمام خلط ثلاثي الممر.



شكل ١٠،٢٥ تطبيق على استخدام صمام تجنيبي ثلاثي الممر.

يستخدم خائق الهواء (air damper) للتحكم في سريان الهواء. تقسم الخانقات حسب اتجاه الشرائح المصنوعة إلى خانقات بشرائح متوازية و خانقات بشرائح متضادة. يوضح الشكل ١٠،٢٦ هذين النوعين. وفي العادة تستخدم خانقات الهواء زوات الشرائح المتضادة للتحكم المتغير في سريان الهواء، بينما تستخدم الخانقات من نوع الشرائح المتوازية في قفل وفتح سريان الهواء.



شكل ١٠،٢٦ خانقات الهواء.

١٠،٨ التحكم الرقمي

صاحب التقدم التقني المتسارع في مجالي الكمبيوتر والاتصال نموًا في القياسات والتحكم على مختلف المجالات والأصعدة، ومنها مجال التبريد وتكييف الهواء، واستخدم الكمبيوتر في العديد من مجالات التحكم، مما يسمح بمشاهدة وتغيير المتغيرات المختلفة، بل إن التحكم الرقمي شمل إدارة المنشأة (أو المبنى) بكل عناصره من تكييف وحراسة ومساعد وأجهزة إنذار.

يعتبر المايكروبروسيسور هو العقل المدبر للكمبيوتر، إذ يتم عن طريقه استقبال الإشارة وتخزين البرنامج وتنفيذ الأوامر. ولأن المايكروبروسيسور لا يعرف إلا لغة الأرقام وبالأخص واحد وصفر، فإنه يلزم تحويل جميع الإشارات المتماثلة أو المتناظرة (analog) إلى إشارات رقمية (digital). ويبين الشكل ١٠،٢٧ [السيد وآخرون ١٩٩٤م] الأجزاء الرئيسية لنظام تحكم رقمي. وفيما يلي شرح لبعض المكونات الرئيسية مثل:

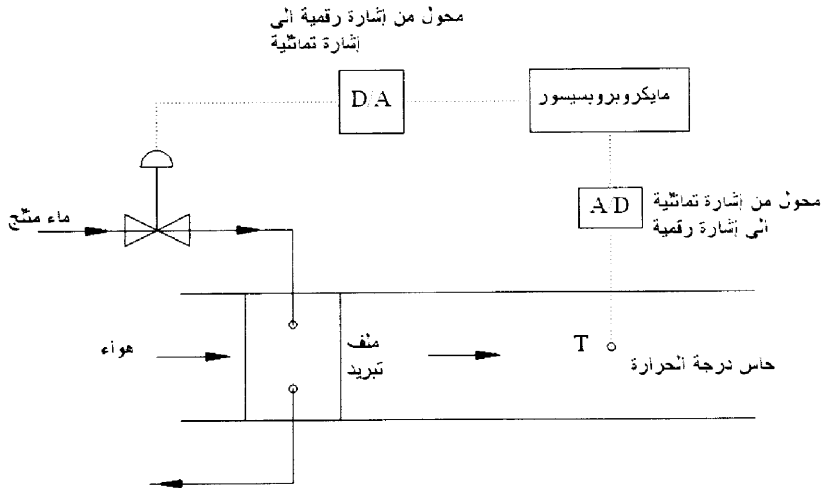
أ) المايكروبروسيسور (microprocessor) وهو شريحة إلكترونية بها عدد كبير من الترانزستورات والدوائر الإلكترونية (transistors). ويمكن برمجة المايكروبروسيسور وحفظ البرنامج فيه، كما أن المايكروبروسيسور يستقبل إشارات ولديه القدرة على إرسال إشارات خارجية.

ب) محول من إشارة تماثلية إلى إشارة رقمية (analog/digital converter).

ج) محول من إشارة رقمية إلى إشارة تماثلية (digital/analog converter).

د) إشارات داخلية وخارجة (input/output singles).

في الشكل ١٠,٢٧ يتم التحكم في صمام المياه المثلجة لملف التبريد بناء على درجة حرارة الهواء الخارجة من ملف التبريد ومقارنتها مع نقطة الضبط. وحيث إن المايكروبروسيسور يستقبل ويرسل إشارات رقمية فقط، فإنه عند قياس درجة حرارة الهواء الخارج من ملف التبريد، وهي إشارة تماثلية، يتم تحويلها إلى إشارة رقمية باستخدام محول من إشارة تماثلية إلى إشارة رقمية (analog/digital converter). ويستقبل المايكروبروسيسور أيضا إشارة نقطة الضبط، وبعد مقارنة القيمتين وحسب برمجة المايكروبروسيسور يرسل إشارة رقمية لموجهة التحكم، ولكن قبل وصول هذه الإشارة إلى موجه التحكم يجب تحويل هذه الإشارة إلى إشارة تماثلية، لذلك يستخدم محول من إشارة رقمي إلى إشارة تماثلية (digital/analog converter).



شكل ١٠,٢٧ المكونات الرئيسية لدائرة التحكم الرقمي (السيد وآخرون ١٩٩٤م).

ينبغي الإشارة إلى أنه توجد أنواع مختلفة من المايكروبروسيسورات وتشارك في الخواص التالية:

(أ) له قدرة على تخزين البرنامج، ويمكن إعادة البرمجة حسب الحاجة.

ب) تختلف عدد الإشارات الداخلة والخارجة من مايكروبروسيسور إلى آخر.

ج) قد يكون محول الإشارة من و إلى تماثلي/ رقمي مبني كجزء من المايكروبروسيسور.

د) يمكن ربط عدد من المايكروبروسيسورات مع بعضها الآخر.

هـ) برمجة المايكروبروسيسور ممكن عن طريق ربطه بشاشة ولوحة مفاتيح أو خلافه.

وهناك تزايد مستمر في تطبيق التحكم الرقمي في التكيف المباني وإدارتها، وفي كافة التطبيقات الصناعية التي بها عمليات تحكم ومتابعة وسيطرة. وأيضا في مخازن التبريد. وتزداد الحاجة للتحكم الرقمي في مخازن التبريد كلما كبر عدد مخازن التبريد واختلفت درجات حرارتها مع وجود محطة تبريد مركزية بها المعدات الميكانيكية. في هذه الحالة يمكن متابعة والتحكم في درجات الحرارة في كل المخازن من موقع مركزي واحد، ويشمل ذلك تشغيل وإيقاف الوحدات، والتحكم في درجات الحرارة، والتحكم في تشغيل دورة إذابة الصقيع.

الرموز ومعانيها للفصل العاشر

A	ثابت خارج أداة التحكم
e	الحيود أو الخطأ
K	ثابت التحكم
O	ناتج أداة التحكم
R	المقاومة عند درجة الحرارة T [أوم]
R_o	المقاومة عند درجة الحرارة المرجعية T_o [أوم]
T_r	درجة حرارة الغرفة الداخلية [°م]

التذييل

D	اشتقاقي
I	تكاملي
o	عند درجة الحرارة المرجعية T_o
P	تناسبي

الحروف الإغريقية

α	معامل تغير درجة الحرارة مع المقاومة الكهربائية [١/°م]

الفصل الحادي عشر

العزل الحراري وحاجز البخار

١١,١ مقدمة

يعتبر العزل الحراري من أهم العناصر التي تؤثر مباشرة في اقتصاديات تشغيل غرف التبريد. وبالرغم من وجود العديد من العوازل الحرارية إلا أن القليل منها الذي يستخدم في غرف التبريد. أيضاً، يحتاج تركيب حاجز بخار الماء وصيانته في غرف التبريد إلى الكثير من اهتمام مهندس التصميم والتركيب والصيانة.

نقدم في الفصل الحالي الأنواع المختلفة من العوازل الحرارية المستخدمة في غرف التبريد والعوامل التي تدخل في المفاضلة بين هذه العوامل. كما نقدم بعد ذلك عرضاً مختصراً لحساب الحمل الحراري المنقول سنوياً خلال العازل إلى غرفة التبريد. ولاختيار سمك العازل الحراري، نقدم طريقتين لذلك. في الطريقة الأولى يحسب السمك الاقتصادي للعازل، أي السمك الذي يعطي أقل تكلفة سنوية، وتشمل هذه التكلفة : تكلفة شراء وتركيب العازل وتكلفة الطاقة الكهربائية اللازمة لإزالة الحمل الحراري المنقول إلى غرفة التبريد خلال العازل. وفي الطريقة الثانية، يحسب سمك العازل تبعاً للقيم الموصى بها في الحقل الهندسي عند تصميم غرف التبريد. وتعتمد هذه الطريقة على درجة حرارة غرفة التبريد فقط.

يشمل الجزء الأخير من الفصل الحالي عرضاً لأهمية حاجز البخار في غرفة التبريد واختياره وطرق تركيبه والاحتياطات الهندسية اللازمة لذلك. ونقدم

في آخر الفصل عرضًا لألواح العزل الحراري سابقة التصنيع التي أصبحت مؤخرًا شائعة الاستخدام في غرف التبريد.

١١,٢ العوازل الحرارية المستخدمة في غرف التبريد

هناك العديد من العوازل الحرارية التي استخدمت في الماضي، والتي تستخدم حاليًا في غرف التبريد. وتستخدم العوازل الحرارية لتقليل تأثير العوامل الخارجية المحيطة على حمل التبريد. فمن المعروف أن الحرارة المنقولة خلال حوائط وسقف وأرضية غرف التبريد تمثل جزءًا من هذا الحمل. وباستخدام عزل حراري بالحوائط والسقف والأرضية يقل جزء حمل التبريد المنقول خلال هذه الأسطح، مما يساعد على توفير الطاقة المستخدمة بنظام التبريد. وبزيادة المقاومة الحرارية للعزل الحراري المستخدم، يزيد توفير الطاقة. ويمتاز العزل الحراري بفوائد جانبية أخرى بالإضافة إلى توفير الطاقة. فمثلاً، يساعد استخدام العزل الحراري على رفع درجة حرارة السطح الخارجي للحائط أو السقف إلى درجة حرارة أعلى من درجة حرارة نقطة الندى للجو المحيط، مما يمنع تكثف بخار الماء الموجود بالهواء الخارجي على هذه الأسطح. كما تساعد هذه العوازل إذا كان اختيارها صحيحاً، على الحماية من انتشار الحرائق إذا ما شب حريق بأحد غرف التبريد. وتعمل العوازل أيضاً في بعض الأحيان، كحاجز لانتقال بخار الماء والهواء من غرف التبريد إلى الخارج، وبالعكس، مما يساعد أيضاً على خفض حمل التبريد.

ويفضل عند اختيار عازل غرفة تبريد أن يكون له المميزات الآتية:

(أ) أن يكون معامل التوصيل الحراري منخفضاً.

(ب) أن يكون خفيف الوزن.

(ج) أن يكون منخفض التكلفة.

- (د) ألا يسمح بانتشار النيران إذا ما شب حريق.
- (هـ) ألا يسبب أي تلوث بالهواء المحيط به، مما قد يسبب تلف المواد المحفوظة بغرفة التبريد أو أن يسبب ضرراً بالصحة العامة.

وبالطبع هناك العديد من العوازل التي يتوفر بها المميزات السابقة بدرجات متفاوتة. ويعتبر الفلين من أهم العوازل الحرارية التي استخدمت لفترات طويلة في الماضي لعزل غرف التبريد. أيضاً، استخدمت نشارة الخشب في الماضي في العديد من غرف التبريد. إلا أنه استخدمت في السنوات الأخيرة منتجات البوليمرات، مثل البوليسترين والبوليورثين لعزل غرف التبريد بنجاح وأصبحت هي الأكثر استخداماً في معظم الأحوال. وتتوفر هذه البوليمرات في عدة صور، منها ما يأتي على شكل ألواح صلبة، ومنها ما يتم صبه بالموقع بالمكان المطلوب عزله حرارياً.

ويبين جدول ١١،١ قيمة الموصلية الحرارية لأهم العوازل الحرارية المستخدمة في مخازن التبريد [Raznjevic 1976, ASHRAE 1993].

١١،٣ انتقال الحرارة خلال العازل الحراري

من أهم الصعوبات التي يواجهها مصمم غرف التبريد هي اختيار سمك العزل الحراري المناسب للتطبيق. وللتعرف على هذه المشكلة دعنا نرجع إلى الفصل السابع، حيث قدمنا كيفية حساب حمل التبريد الناتج عن انتقال الحرارة بالحوائط والأسقف والأرضية. ويعطى هذا الحمل خلال سطح ما كما يلي:

$$\dot{Q} = UA\Delta T \quad (11.1)$$

حيث U هي المعامل الكلي لانتقال الحرارة خلال السطح، و A هي مساحة السطح تحت الدراسة، و ΔT هي فرق درجات الحرارة بين خارج الغرفة

وداخلها. ولقد بينا أيضًا أن U تعطى بدقة مقبولة إذا تم إهمال المقاومات الحرارية ماعدا المقاومة الحرارية بسبب العزل الحراري أي:

$$U = k_i / x_i \quad (11.2)$$

جدول ١١.١ الموصلية الحرارية لبعض أنواع العوازل الحرارية عند صفر م°
(Raznjevic 1976, ASHRAE 1993).

المادة	الكثافة كجم / م ^٣	الموصلية الحرارية وات / م.م°
ألياف زجاجية (glass fiber)	٧٢-٥٦	٠,٠٣٩ - ٠,٠٣٨
بوليسترين مشكل باليثق (expanded polystyrene extruded)	٥٦ - ٢٩	٠,٠٢٩
بوليسترين مشكل بالقوالب expanded polystyrene, molded) (beads	١٦٠	٠,٠٣٧
	٢٠	٠,٠٣٦
	٢٤	٠,٠٣٥
	٢٨	٠,٠٣٥
	٣٢	٠,٠٣٣
بوليوريثين رغوي (polyurethane foam)	٤٠ - ٢٤	٠,٠٢٦ - ٠,٠٢٣
صوف زجاجي (Glass wool)	٥٠	٠,٠٣٧
فلين (ألواح) ، (cork ponds)	١٥٥	٠,٠٤١
قطن	٨١	٠,٠٥٦
نشارة خشب	٢٠٠	٠,٠٥٨

حيث k_i (وات / م.م°) هي الموصلية الحرارية للعازل و x_i (متر) هي سمكه. وتكمن صعوبة حساب القيمة السنوية للحرارة المنتقلة خلال العازل في تغير درجات الحرارة خارج غرفة التبريد من ساعة إلى ساعة خلال السنة. و تقدر الحرارة المنتقلة خلال العازل عند أي ساعة في اليوم من العلاقة التالية:

$$\dot{Q}_i = UA(T_i - T_R) / 1000 \quad (11.3)$$

حيث T_i هي متوسط درجة الحرارة الخارجية خلال الساعة و T_R هي درجة حرارة غرفة التبريد. لاحظ في المعادلة السابقة أنه تمت القسمة على ١٠٠٠

لتكون وحدات $\dot{Q}_i$ بالكيلووات. وبالطبع تكون قيمة موجبة في المعادلة السابقة إذا كانت T_i أعلى من T_R فيما يعني انتقال الحرارة إلى غرفة التبريد، أما إذا قلت درجة الحرارة T_i عن T_R فإن قيمة $\dot{Q}_i$ تصبح سالبة، مما يعني انتقال الحرارة من غرفة التبريد إلى الخارج.

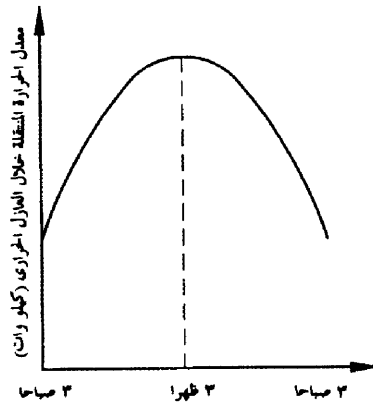
ويبين شكل ١١,١ تغير قيمة $\dot{Q}_i$ مع الساعة خلال اليوم. وتعطى إجمالي الطاقة الحرارية المنتقلة خلال العازل الحراري في اليوم كما يلي:

$$Q = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{24} UA(T_i - T_R) \quad (11.4)$$

حيث U بوحدات (وات / م^٢ . م^٠) و A بوحدات (م^٢) و Q بوحدات (كيلووات-ساعة). فإذا فرضنا للسهولة أن اليوم تحت الدراسة، هو اليوم المتوسط للشهر، فإن إجمالي الطاقة الحرارية Q المنتقلة خلال العازل في السنة تعطى كما يلي:

$$Q_y = \sum_{j=1}^{12} N_j \sum_{i=1}^{24} \frac{UA(T_{i,j} - T_R)}{1000} \quad (11.5)$$

حيث تمثل N_j عدد الأيام في الشهر، ويمثل التذييل j ترتيب الشهر في السنة.



شكل ١١,١ مثال لتغير معدل الحرارة المنتقلة خلال عازل من خارج غرفة تبريد إلى داخلها مع الساعة خلال اليوم.

١١,٤ السمك الاقتصادي للعازل الحراري

بزيادة سمك العزل الحراري تتخفض قيمة معامل انتقال الحرارة U ، وبالتالي تقل الحرارة المنقولة خلاله سنوياً، مما يعني توفير الطاقة اللازمة لتشغيل ماكينة التبريد، إلا أن زيادة سمك العزل الحراري يعني زيادة تكلفته الأولية، لذا يلزم على المصمم الموازنة بين التكلفة الأولية للعازل وتكلفة تشغيل ماكينة التبريد، وسنوضح في الجزء التالي الطريقة المتبعة لذلك.

تمثل التكلفة الأولية للعازل ثمن شراء العازل وتكاليف تركيبه. لاختيار عازل بسمك ما، دعنا نفرض أن تكلفته الأولية هي I دولار أمريكي* وأن العمر الافتراضي لهذا العازل هو n سنة، عندئذ تقدر التكلفة السنوية C_i (دولار أمريكي) كما يلي:

$$C_i = I \frac{s(1+s)^n}{(1+s)^n - 1} \quad (11.6)$$

حيث s هي المعدل السنوي لغلاء الأسعار (كرقم عشري). بزيادة سمك العازل الحراري تزيد قيمة التكلفة الأولية I ، إلا أن هذه الزيادة لا تكون خطية، لذا يلزم أن يرجع المصمم إلى مصنعي العوازل الحرارية وإلى مقاولي الأعمال الهندسية لمعرفة التكلفة الأولية لها. ويبين الشكل ١١,٢ علاقة تغير التكلفة السنوية للعازل مع تغير السمك.

نفرض الآن أن ماكينة التبريد المستخدمة لها معامل أداء قدره COP، عندئذ تحتاج هذه الماكينة إلى طاقة كهربائية W_e (كيلووات- ساعة) لإزالة

* تم اختيار العملة هنا دولار أمريكي للتوضيح فقط، ولسهولة التحويل من عمله إلى أخرى.

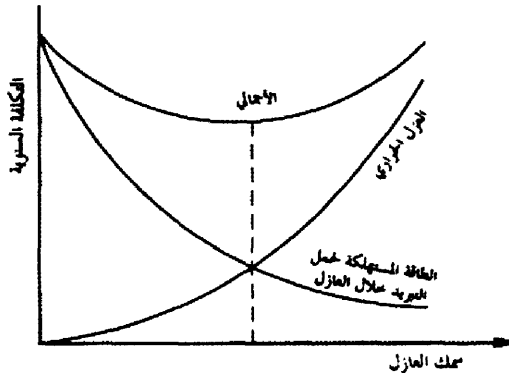
الحرارة المنتقلة إلى غرفة التبريد خلال العازل الحراري. وتقدر قيمة W_e من العلاقة الآتية:

$$W_e = Q_y / COP \quad (11.7)$$

فإذا كانت تكلفة الطاقة الكهربائية في موقع غرفة التبريد هو F (دولار/كيلووات - ساعة) فإن التكلفة السنوية للطاقة الكهربائية المناظرة للحمل الحراري خلال العازل هي:

$$C_e = F Q_y / COP \quad (11.8)$$

ويوضح شكل ١١,٢ تغير التكلفة السنوية C_e للطاقة المستهلكة لحمل التبريد خلال العازل. ونلاحظ انخفاض هذه التكلفة بزيادة سمك العازل. وتكون التكلفة السنوية المناظرة للعازل هي إجمالي التكلفة السنوية للعازل والتكلفة السنوية للطاقة المستهلكة لحمل التبريد خلال العازل، أي إن:



شكل ١١,٢ تغير التكلفة السنوية لحمل التبريد المنتقل خلال العازل الحراري، والتكلفة السنوية للعازل الحراري والتكلفة السنوية الكلية مع سمك العازل الحراري.

$$C_t = C_i + C_e \quad (11.9)$$

ويبين شكل ١١,٢ تغير التكلفة الإجمالية مع سمك العازل. ويظهر من الشكل وجود سمك أمثل للعازل، حيث تكون التكلفة الإجمالية عند أدنى قيمة لها.

كما بينا سابقاً، بزيادة سمك العازل الحراري تزيد تكلفته الأولية، إلا أن هذه الزيادة يصاحبها انخفاض تكلفة الطاقة الكهربائية اللازمة لإزالة الحمل الحراري. من هنا، نعرف عدد السنوات Y التي تسترد فيها الزيادة في تكلفة العزل الحراري نتيجة الوفرة في تكلفة الطاقة الكهربائية كما يلي:

$$Y = \frac{I - I_{ref}}{(C_e)_{ref} - C_e} \quad (11.10)$$

حيث التذييل ref يعنى القيمة الاسنادية، أي عند السمك الابتدائي للعازل الحراري.

١١,٥ استخدام الحاسب الآلي لحساب السمك الاقتصادي للعازل الحراري

بيننا في الجزء ١١,٣ طريقة حساب مقدار الحمل الحراري السنوي Q_y المنتقل إلى غرفة التبريد سنوياً. كما بينا ضرورة معرفة درجة الحرارة الخارجية عند كل ساعة خلال اليوم المتوسط لكل شهر. وقد يكون هذا غير متاح لمهندس التصميم في بعض الأماكن. ويمكن لمهندس التصميم التغلب على هذه الصعوبة باستخدام العلاقة التقريبية الآتية:

$$T = \bar{T} + \frac{1}{2} \Delta T \cos\{15(t-15)\} \quad (11.11)$$

حيث T (°م) هي درجة الحرارة الخارجية عند الساعة t خلال اليوم، و $\bar{T}$ (°م) هي درجة الحرارة المتوسط لليوم، و ΔT (°م) هي المدى اليومي لتغير درجة الحرارة.

وبين شكل ١١,٣ برنامج INSUL.FOR لحساب السمك الاقتصادي للعازل الحراري باستخدام المعادلات السابقة. ويحتاج البرنامج إلى ملف لإدخال بيانات التشغيل، ويسمى هذا الملف INSUL.IN. وتوضع نتائج تشغيل البرنامج في ملفين. الملف الأول هو INSUL.OUT ويحوي نتائج حسابات الحمل الحراري لكل شهر عند سماكات مختلفة للعازل الحراري. والملف الثاني هو INSUL.DAT ويحوي نتائج حساب التكلفة السنوية للعازل الحراري وللطاقة الكهربائية والتكلفة الكلية، ومن ثم يمكن تحديد السمك الاقتصادي للعازل عند أقل تكلفة كلية سنوياً. وبين المثال التالي طريقة استخدام برنامج INSUL.FOR وعرض نتائجه.

مثال ١١,١

غرفة تبريد درجة حرارتها -30°C تعمل في موقع له متوسط يومي لدرجات الحرارة الخارجية، ومدى تغير درجات الحرارة يومياً خلال أشهر السنة معطاة كما يلي:

الشهر	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠	١١	١٢
$\bar{T}$	١٠	١٠	٢٢	٢٧	٣٢	٣٧	٤١	٤٢	٤١	٣٣	٢٢	١٠
ΔT	١٠	١٠	١٠	١٥	١٥	١٥	١٣	١٣	٨	١٥	١٥	١٠

افرض البيانات الإضافية الآتية:

أ) العزل الحراري المستخدم هو البوليوريثين وله موصلية حرارية قدرها $0,024$ وات/م. $^{\circ}\text{C}$.

ب) العمر الافتراضي للعازل الحراري هو ٢٠ عاماً.


```

C PROGRAM TO ANALYZE THE COST OF INSULATION AND ENERGY FOR
C   A GIVEN THICKNESS OF AN INSULATION
C
C KEY TO THE PROGRAM
C
C COP = COEFFICIENT OF PERFORMANCE OF REFRIGERATION MACHINE
C CINS = COST OF INSULATION PER UNIT AREA, DOLLARS/SQ.M
C DOL = COST OF ELECTRIC ENERGY, DOLLAR/(K.W.HR)
C LIFE = LIFE OF INSULATION IN YEARS
C MX  = NO. OF THICKNESSES USED IN THE STUDY
C NDAY = NUMBER OF DAYS IN A MONTH
C S   = INFILTRATION RATE, DECIMAL
C TCON = THERMAL CONDUCTIVITY OF INSULATION, W/(M.C)
C TR  = TEMPERATURE OF COLD ROOM, C
C X   = THICKNESS OF INSULATION, M
C
C-----
      DIMENSION TM(12),DT(12),QM(12),NDAY(12)
      OPEN (UNIT=1,FILE='INSUL.IN')
      OPEN (UNIT=2,FILE='INSUL.OUT')
      OPEN (UNIT=3,FILE='INSUL.DAT')

C  SET INPUT DATA
C-----
      TR = -30.
      TCON = 0.024
      LIFE = 20
      S = 0.05
      X = .10
      COP = 1.3
      DO 20 IM = 1,12
20    READ (1,*) I,NDAY(IM),TM(IM),DT(IM)
      READ (1,*) MX, DOL
C-----
      WRITE (2,900)
      DO 200 J = 1,MX
      READ (1,*) X, CINS
      QY = 0.
      WRITE (2,905) X
      DO 100 I = 1,12
      Q = 0.0

```

شكل ١١,٣ برنامج INSUL بلغة الفورتران لحساب السمك الاقتصادي للعزل الحراري.

```

DO 60 ITIME = 1,24
TIME = FLOAT (ITIME)+0.5
CALL AMB (TM,DT,I,TIME,T)
60  Q = Q + TCON/X*(T-TR)/1000.
    QM(I) = NDAY(I)*Q
    WRITE (2,910) I,TM(I),DT(I),QM(I)
    QY = QY + NDAY(I)*Q
100  CONTINUE
C-----
    WRITE (2,980)
    COSTE = QY/COP*DOL
    COSTI = CINS*S*(1.+S)**LIFE/((1.+S)**LIFE-1.)
    COSTT = COSTE+COSTI
    IF (J .GT. 1) GO TO 150
    COSTIR = CINS
    COSTER = COSTE
    WRITE (3,920) X,QY,COSTE,COSTI,COSTT
150  CONTINUE
    IF (J .EQ. 1) GOTO 200
    PAYYEARS = (CINS-COSTIR)/(COSTER-COSTE)
    WRITE (3,920) X,QY,COSTE,COSTI,COSTT,PAYYEARS
200  CONTINUE
C-----
    STOP
900  FORMAT (30X,' PROGRAM INSUL.FOR',/)
905  FORMAT (' INSULATION THICKNESS = ',F5.2,' m',/,
1    ' MONTH T DT Q ',/)
910  FORMAT (I4,4(F7.1))
920  FORMAT (6(F8.2))
980  FORMAT (30('--'))
    END
C *****
    SUBROUTINE AMB (TM,DT,I,TIME,T)
C
    DIMENSION TM(12),DT(12)
C
    T = TM(I)+0.5*DT(I)*COS(180.0/12.0*(TIME-15.0))
    RETURN
    END
C *****

```

شكل ١١,٣ تليع.

- ج) معدل الغلاء السنوي هو ٥٪.
- د) معامل أداء ماكينة التبريد هو ١,٣ كيلووات تبريد لكل كيلووات كهرباء.
- هـ) تكلفة الكهرباء في موقع بناء غرفة التبريد هو ٠,٠٣ دولار / كيلووات - ساعة.
- و) تكلفة العازل الحراري لكل متر مربع من مساحة السطح هي:

سمك العزل، م	٠,٠٤	٠,٠٦	٠,٠٨	٠,١٠	٠,١٢	٠,١٤	٠,١٦	٠,١٨	٠,٢٠
التكلفة، دولار/م ^٢	٥٤,٦	٥٩,٤	٦٤,٢	٦٩,٠	٧٣,٨	٧٨,٦	٨٣,٤	٨٨,٢	٩٣,٠

الحل

يبين جدول ١١,٢ حساب الحمل الحراري للأشهر المختلفة من السنة لعازل حراري بسمك ٠,٠٤ متر. كما يبين جدول ١١,٣ ملخص حساب التكلفة السنوية الإجمالية لعوازل حرارية بسماكات مختلفة. وكما هو واضح من الجدول، فإن السمك الأمثل اقتصادياً للعازل هو ١٢ سم، حيث تكون التكلفة أقل ما يمكن، وهي ٨,٢٤ دولار لكل متر مربع من مساحة سطح الحائط أو السقف. ويبين شكل ١١,٤ البيانات المدخلة للبرنامج عن طريق ملف INSUL.IN، حيث يحتوي الملف على جزئين من البيانات المدخلة. الأولى عبارة عن ١٢ قيمة، كل سطر يمثل من اليسار إلى اليمين ترتيب الشهور، وعدد أيام الشهر، ودرجة الحرارة المتوسطة والمدى اليومي لدرجات الحرارة. ويمثل الجزء الثاني من البيانات عدد السماكات تحت الدراسة وتكلفة الكهرباء، ثم بعدد السماكات يتم إدخال سماكة العازل وتكلفته لوحدة مساحة.

جدول ١١,٢ حساب الحمل الحراري خلال الأشهر المختلفة باستخدام عازل حراري سمكه ٠,٠٤ متر لمثال ١١,١.

الشهر	الحمل الحراري	الشهر	الحمل الحراري	الشهر	الحمل الحراري
كيلووات - ساعة/م ^٢	كيلووات - ساعة/م ^٢	كيلووات - ساعة/م ^٢	كيلووات - ساعة/م ^٢	كيلووات - ساعة/م ^٢	كيلووات - ساعة/م ^٢
١	١٧,٨	٥	٢٧,٧	٩	٣٠,٧
٢	١٦,١	٦	٢٨,٩	١٠	٢٨,١
٣	٢٣,٢	٧	٣١,٧	١١	٢٢,٤
٤	٢٤,٦	٨	٣٢,١	١٢	١٧,٨

ويبين شكل ١١,٥ نتائج حساب التكلفة كما هي معطاة في ملف INSUL.DAT حيث تمثل الأعمدة من الشمال إلى اليمين على التوالي الآتي: سمك العزل الحراري (م) والحمل الحراري السنوي خلال العازل (كيلووات/م^٢)، والتكلفة السنوية الكلية للعازل، والطاقة الكهربائية (دولار/م^٢)، والتكلفة السنوية للطاقة الكهربائية اللازمة لإزالة الحمل الحراري المنقول خلال العازل الحراري (دولار/م^٢)، وعدد السنوات التي يسترجع بها الزيادة في تكلفة العازل الحراري فوق ٤ سم عن طريق توفير التوفير السنوي في استهلاك الكهرباء. ويلاحظ من النتائج في شكل ١١,٥ أنه يمكن استرداد تكلفة زيادة سمك العازل من ٤ سم إلى ١٢ سم في ٤,١٤ سنة تقريباً. ويبين شكل ١١,٦ تغير التكلفة السنوية للعازل الحراري مع سمك العازل.

١١,٦ القيم الموصى بها لسمك العزل الحراري

في كثير من الأحيان يرغب المهندسون في استخدام طريقة بسيطة وسريعة لتحديد سمك العازل الحراري. ونظراً لأن العمليات الحسابية السابقة لتحديد السمك الأمثل بها كثير من المدخلات والمتغيرات، مثل تكلفة العازل

المستخدم، وعمره الافتراضي، ومعدل الغلاء السنوي، وسعر الطاقة الكهربائية في موقع بناء غرفة التبريد، وكذلك معرفة معامل أداء ماكينة التبريد المستخدمة، عندئذ يلجأ مهندسو التصميم إلى استخدام القيم التقريبية المتعارف عليها هندسياً لسلك العازل الحراري. ولقد أوصت الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء بأن تكون المقاومة الحرارية للعازل الحراري المستخدم كما هو معطى بجدول ١١،٤ (ASHRAE 1994). عندئذ يحسب سمك العازل الحراري كما يلي:

جدول ١١،٣ ملخص نتائج مثال ١١،١.

عدد السنوات	التكلفة السنوية			الحمل الحراري السنوي	سمك العازل
	إجمالي	العازل	طاقة كهربائية		
لاسترجاع الزيادة في تكلفة العازل	دولار / م ^٢	دولار / م ^٢	دولار / م ^٢	خلال العازل	x
				$Q_{y/A}$	م
				كيلووات ساعة / م ^٢	
	١١،٢٣	٤،٣٨	٦،٩٥	٣٠١،٢١	٠،٠٤
٢،٠٧	٩،٤٠	٤،٧٧	٤،٦٣	٢٠٠،٨١	٠،٠٦
٢،٧٦	٨،٦٣	٥،١٥	٣،٤٨	١٥٠،٦١	٠،٠٨
٣،٤٥	٨،٣٢	٥،٥٤	٢،٧٨	١٢٠،٤٩	٠،١
٤،١٤	٨،٢٤	٥،٩٢	٢،٣٢	١٠٠،٤٠	٠،١٢
٤،٨٣	٨،٢٩	٦،٣١	١،٩٩	٨٦،٠٦	٠،١٤
٥،٥٢	٨،٤٣	٦،٦٩	١،٧٤	٧٥،٣٠	٠،١٦
٦،٢١	٨،٦٢	٧،٠٨	١،٥٤	٦٦،٩٤	٠،١٨
٦،٩١	٨،٨٥	٧،٤٦	١،٣٩	٦٠،٢٤	٠،٢٠

1	31	10.0	10.0
2	28	10.0	10.0
3	31	22.0	10.0
4	30	27.0	15.0
5	31	32.0	15.0
6	30	37.0	15.0
7	31	41.0	13.0
8	31	42.0	13.0
9	30	41.0	08.0
10	31	33.0	15.0
11	30	22.0	15.0
12	31	10.0	10.0

9 0.03

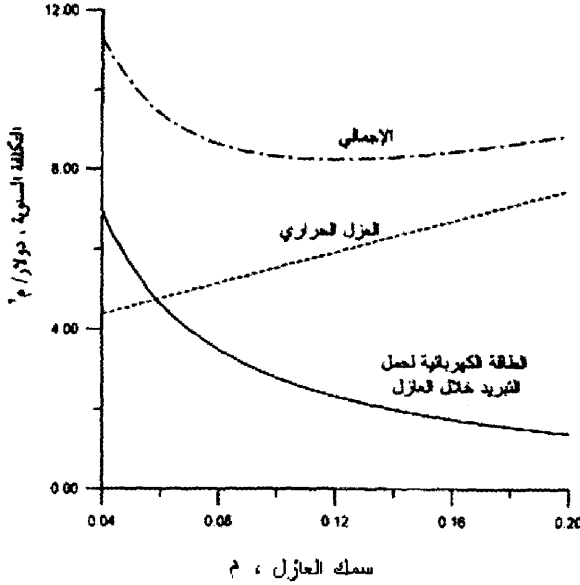
0.04	54.6
0.06	59.4
0.08	64.2
0.10	69.0
0.12	73.8
0.14	78.6
0.16	83.4
0.18	88.2
0.2	93.

شكل ١١,٤ بيئنت الملف INSUL.IN الذي يحوي معطيات مثل ١١,١.

.04	301.21	6.95	4.38	11.33
.06	200.81	4.63	4.77	9.40 2.07
.08	150.61	3.48	5.15	8.63 2.76
.10	120.49	2.78	5.54	8.32 3.45
.12	100.40	2.32	5.92	8.24 4.14
.14	86.06	1.99	6.31	8.29 4.83
.16	75.30	1.74	6.69	8.43 5.52
.18	66.94	1.54	7.08	8.62 6.21
.20	60.24	1.39	7.46	8.85 6.91

شكل ١١,٥ بيئنت الملف INSUL.DAT الذي يحوي ملخص حساب لتكلفة لسنوية لمثل ١١,١.

ليبيئنت من اليسر إلى اليمين: سمك العزل (م)، لاطقة لسنوية (كيلووات/م^٢)، تكلفة لكهرباء، تكلفة لعزل، لتكلفة لكلية، عدد لسنوات لاسترجاع لتكلفة.



شكل ١١,٦ تغير لتكلفة السنوية للعزل الحراري، والتكلفة السنوية للطاقة الكهربائية لحمل الحراري خلال العلم، والتكلفة السنوية الإجمالية مع سمك العزل.

$$x_i = R_i k_i \quad (11.12)$$

حيث R_i هي المقاومة الحرارية للعازل و k_i هي الموصلية الحرارية له. ويلاحظ أن جدول ١١,٤ يعطي مدى لاختيار قيمة R وليس قيمة واحدة، وذلك نظراً لاختلاف تكلفة الطاقة من بلد إلى آخر ومن سنة إلى أخرى. فإذا كانت تكلفة الطاقة الكهربائية منخفضة نسبياً، أخذت قيمة R_i في بداية المدى الموصى به، أما إذا كانت قيمة الكهرباء مرتفعة نسبياً، أخذت قيمة R_i في نهاية المدى الموصى به.

جدول ١١,٤ القيمة الموصى بها للمقاومة الحرارية للعازل الحراري المستخدم في غرف التبريد (ASHRAE 1994).

المقاومة الحرارية ، $m^2 \cdot K / W$			درجة حرارة غرفة التبريد m^2
أسقف	حوائط وأسقف معلقة	أرضية	
٥,٣ إلى ٦,٢	٤,٤	-	٤ إلى ١
٧,٠ إلى ٦,٢	٥,٦ إلى ٤,٢	٣,٥	٤ إلى ٢٠
٨,٢ إلى ٧,٩	٧,٠ إلى ٦,٢	٥,٦ إلى ٤,٨	٢٣ إلى ٢٩
١٠,٦ إلى ٨,٨	٨,٨ إلى ٧,٩	٧,٠ إلى ٥,٣	٤٠ إلى ٤٦

مثال ١١,٢

احسب السمك الاقتصادي للعازل الحراري بمثال ١١,١ عندما تكون تكلفة الطاقة الكهربائية هي ٠,٠٣ ، و ٠,٠٤ ، و ٠,٠٥ دولار / كيلووات - ساعة، قارن الحسابات مع القيمة الموصى بها في جدول ١١,٤.

الحل

يستخدم برنامج INSUL لحساب السمك الاقتصادي للعازل عند التكلفة المعطاة عالية للطاقة الكهربائية. ويبين جدول ١١,٥ النتائج التي أعطاها البرنامج. ويلاحظ من النتائج زيادة السمك الاقتصادي للعازل من ٠,١٢ م إلى ٠,١٤ م بزيادة تكلفة الطاقة الكهربائية من ٠,٠٣ إلى ٠,٠٤ دولار / كيلووات - ساعة. ثم زيادة السمك الاقتصادي إلى ٠,١٦ م إذا زادت تكلفة الكهرباء إلى ٠,٠٥ دولار / كيلووات - ساعة. ويبين شكل ١١,٧ تغير التكلفة السنوية للعازل الحراري وللطاقة الكهربائية اللازمة لإزالة الحمل الحراري المنتقل خلاله، مع سمك العازل عند القيم الثلاثة المعطاة لتكلفة الطاقة الكهربائية.

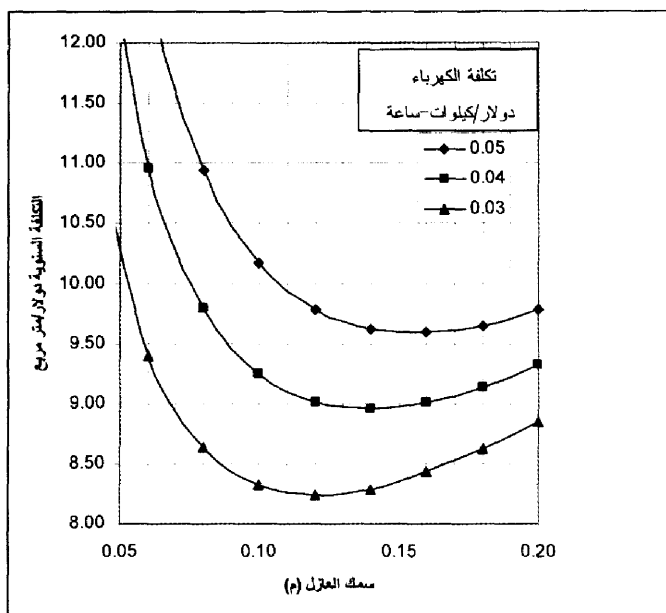
وبالرجوع إلى جدول ١١،٤ نجد أن القيمة الموصى بها للمقاومة الحرارية للحوائط المستخدمة في غرف تبريد عند -30°C ، تتراوح بين ٦،٢ إلى ٧،٠ م^٢/م. وات. وبفرض قيمة R_i في منتصف هذا المدى، أي ٦،٦ م^٢/م. وات، فإن سمك العازل الموصى به يكون

$$x_i = 6.6 \times 0.024 = 0.16\text{m}$$

وهي قيمة تناظر القيمة التي حصلنا عليها من برنامج INSUL عندما تكون تكلفة الطاقة ٠،٠٥ دولار/كيلووات - ساعة.

جدول ١١،٥ نتائج برنامج INSUL لحساب السمك الاقتصادي في مثال ١١،٢.

سمك العازل			التكلفة السنوية الكلية لأسعار مختلفة من الطاقة الكهربائية ، (دولار / م ^٢)
م	٠،٠٣	٠،٠٤	٠،٠٥
٠،٤	١١،٣٠	١٣،٦٥	١٥،٩٤
٠،٦	٩،٤٠	١٠،٩٥	١٢،٤٩
٠،٠٨	٨،٦٣	٩،٧٩	١٠،٩٤
٠،١٠	٨،٣٢	٩،٢٤	١٠،١٧
٠،١٢	٨،٢٤	٩،٠١	٩،٧٨
٠،١٤	٨،٢٩	٨،٩٦	٩،٦٢
٠،١٦	٨،٤٣	٩،٠١	٩،٥٩
٠،١٨	٨،٦٢	٩،١٤	٩،٦٥
٠،٢٠	٨،٨٥	٩،٣٢	٩،٧٨
النتيجة النهائية			
تكلفة الكهرباء، دولار/كيلووات - ساعة			
٠،٠٣	٠،٠٤	٠،٠٥	
٠،١٢	٠،١٤	٠،١٦	السمك الاقتصادي للعازل، م



شكل ١١,٧ تغير لتكلفة الإجمالية لسنوية للعزل الحراري مع سمك لعزل عند أسعار مختلفة للطاقة الكهربائية.

١١,٧ حاجز انتقال بخار الماء

ينتقل بخار الماء إلى غرف التبريد بطريقتين: مع الهواء الخارجي المتسرب إلى غرفة التبريد، وبالاتسار نتيجة اختلاف الضغط الجزئي لبخار الماء بالهواء خارج غرفة التبريد وداخلها. وبدخول بخار الماء إلى غرفة التبريد يتكثف هذا البخار إلى ماء متى ما قلّت درجة حرارته عن درجة حرارة نقطة الندى بالهواء الحامل لهذا البخار. ويعمل الماء الناتج عن التكثيف على إتلاف العازل الحراري، أو إتلاف دهان الأسطح الداخلية أو الخارجية للحوائط والسقف. أيضاً، يتجمد الماء المكثف بغرفة التبريد في الأماكن التي تقل بها درجة الحرارة عن درجة التجمد للماء، مثل الأسطح الداخلية لغرفة التبريد

وعلى ملف التبريد، وتعرف هذه الظاهرة بالصقيع. ويعيق الصقيع المتكون بملف التبريد عملية تبريد الغرفة، مما يستلزم وجودة دورة خاصة لإذابة الصقيع بغرف التبريد التي تعمل عند درجات حرارة أقل من درجة التجمد للماء. وبالطبع تزيد دورة إذابة الصقيع حمل التبريد لغرفة التبريد، وكذلك تزيد من استهلاك الطاقة اللازمة للتشغيل بالإضافة إلى زيادة التكلفة الأولية للمعدات.

تصمم غرف التبريد مع مراعاة الحد من انتقال بخار الماء إليها. ويتم ذلك بطريقتين: أولاً سد جميع الشقوق والفتحات التي تؤدي إلى تسرب الهواء الخارجي إلى غرفة التبريد، وثانياً وضع حاجز لمنع بخار الماء من الانتقال إلى الغرفة بالانتشار. ويعرف هذا الحاجز بأنه مادة تمنع انتقال بخار الماء خلالها. وتستخدم صفائح الصلب كحاجز لتسرب بخار الماء في غرف التبريد، ويلزم عندئذ لحام أطراف الصفائح مع بعضها البعض بدقة لمنع تسرب بخار الماء خلال الفراغات بين هذه الصفائح. أيضاً تستخدم رقائق الألمنيوم المعروفة تجارياً باسم الألمنيوم فويل (aluminum foil) كحاجز تسرب. وفي هذه الحالة يلزم تركيب أطراف رقائق الألمنيوم أحدها فوق الآخر، مع تركيب شريط لاصق فوق هذه الوصلات. أيضاً، يستخدم البلاستيك كحاجز لبخار الماء في العديد من غرف التبريد.

يعتمد اختيار مكان تركيب حاجز بخار الماء على قيمة درجة حرارة غرفة التبريد ودرجة حرارة الجو الخارجي. والقاعدة العامة لتركيب حاجز البخار هي أن يوضع حاجز بخار الماء على الجهة الأسخن من الحائط نظراً لأن الهواء الساخن يستطيع حمل معه عادة قدرًا من بخار الماء أكبر مما يحمله الهواء البارد، مما يعني تسرب بخار الماء من الهواء الساخن إلى الهواء البارد. فمثلاً إذا كانت درجة حرارة غرفة التبريد تقل دائماً عن درجة حرارة الجو

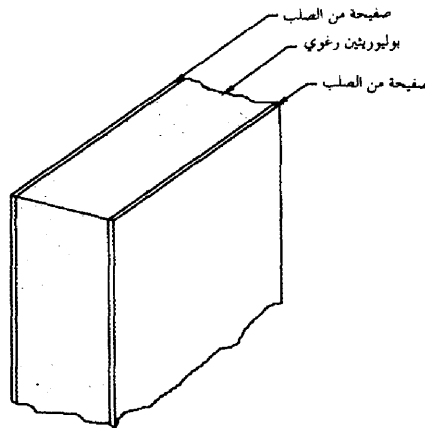
الخارجي على مدار العام، وضع حاجز بخار الماء على السطح الخارجي للحائط أو السقف لغرفة التبريد. أما إذا كانت درجة الحرارة الخارجية تقل في بعض الأحيان (شتاء أو ليلاً) عن درجة حرارة غرفة التبريد، فإنه يلزم عندئذ تركيب حاجز بخار الماء على السطحين الداخلي والخارجي لحوائط وسقف غرفة التبريد.

برغم العناية الفائقة التي يبذلها مصممو غرفة التبريد في اختيار حاجز البخار ومكان تركيبه وتوصيف الطرق الفنية اللازمة لضمان عدم تسرب بخار الماء بين الوصلات المختلفة بين أسطح حاجز بخار الماء، إلا أن هناك عوامل عدة تؤدي إلى إتلاف حاجز بخار الماء. تأتي بعض هذه العوامل أثناء إنشاء غرف التبريد نفسها ويأتي البعض الآخر أثناء فترات التشغيل. وتتلخص أهم هذه العوامل في الآتي: استخدام المسامير المختلفة أو الدبابيس التي تخترق حاجز بخار الماء بغرض تثبيت بعض المكونات أو الدعائم، وجعل عمال الإنشاء بوظيفة وأداء حاجز بخار الماء، والحوادث العارضة التي قد توجد أثناء عملية تركيب حاجز البخار أو نتيجة تصادم بعض معدات نقل المواد المخزنة مع حاجز بخار الماء أثناء تشغيل هذه المعدات. لذا يلزم توعية جميع عمال الإنشاء بأهمية عدم اختراق حاجز بخار الماء وضرورة إحكام سد أي فتحة في حاجز بخار الماء. أيضاً يلزم تركيب معدات أسفل الحوائط الداخلية لغرفة التبريد للحيلولة دون تصادم معدات نقل البضائع مع الحوائط.

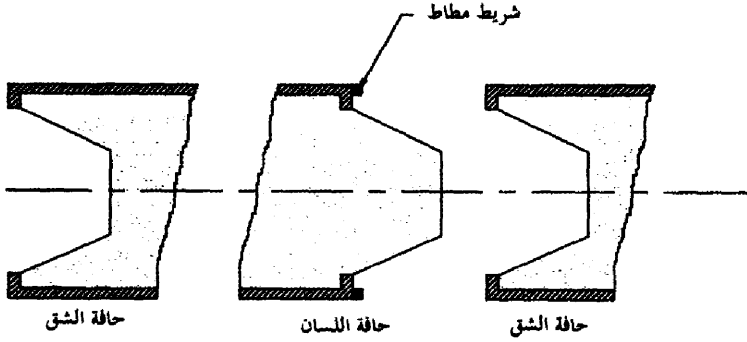
١١,٨ ألواح العزل الحراري سابقة التصنيع

تقوم عدة شركات بتصنيع ألواح عزل حراري بمصانعها بمقاسات مختلفة من حيث الطول والعرض وسمك العازل الموجود بها ونوع الأسطح الخارجية لها. ويبين شكل ١١,٨ مقطعاً في أحد هذه الألواح. وتصنع هذه الألواح العازلة

عادة من البوليوريثين الرغوي المحفوظ بين لوحين من الصلب أو الصلب المقاوم للصدأ أو الحديد المجلفن، مما يعطى هذه الألواح صلابة جيدة. وتمتاز هذه الألواح بثبات سمك العزل الحراري بها وبحجزها لبخار الماء. وتصنع هذه الألواح بمواصفات خاصة ومقاسات متنوعة تسمح بتركيبها مع لبناء الحوائط والأسقف والأرضيات بغرف التبريد، وتثبت هذه الألواح بما يعرف بحافتي اللسان والشق، بالإضافة إلى قفل تثبيت. لذا تصنع هذه الألواح بحيث تشكل إحدى حافتيها على شكل لسان، بينما تشكل الحافة الأخرى على شكل شق، كما هو مبين بشكل ١١،٩ [Al-Hasawi]. وعند توصيل لوحين معا، ينزلق اللسان في الشق. ولضمان عدم تسرب الهواء أو بخار الماء بين حافتي اللوحين يوضع شريط مطاطي بين اللوحين في بعض التصميمات أو يسمح بأن يزيد طول اللسان قليلا عن عمق الشق في تصميمات أخرى، كما يستخدم قفل تثبيت (انظر شكل ١١،١٠) لضم اللوحين معا مما يعطى توصيلا ثابتا وقويا [Al-Hasawi].

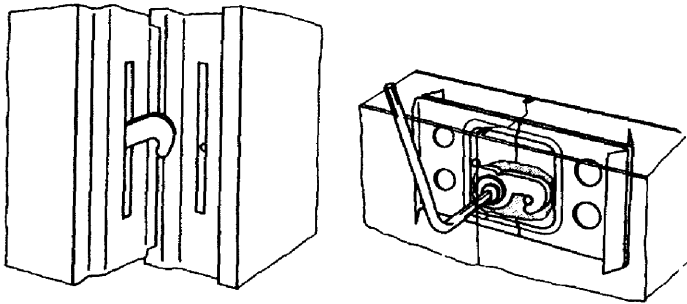


شكل ١١،٨ مقطع في لوح عازل سابق التصنيع.



شكل ١١,٩ حافتي اللسان والشق للألواح العازلة سابق التصنيع [Al-Hasawi].

ويتوفر تشطيب الأسطح الداخلية والخارجية لألواح العزل الحراري باختيارات عدة. توجد من هذه الألواح ما هو مكسو بطبقة من البلاستيك الأبيض الذي يحافظ على نظافة هذه الأسطح ومظهره، ومنها ما هو مكسو بالأنيميل الأبيض بالإضافة إلى بعض الأنواع المطلية.



شكل ١١,١٠ رسم تخطيطي يوضح توصيل لوحين معا بقل تثبيت [Al-Hasawi].

الرموز ومعانيها للفصل الحادي عشر

A	المساحة [م ^٢]
C_e	التكلفة الكهربائية [دولار/م ^٢]
C_i	التكلفة السنوية للعازل [دولار/م ^٢]
COP	معامل أداء دورة التبريد
C_t	التكلفة الكلية $C_t = C_i + C_e$ [دولار/م ^٢]
F	تكلفة الطاقة الكهربائية [دولار/كيلووات-ساعة]
I	التكلفة الأولية للعازل [دولار]
I_{ref}	التكلفة الأولية للإنشائية [دولار]
k	معامل الموصلية الحرارية [وات/(م.كلفن)]
n	العمر الافتراضي للعزل الحراري [سنة]
N_j	عدد الأيام في الشهر [يوم]
Q	الطاقة المنتقلة إلى غرفة التبريد [كيلو وات-ساعة]
$\dot{Q}$	معدل سريان الحرارة [وات أو كيلووات]
Q_y	إجمالي الطاقة السنوية المنتقلة إلى غرفة التبريد [كيلو وات - ساعة]
s	المعدل السنوي للغلاء
t	الزمن [ساعة]
$\bar{T}$	متوسط درجة الحرارة الخارجية [م°]
T_i	درجة الحرارة الخارجية [م°]
T_R	درجة حرارة غرفة التبريد [م°]
U	المعامل الكلي لانتقال الحرارة [وات/م ^٢ .م°]
W_e	الطاقة الكهربائية لتشغيل وحدات التبريد [كيلووات - ساعة]
x	سمك العازل [م]

Y عدد السنوات لكي تسترد الزيادة في تكلفة العازل عن السمك

المرجعي

الحروف الإغريقية

ΔT فرق درجات الحرارة [م°]

الفصل الثاني عشر

نظم إذابة الصقيع

١٢،١ مقدمة

تعاني غرف التبريد التي تعمل عند درجات حرارة تحت الصفر المئوي من تكون صقيع أو جليد على أسطح ملفات التبريد بها. وينشأ هذا الصقيع نتيجة تكثف بخار الماء الموجود بالهواء المار على ملف التبريد، ومن ثم تجمد هذا الماء فور ملامسته لسطح الملف الذي له درجة حرارة تحت درجة الصفر المئوي. وكلما زاد مقدار بخار الماء بهواء غرفة التبريد كلما زاد مقدار الصقيع المتكون على سطح ملف التبريد. ومن أهم مصادر بخار الماء بغرف التبريد: الهواء الرطب المتسرب من خارج غرفة التبريد إلى داخلها، وبخار الماء المتسرب (دون الهواء) من خارج غرفة التبريد إلى داخلها. ففي الحالة الأولى يتسرب الهواء الخارجي إلى داخل غرفة التبريد من خلال باب الغرفة عند فتح هذا الباب، أو خلال أي فتحات أو شقوق قد توجد بجدران أو سقف الغرفة، أو من خلال باب الغرفة أثناء غلقه إذا لم يكن محكم الغلق. أما في الحالة الثانية، فيتسرب بخار الماء من خارج الغرفة إلى داخلها من خلال جدران أو أرضية أو سقف غرفة التبريد، بما يعرف بظاهرة الانتشار (راجع الفصل الحادي عشر). فمن المعروف نفاذ بخار الماء خلال الأسطح الصلبة إذا كان هناك فرق في الضغط الجزئي لبخار الماء بين سطحي هذه المادة. فمثلاً، قد يتسرب بخار الماء إلى غرف التبريد خلال أحد جدرانها المبنية من الطوب، أو الأسمنت أو الخشب نتيجة وجود فرق في الضغط الجزئي لبخار الماء بين الهواء خارج وداخل الغرفة. ويعتمد مقدار تسرب بخار الماء خلال الجدار (أو السقف أو الأرضية) على نفاذية المادة أو المواد المصنعة منها الجدار. لهذا السبب يجب أن يوضع

حاجز لبخار الماء (وهي مادة لها نفاذية بخار متدنية) على جميع جدران وأسطح وأرضية غرف التبريد. ويجب مراعاة الشروط الهندسية اللازمة لتركيب حاجز البخار على الأسطح المختلفة لغرف التبريد (انظر الفصل الحادي عشر).

يسبب وجود الصقيع على سطح ملف التبريد عدة مشاكل، أهمها زيادة المقاومة الحرارية بين سطح الملف والهواء المار خلاله، وتقليل المساحة المتاحة لسريان الهواء خلال الملف. وتؤدي هاتين المشكلتين إلى خفض سعة التبريد للملف، كما تؤدي المشكلة الثانية إلى خفض رمية الهواء من ملف التبريد، مما يكون له أكبر الضرر على توزيع الهواء بغرفة التبريد، وبالتالي احتمال ارتفاع درجة الحرارة في بعض أجزاء الغرفة التي قد لا يصلها قدر كاف من الهواء القادم من ملف التبريد. وبزيادة سمك طبقة الصقيع المتكونة على ملف التبريد يقل تدريجيًا كل من سعة التبريد ومعدل سريان الهواء خلال الملف، وقد يصل كليهما إلى صفر أي تنعدم سعة التبريد كليًا عندما يعمل الصقيع على سد مساحة سريان الهواء كليًا خلال ملف التبريد.

ونتيجة للمشاكل التي يسببها وجود الصقيع على ملف التبريد كان لابد من العمل على إذابة هذه الصقيع على فترات زمنية للحد من تراكمه إلى الدرجة التي تعوق عمل نظام التبريد. وهناك عدة طرق لإذابة الصقيع تشترك جميعها في توفير مصدر حراري لإذابة الصقيع على فترات. وتعتمد الفترة الزمنية بين دورات إذابة الصقيع على نوع ملف التبريد المستخدم، وظروف التشغيل من حيث درجة حرارة غرفة التبريد ومواصفات بنائها وحالة الهواء الخارجي. فمثلاً، قد يحتاج ملف التبريد المكون من مواسير عارية إلى إذابة الصقيع به مرة واحدة شهريًا، بينما يحتاج ملف التبريد المكون من أنابيب وزعانف ومروحة لدفع الهواء خلاله إلى إذابة الصقيع به مرة كل ساعة أو ساعتين تبعًا لظروف التشغيل. أيضًا، يعتمد طول فترة إذابة الصقيع بكل دورة من دورات إذابة

الصقيع على الطريقة المستخدمة في إذابة الصقيع، ومقدار الطاقة الحرارية المستخدمة لإذابة الصقيع، وقبل كل شيء على سمك طبقة الصقيع المتكونة على سطح ملف التبريد.

١٢,٢ طرق إذابة الصقيع

هناك عدة طرق لإذابة الصقيع أهمها الطرق الآتية:

- استخدام هواء من مصدر خارجي.
- استخدام ماء دافئ أو محلول ملحي دافئ.
- استخدام سخان كهربائي.
- استخدام غاز ساخن من الضاغط مباشرة إلى المبخر.

تعتبر الطريقة الأولى هي أقل الطرق شيوعاً لإذابة الصقيع. ففي هذه الطريقة توقف دورة التبريد (بإيقاف الضاغط) يدوياً أو أوتوماتياً ثم يسمح بتمرير هواء خارجي على ملف التبريد لفترة زمنية مما يساعد على إذابة الصقيع. ويمرر هذا الهواء قسراً باستخدام مروحة، أو بالحمل الطبيعي. ولقد استخدمت هذه الطريقة في النظم القديمة لمخازن حفظ الأغذية. وتحتاج هذه الطريقة لوقت طويل نسبياً. بالمقارنة بالطرق الأخرى، لإذابة الصقيع مما حد من استخدامها حالياً.

يستخدم الماء الدافئ أو محلول الماء الملحي الدافئ في بعض التطبيقات لإذابة الصقيع. ولقد استخدمت هذه الطريقة بكثرة في الماضي. إلا إن الصناعات الحديثة لم تعد تفضلها كطريقة جيدة لإذابة الصقيع، وتعتبر الطريقتان الثالثة والرابعة هما أكثر الطرق شيوعاً نظراً لقصر الفترة الزمنية لإذابة الصقيع بهاتين الطريقتين.

في طريقة التسخين الكهربائي، يوضع عنصر تسخين كهربائي ملامس مباشرة لسطح ملف التبريد أو لسطح زعانف ملف التبريد. وعند بدء دورة إذابة الصقيع، سواءً يدويًا أو أوتوماتيًّا، توقف دورة التبريد، ويبدأ العنصر الكهربائي في التسخين، مما يذيب الصقيع. وتمتاز هذه الطريقة بالإضافة إلى سرعتها وكفاءتها، بسهولة تشغيلها وصيانتها وانخفاض تكلفتها الأولية، إلا أن أهم عيوبها استخدام طاقة كهربائية لإذابة الصقيع، مما يعتبر غير اقتصادي من وجهة نظر استهلاك الطاقة. ويستخدم التسخين الكهربائي بكثرة في العديد من الثلاجات والمجمدات المنزلية ووحدات التبريد الصغير نسبيًّا.

وتعتبر طريقة استخدام الغاز الساخن هي أكثر الطرق شيوعًا على الإطلاق، خاصة في وحدات التبريد الكبيرة نسبيًّا. ففي هذه الطريقة، يستمر الضاغط في العمل أثناء دورة إذابة الصقيع دون توقف، حيث يمد ملف التبريد (المبخر) بالغاز الساخن الذي يعمل على إذابة الصقيع. ويبين شكل ١٢،١ رسمًا تخطيطيًّا للفكرة الأساسية لهذه الطريقة. فكما هو مبين بالشكل، يفتح صمام الملف اللولبي لتوصيل خط الغاز الساخن بالمبخر، فيعمل هذا الغاز على إذابة الصقيع المتكون على سطح المبخر.

١٢،٣ استخدام الغاز الساخن لإذابة الصقيع

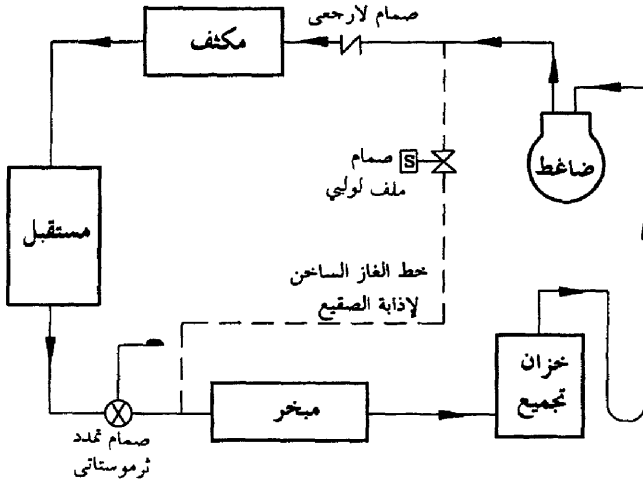
يبين الجزء السابق الفكرة الأساسية لاستخدام الغاز الساخن لإذابة الصقيع المتراكم على المبخر. والدورة المبينة لهذا الغرض بشكل ١٢،١ لا يمكنها العمل فعليًّا لعدم وجود حمل حراري يمد الضاغط ببخار المبرد، مما يعني توقف الضاغط بعد فترة زمنية قصيرة فور ضخ بخار المبرد المتجمع في خزان التجميع. لذا تستخدم هذه الدورة فقط عندما يضم نظام التبريد مبخرين أو أكثر، وضاغط واحد، عندئذ يتم إذابة الصقيع بمبخر واحد فقط من هذه

المبخرات، بينما تمد باقي مبخرات النظام بالحمل الحراري اللازم لاستمرار عمل الضاغط. ويبين شكل ١٢،٢ دورة غاز ساخن لنظام تبريد يحوي ثلاثة مبخرات. ويبين الشكل حالة تشغيل النظام لإذابة صقيع المبخر ١، بينما يعمل المبخران ٢ و٣ في دورة التبريد المعتادة لإمداد الضاغط ببخار المبرد اللازم لعمله. في هذه الحالة، يسري الغاز الساخن خلال صمام الملف اللولبي إلى المبخر لإذابة الصقيع، ثم يخرج سائل المبرد إلى خط السائل خلال خط تجنيبي يحوي صمامًا لا رجعيًا (انظر الشكل).

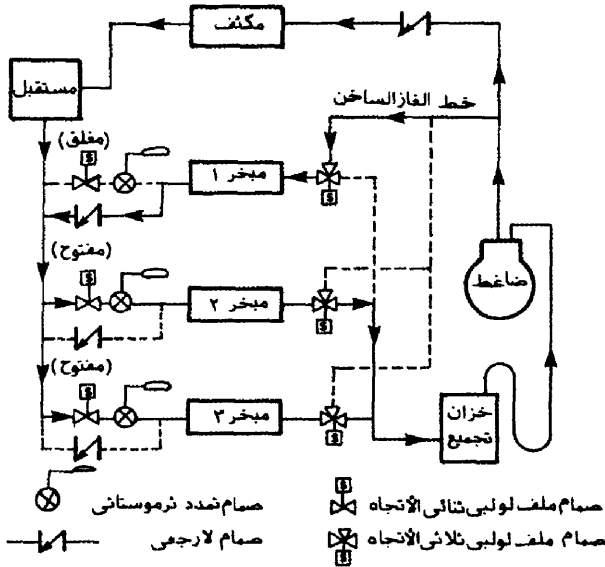
وهناك بعض الحلول الهندسية التي تتبع عادة لاستخدام دورة الغاز الساخن لإذابة الصقيع بنظم المبخر الواحد. وتعمل كل هذه الحلول على توفير حمل حراري لنظام التبريد - أثناء دورة إذابة الصقيع - لإمداد الضاغط ببخار المبرد اللازم لتشغيله. ومن أهم الطرق المتبعة لهذا الآتي:

- استخدام دورة مضخة حرارية (دورة تبريد معكوسة).
- استخدام تخزين حراري (بنك حراري).
- استخدام مصدر حراري مساعد.
- استخدام مبخر مساعد.

يبين شكل ١٢،٣ (أ، ب) دورة المضخة الحرارية لإذابة الصقيع. وفي هذه الدورة يُعكس اتجاه سريان المبرد خلال الدورة، فيصبح المبخر مكثفًا، والمكثف مبخرًا. ويتم هذا باستخدام صمام رباعي الاتجاه، كما هو مبين بالشكل. فعند بدء دورة إذابة الصقيع، يعدل وضع الصمام رباعي الاتجاه أوتوماتيًّا بحيث يسري الغاز الساخن من الضاغط إلى المبخر، مما يذيب الصقيع به. ويحوي نظام التبريد الذي يعمل بهذه الطريقة لإذابة الصقيع على صمام تمدد للمكثف يعمل فقط عند عكس الدورة. كذلك يضم النظام صمامين لا رجعيين لضمان سريان المبرد في الاتجاه الصحيح تبعًا لإيقاف أو تشغيل دورة إذابة الصقيع.

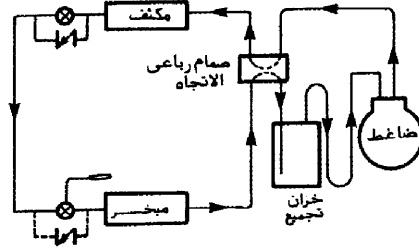


شكل ١٢,١ دورة تبريد بسيطة مع إذابة الصقيع بالغاز الساخن.

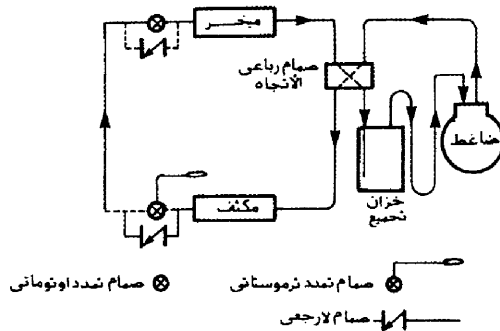


(تشغيل دورة التبريد المعتادة بجميع المبخرات ما عدا مبخر ١ حيث تعمل دورة إذابة الصقيع)

شكل ١٢,٢ دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع بنظام تبريد ذي ثلاثة مبخرات.



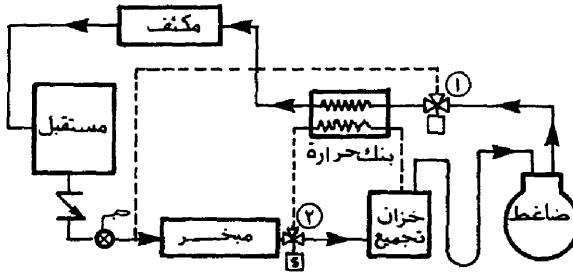
شكل ١٢,٣ (أ) دورة مضخة حرارية لإذابة الصقيع: تشغيل دورة التبريد.



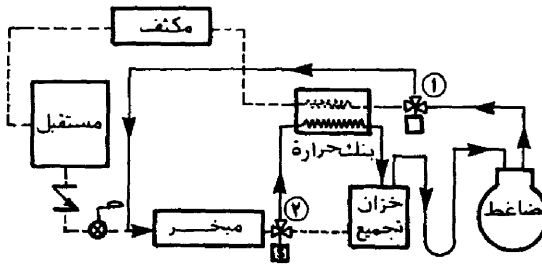
شكل ١٢,٣ (ب) دورة مضخة حرارية لإذابة الصقيع: تشغيل دورة إذابة الصقيع.

ويبين شكل ١٢,٤ (أ، ب) استخدام طريقة تخزين الحرارة (بنك حرارة) مع دورة إذابة الصقيع بالغاز الساخن. وفي هذه الطريقة يحوي نظام التبريد خزان ماء يتم تسخينه - أثناء تشغيل دورة التبريد - بالغاز الساخن قبل مرور هذا الغاز إلى المكثف. عند بدء دورة إذابة الصقيع يُوصَل الغاز الساخن مباشرة بنقطة دخول المبخر، وذلك بتعديل وضع صمام الملف اللولبي ١. بمرور الغاز الساخن يذوب الصقيع ويكثف الغاز إلى سائل. يمر سائل المبرد خلال صمام الملف اللولبي ٢ (بعد تعديل وضعه أوتوماتيًّا) إلى خزان الماء (بنك الحرارة) فيتم تبخيره إلى خط سحب الضاغط. ويلزم في هذه الدورة استخدام خزان تجميع لحماية الضاغط من دخول أي قطرات سائل إليه. وبانتهاء دورة إذابة الصقيع،

يعدل وضع الصمامين ٢ و ١ إلى وضعهما الطبيعي بدورة التبريد، وتبدأ عملية تسخين ماء الخزان الحراري مرة أخرى، وهكذا.



شكل ١٢،٤ (أ) دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع باستخدام بنك الحرارة: تشغيل دورة التبريد.



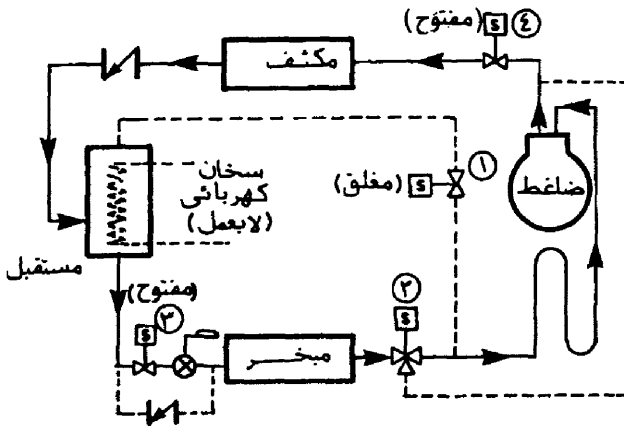
صمام تمدد ثرموستاتي

صمام ملف لولبي ثلاثي الاتجاه

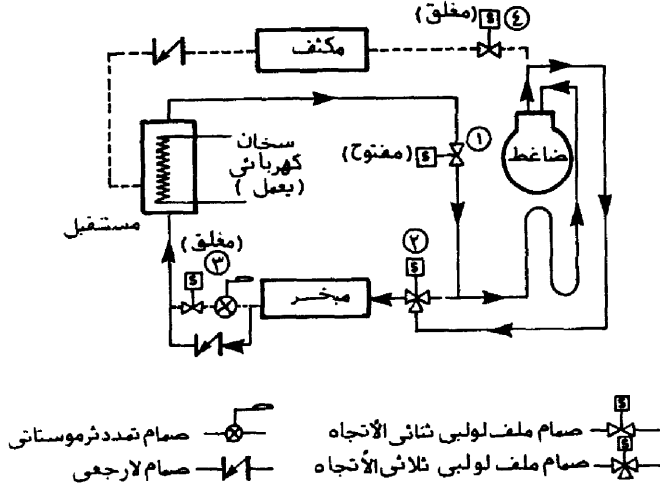
شكل ١٢،٤ (ب) دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع باستخدام بنك الحرارة: تشغيل دورة إذابة الصقيع.

يبين شكل ١٢،٥ (أ، ب) دورة إذابة الصقيع بطريقة الغاز الساخن باستخدام مصدر كهربائي للحمل الحراري أثناء الدورة. يوضع سخان الكهربائي في المستقبل، ولا يعمل هذا السخان أثناء التشغيل المعتاد لدورة التبريد (الشكل ١٢،٥). عند بدء تشغيل دورة إذابة الصقيع (الشكل ١٢،٥ ب)

يفتح صمام الملف اللولبي ١ ويُغلق صماما الملف اللولبي ٣ و ٤، ويُعدل وضع صمام الملف اللولبي ٢ ليمسح بدخول الغاز الساخن القادم من الضاغط إلى المبخر. ويكثف الغاز الساخن بالمبخر إلى سائل نتيجة إذابة صقيع المبخر، ويخرج هذا السائل خلال الصمام غير المرجع إلى المستقبل. بتشغيل دورة إذابة الصقيع، يصل التيار الكهربائي إلى السخان، فيعمل كحمل حراري للمستقبل، مما ينتج عنه إمداد الضاغط ببخار المبرد اللازم لعمل الضاغط خلال صمام الملف اللولبي ١. بانتهاء دورة إذابة الصقيع يقطع التيار عن السخان الكهربائي ويغلق صمام الملف اللولبي ١، ويُفتح صماما الملف اللولبي ٣ و ٤، ويُعدل صمام الملف اللولبي ٢ وضعه ليصل خروج المبخر بخط سحب الضاغط. عندئذ تبدأ الوحدة في العمل بدورة التبريد المعتادة.

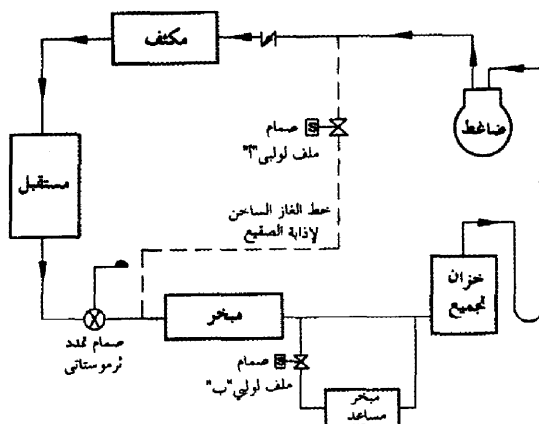


شكل ١٢,٥ (أ) دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع باستخدام سخان كهربائي: تشغيل دورة التبريد.



شكل ١٢,٥ (ب) دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع باستخدام سخان كهربائي: تشغيل دورة إذابة الصقيع.

ويبين شكل ١٢,٦ استخدام مبخر مساعد مع دورة إذابة الصقيع بالغاز الساخن من المضغوط. فكما هو واضح، تماثل دورة التبريد بشكل ١٢,٦ تلك التي بشكل ١٢,١ إلا أن دورة التبريد بشكل ١٢,٦ تحوي مبخر مساعد وصمام ملف لولبي إضافي. فعند العمل المعتاد لدورة التبريد يغلق صمام الملف اللولبي " أ " و "ب"، فإذا بدأت دورة إذابة الصقيع فُتح كلا الصمامين " أ " و "ب"، مما يسمح بمرور الغاز الساخن إلى المبخر مسبباً إذابة الصقيع به، وبالتالي تكثيف الغاز الساخن. ويسري سائل المبرد الناتج عن هذا التكثيف إلى المبخر المساعد الذي يعمل على تبخير هذا السائل وضمان استمرار وصول بخار المبرد إلى المضغوط، وبالتالي استمرار عمله بالشكل المناسب لضمان إمداد الغاز الساخن اللازم لعملية إذابة الصقيع. فإذا انتهت دورة إذابة الصقيع أُغلق الصمامان " أ " و "ب" وعملت دورة التبريد بشكلها المعتاد.



شكل ١٢,٦ دورة تبريد بسيطة مع إذابة الصقيع بالغاز الساخن من الضاغط واستخدام مضخة مساعدة.

ولمزيد من التفاصيل حول طرق إذابة الصقيع وتشغيلها، والتحكم فيها واستخداماتها في التطبيقات المختلفة يمكن للقارئ الرجوع إلى [Dossat 1981, ASHRAE 1988, Gosney 1982, Pita 1984, ASHRAE 1994].

١٢,٤ تصميم خطوط الغاز الساخن لإذابة الصقيع

لا توجد طريقة هندسية واضحة لتصميم خطوط الغاز الساخن إلى المبخر لإذابة الصقيع به [ASHRAE 1994]. ويعزى هذا إلى أن خطوط الغاز الساخن تعمل لفترات قصيرة، مما يعني أن فقد الضغط خلال هذه الخطوط لا يؤثر بشكل محسوس على اقتصاديات تشغيل هذه الخطوط. ولقد أوصت جمعية آشري [ASHRAE 1994] باتخاذ الآتي عند تصميم هذه الخطوط:

- أ- أن تملئ هذه الخطوط في اتجاه المبخر لضمان سريان أي سائل ناتج عن تكثف بخار المبرد بخط الغاز الساخن إلى المبخر.

- ب- فرض معدل سريان الغاز الساخن الساري لكل مبخر مساوياً ضعف أو ثلاثة أضعاف معدل سريان المبرد اللازم لحمل التبريد بالمبخر.
- ج- أخذ سرعة سريان الغاز الساخن بخطوط إذابة الصقيع ما بين ٥ م/ث إلى ١٥ م/ث.

ونلاحظ من التوصيتين ب و ج السابقتين عدم تحديد قيم ثابتة في التصميم، وأن القيم المعطاة للاسترشاد بها فقط. ويبين جدول ١٢,١ معدل سريان المبرد لمقاسات مختلفة من مواسير النحاس والصلب عند استخدامها بخطوط إذابة الصقيع لمبرد ١٣٤ أ ومبرد ٢٢ ومبرد ٥٠٢، مع سرعة سريان قدرها ٥ م/ث، و ١٠ م/ث، و ١٥ م/ث. ويلاحظ أن معدل سريان المبرد بجدول ١٢,١ محسوب عند درجة حرارة مكثف قدرها ٢١°م. ويوضح المثال التالي استخدام الجدول.

مثال ١٢,١

احسب قطر مواسير النحاس المستخدمة لخط الغاز الساخن لإذابة الصقيع لمبخر يعمل عند درجة حرارة -١٠°م، وله حمل تبريد قدره ٣٠ كيلووات. افرض استخدام مبرد ٢٢.

الحل

بفرض دورة تبريد بسيطة، وأن الخروج من المبخر عند حالة التشبع (الحالة ١)، وأن الخروج من المكثف عند حالة التشبع (الحالة ٣)، وبفرض درجة حرارة المكثف تساوي ٢١°م كما هو الحال بجدول ١٢,١. وباستخدام جداول مبرد ٢٢ بملحق أ، نجد أن

$$h_1 = 401.20 \text{ kJ/kg} \quad h_3 = 225.3 \text{ kJ/kg}$$

جدول ١٢،١ معدل سريان الغاز الساخن بخطوط إذابة الصقيع لمقاسات مختلفة من المواسير [ASHRAE 1994].

المقاس الاسمى للماسورة	مبرد ١٣٤ أ معدل السريان , كجم/ث	مبرد ٢٢ معدل السريان , كجم/ث	مبرد ٥.٢ معدل السريان , كجم/ث
السرعة	السرعة	السرعة	السرعة
٥ م/ث	١٠ م/ث	١٥ م/ث	١٥ م/ث

نحاس

١٥	٠,١١٧	٠,٢٣٥	٠,٣٥٢	٠,١٦٢	٠,٣٢١٣	٠,٤٨٥	٠,٢٤٤	٠,٤٨٧	٠,٧٣١
١٨	٠,١٩١	٠,٣٨١	٠,٥٧٢	٠,٢٦٢	٠,٥٢٥	٠,٧٨٧	٠,٣٩٦	٠,٧٩٢	١,١٨٨
٢٢	٠,٢٨٩	٠,٥٧٧	٠,٨٦٦	٠,٣٩٨	٠,٧٩٥	١,١٩٣	٠,٦٠٠	١,١٩٩	١,٧٩٩
٢٥	٠,٤٤٢	٠,٨٨٤	١,٣٢٦	٠,٦٠٩	١,٢١٨	١,٨٢٧	٠,٩١٨	١,٨٣٧	٢,٧٥٥
٢٨	٠,٧٣٩	١,٤٧٨	٢,٢١٦	١,١٠٨	٢,٠٣٦	٣,٠٥٤	١,٥٣٥	٣,٠٧١	٤,٦٠٦
٣٥	١,١٧٠	٢,٣٤٠	٣,٥١٠	١,٦١٠	٣,٢٢٠	٤,٨٣٠	٢,٤٣٠	٤,٨٦٠	٧,٢٩٠
٤٢	١,٧٢٠	٣,٤٣٠	٥,١٤٠	٢,٣٦٠	٤,٧٣٠	٧,٠٩٠	٣,٥٦٠	٧,١٣٠	١٠,٦٩٠
٥٤	٢,٨٩٠	٥,٧٧٠	٨,٦٦٠	٣,٩٨٠	٧,٩٥٠	١١,٩٣٠	٦,٠٠٠	١٢,٠٠٠	١٧,٩٩٠
٦٧	٤,٤٧٠	٨,٩٥٠	١٣,٤٢٠	٦,١٦٠	١٢,٣٣٠	١٨,٤٩٠	٩,٣٠٠	١٨,٦٠٠	٢٧,٨٩٠
٧٩	٦,٠٢٤٠	١٢,٤٨٠	١٨,٧٢٠	٨,٦٠٠	١٧,١٩٠	٢٥,٧٩٠	١٢,٩٧٠	٢٥,٩٣٠	٣٨,٩٠٠
٩٢	١١,٠١٠	٢٢,٣٠٠	٣٣,٤٠٠	١٥,٣٠٠	٣٠,٧٠٠	٤٦,٠٠٠	٢٣,١٠٠	٤٦,٣٠٠	٦٩,٤٠٠
١٠٥	١٧,٣٠٠	٣٤,٦٠٠	٥١,٨٠٠	٢٣,٨٠٠	٤٧,٦٠٠	٧١,٤٠٠	٣٥,٩٠٠	٧١,٨٠٠	١٠٨,٠٠
١٣٠	٢٥,٠٠٠	٥٠,١٠٠	٧٥,١٠٠	٣٤,٥٠٠	٦٩,٠٠٠	١٠٣,٠٠	٥٢,٠٠٠	١٠٤,٠٠	١٥٦,٠٠
١٥٦	٤٣,٣٠٠	٨٦,٦٠٠	١٣٠,٠٠	٥٩,٧٠٠	١١٩,٠٠	١٧٩,٠٠	٩٠,٠٠٠	١٨٠,٠٠	٢٧٠,٠٠
٢٠٦	٦٧,٣٠٠	١٣٥,٠٠	٢٠٢,٠٠	٩٢,٨٠٠	١٨٦,٠٠	٢٧٨,٠٠	١٣٩,٩٠	٢٨٠,٠٠	٤٢٠,٠٠

صليب ٨٠

١٠	٠,١٧٧	٠,٣٥٤	٠,٥٣٠	٠,٢٤٤	٠,٤٨٧	٠,٧٣١	٠,٣٦٧	٠,٧٣٥	١,١٠٠
١٥	٠,٢٨١	٠,٥٦٣	٠,٨٤٤	٠,٣٨٨	٠,٧٥٥	١,١٦٣	٠,٥٨٥	١,١٧٠	١,٧٥٠
٢٠	٠,٤٩٤	٠,٩٨٨	١,٤٨١	٠,٦٨٠	١,٣٦١	٢,٠٤١	١,٠٢٦	٢,٠٥٠	٣,٠٨٠
٢٥	٠,٧٩٩	١,٦٠٠	٢,٤٠٠	١,١٠١	٢,٢٠١	٣,٣٠٢	١,٦٦٠	٣,٣٢٠	٤,٩٨٠

صليب ٤٠

٣٢	١,٣٨٥	٢,٧٧٠	٤,١٦٠	١,٩٠٨	٣,٨١٦	٥,٧٣٠	٢,٨٨٠	٥,٧٦٠	٨,٦٤٠
٤٠	١,٨٩٠	٣,٧٧٠	٥,٦٦٠	٢,٦٠٠	٥,٢٠٠	٧,٧٩٠	٣,٩٢٠	٧,٨٤٠	١١,٨٠٠
٥٠	٣,١١٠	٦,٢١٠	٩,٣٢٠	٤,٢٨٠	٨,٥٦٠	١٢,٨٠٠	٦,٤٦٠	١٢,٩٠٠	١٩,٤٠٠
٦٥	٤,٤٣٠	٨,٨٦٠	١٣,٣٠٠	٦,١٠٠	١٢,٢٠٠	١٨,٣٠٠	٩,٢١٠	١٨,٤٠٠	٢٧,٦٠٠
٨٠	٦,٨٤٠	١٣,٧٠٠	٢٠,٥٠٠	٩,٤٣٠	١٨,٩٠٠	٢٨,٣٠٠	١٤,٢٠٠	٢٨,٤٠٠	٤٢,٧٠٠

ميرد ٥٠٢ معدل السريان , كجم/ث	ميرد ٢٢ معدل السريان , كجم/ث	ميرد ١٣٤ أ معدل السريان , كجم/ث	المقاس الاسمي للماسورة
السرعة ١٥ م/ث	السرعة ١٥ م/ث	السرعة ١٥ م/ث	السرعة ١٥ م/ث
٢٤,٥٠٠	٣٢,٥٠٠	٣٥,٤٠٠	١١,٨٠٠
٤٩,٠٠٠	٥١,٠٠٠	٥٥,٥٠٠	١٨,٥٠٠
٧٣,٥٠٠	٧٦,٥٠٠	٨٠,٣٠٠	٢٦,٨٠٠
١١٥,٠٠	١١١,٠٠	١٣٩,٠٠	٤٦,٣٠٠
١٦٧,٠٠	١٩١,٠٠	٢١٩,٠٠	٧٣,٠٠٠
٢٨٩,٠٠	٢٠١,٠٠	٣١٤,٠٠	١٠٥,٠٠
٤٥٥,٠٠	٢٨٩,٠٠		
٦٥٣,٠٠	٤٣٥,٠٠		

وعليه نجد أن معدل سريان المبرد خلال المبخر يعطي كما يلي

$$\dot{m} = \frac{30}{401.20 - 225.3} = 0.171 \text{ kg/s}$$

وبفرض ضعف هذه القيمة لمعدل سريان المبرد خلال خط إذابة الصقيع، أي

$$\dot{m}_{def} = 2 \times 0.171 = 0.341 \text{ kg/s}$$

عندئذ من جدول ١٢,١، وبفرض سرعة سريان بين ٥ إلى ١٠ م/ث بخط إذابة الصقيع نختار ماسورة نحاس قطرها الاسمي هو ١٨ مم.

١٢,٥ اعتبارات هندسية

يجب هندسيا السماح بتصريف الماء الناتج من إذابة الصقيع إلى خارج غرفة التبريد وعدم سقوطه إلى داخل الغرفة أو تراكمه في حوض الصرف، مما يؤدي إلى تبخره إلى هواء الغرفة مرة أخرى، أو تجمده في حوض الصرف وبالتالي إعاقه خروج الصرف إلى خارج الغرفة. لهذا السبب يوضع سخان كهربائي عادة في حوض الصرف لمنع تجمد الماء الناتج عن إذابة الصقيع، ويعمل هذا السخان بنفس الوقت التي تعمل به دورة إذابة الصقيع. أيضاً، يجب

مراعاة إيقاف مروحة الهواء بملف التبريد أثناء دورة الصقيع لمنع سريان الهواء خلال ملف التبريد، وبالتالي الحد من حمل التبريد الناتج عن الحرارة المستخدمة لإذابة الصقيع، وأيضاً لضمان عدم حمل جزء من الماء المذاب إلى غرفة التبريد. وتعمل مروحة ملف التبريد بتخلف زمني بعد انتهاء دورة إذابة الصقيع بعدة دقائق لضمان تصريف معظم الماء المذاب، وتجمد ما بقي منه على سطح الملف، وبالتالي لا يمكن للهواء حمله إلى غرفة التبريد، وأيضاً لإعطاء بعض الوقت للمبرد داخل ملف التبريد من تبريد سطح الملف إلى درجة حرارة مناسبة لتبريد الهواء.

كما يجب أيضاً وضع مصيدة سائل في خط الصرف من الجهة الخارجية لغرفة التبريد. وتعمل هذه المصيدة كحاجز لتسرب الهواء الخارجي إلى غرفة التبريد من خلال ماسورة الصرف. فإذا كان هناك احتمال لتجمد السائل بهذه المصيدة نتيجة وجودها في منطقة درجة حرارتها أقل من الصفر المئوي، لزم استخدام سخان كهربائي على هذه المصيدة، ويعمل هذا السخان مع دورة إذابة الصقيع لملف التبريد المتصل بخط الصرف الذي به هذه المصيدة، ويتم التحكم في دورة إذابة الصقيع إما يدوياً أو أوتوماتياً. ففي الحالة الأولى تبدأ الدورة وتنتهي يدوياً، مما يعني ضرورة توفير العمالة اللازمة لذلك مع توقع الأخطاء الناشئة عن العامل البشري، من حيث التأخر في بدء دورة إذابة الصقيع أو التأخر في إيقافها. وتستخدم الطريقة اليدوية للتحكم في دورة إذابة الصقيع في الحالات التي تعمل فيها هذه الدورة على فترات بعيدة مثل مرة كل شهر أو أكثر.

ويعتبر التحكم الأوتوماتي في دورة إذابة الصقيع أكثر مصداقية من التحكم اليدوي، وهناك عدة احتمالات للتحكم الأوتوماتي في دورة إذابة الصقيع. ومن هذه الاحتمالات الآتي :

استخدام ساعة توقيت (مؤقت) لبدء و/أو إيقاف الدورة.

استخدام إشارة ما لبدء و/أو إيقاف الدورة.

ويمكن بالطبع الخلط بين أي من الاحتمالات السابقة. فمثلاً، يمكن أن تبدأ دورة إذابة الصقيع بساعة توقيت ثم توقف الدورة تبعاً لإشارة ما. ومن أهم الإشارات المستخدمة لبدء دورة الصقيع أو إيقافها درجة حرارة سطح ملف التبريد، أو ضغط المبرد داخل ملف التبريد، أو سرعة مرور الهواء خلال ملف التبريد، أو فرق الضغط بين دخول وخروج الهواء من ملف التبريد. فمثلاً، يمكن أن تبدأ دورة إذابة الصقيع إذا قلت سرعة سريان الهواء خلال ملف التبريد عن حد معين، مما يعني تكون صقيع بقدر كبير على ملف التبريد. كما يمكن أيضاً بدء دورة إذابة الصقيع إذا زاد فرق الضغط بين دخول وخروج الهواء من ملف التبريد عن حد معين، وهكذا.

الفصل الثالث عشر

الضواغط

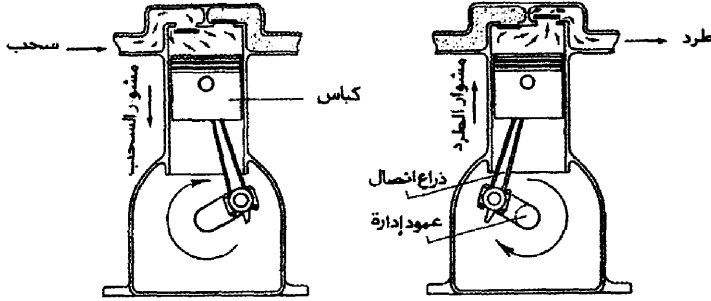
١٣,١ مقدمة

الضاغط هو قلب نظام التبريد بانضغاط البخار. فبدون وجود الضاغط لا وجود لنظام التبريد. يعمل الضاغط على دوران المبرد في دائرة التبريد ورفع ضغطه من ضغط المبخر إلى ضغط المكثف حتى يمكن تكثيف هذا البخار وعودته مرة أخرى إلى المبخر. تقسم الضواغط إلى ضواغط تعمل بالإزاحة الموجبة وأخرى تعمل بالطرد المركزي. وتضم الضواغط التي تعمل بالإزاحة الموجبة عدة أنواع منها: الضواغط الترددية، والضواغط الدورانية، والضواغط اللولبية، وغيرها. وتعتبر الضواغط الترددية والضواغط اللولبية من أكثر الضواغط استخدامًا في نظم تبريد غرف التبريد. لذلك سنقدم فيما يلي عرضًا مبسطًا لهذين النوعين فقط من الضواغط.

١٣,٢ الضواغط الترددية

١٣,٢,١ طريقة العمل

تعتبر الضواغط الترددية من أكثر الضواغط شيوعًا في تطبيقات غرف التبريد. وتستخدم هذه الضواغط مع نظم الهالوكربونات والأمونيا على السواء. ويتكون الضاغط الترددي كما هو مبين بشكل ١٣,١ من كباس يتحرك داخل أسطوانة مسدودة النهاية. وتعرف نهاية الأسطوانة برأس الأسطوانة وتحوي عادة صمامي دخول وخروج المبرد إلى ومن الأسطوانة.



شكل ١٣،١ رسم تخطيطي لضغط ترددي.

يتحرك الكباس داخل الأسطوانة تبعاً لدوران عمود إدارة يتصل بالكباس بذراع اتصال. وبدوران عمود الإدارة دورة كاملة يتحرك الكباس داخل الأسطوانة مشوارين، أحدهما يسمى مشوار السحب والآخر يسمى مشوار الطرد، كما هو مبين بالشكل. ففي مشوار السحب، تسبب حركة الكباس خفض ضغط الغاز داخل الأسطوانة نتيجة التمدد (أي زيادة حجم الغاز)، فإذا قل ضغط الغاز داخل الأسطوانة عن ضغط خط السحب، يفتح هذا الصمام ويسحب الغاز إلى داخل الأسطوانة حتى نهاية مشوار السحب. فإذا وصل الكباس إلى أبعد نقطة له عن نهاية الأسطوانة يبدأ مشوار الطرد، أي حركة الكباس في اتجاه نهاية الأسطوانة، مما يعمل على رفع ضغط الغاز داخل الأسطوانة. بزيادة الضغط داخل الأسطوانة عن ضغط خط السحب يقلل صمام السحب في الحال. وباستمرار حركة الكباس في مشوار الطرد يستمر الضغط داخل الأسطوانة في الارتفاع، حتى إذا زاد هذا الضغط عن ضغط خط الطرد، فتح صمام الطرد عند نهاية الأسطوانة أوتوماتيكياً، فيسرى الغاز إلى الخارج بضغط يعادل ضغط الطرد. فإذا وصل الكباس إلى أقرب نقطة ممكنة له من نهاية الأسطوانة، يبدأ

الكباس في العودة مرة أخرى لمشوار السحب، مما يخفض الضغط داخل الأسطوانة، فيغلق صمام الطرد فوراً ويستمر مشوار السحب كما قدمنا سابقاً.

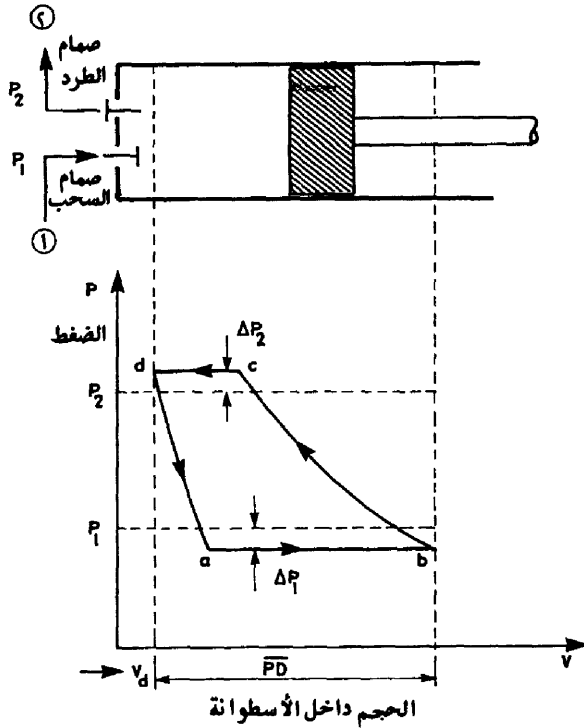
ويمكن تقسيم الضواغط الترددية إلى عدة أقسام تبعاً للخاصية المختارة للتقسيم، فمثلاً تكون هذه الضواغط فردية الفعل أو مزدوجة الفعل. ويكون الضاغط فردي الفعل إذا تم السحب والطرد عند وجه الكباس فقط . أما إذا تم السحب والطرد عند وجه الكباس ونهايته كان الضاغط مزدوج الفعل. كما تقسم الضواغط الترددية أيضاً تبعاً لعدد مراحل رفع الضغط بها. فإذا عمل الضاغط على رفع الضغط في مرحلة واحدة كان الضاغط أحادي المرحلة، أما إذا تم الضغط في مرحلتين كان الضاغط ثنائي المرحلة، وهكذا.

ويبين شكل ١٣،٢ العلاقة بين الضغط والحجم داخل أسطوانة الضاغط خلال مشواري السحب والطرد. وكما هو مبين بالرسم، يبدأ مشوار السحب من النقطة d وينتهي بالنقطة b ماراً بالنقطة a . كذلك يبدأ مشوار الطرد بالنقطة b وينتهي بالنقطة d ماراً بالنقطة c . ويلاحظ من الرسم الآتي:

أ) وجود حجم خلوص قدره V_d وهو الحجم المحصور داخل الأسطوانة عندما يصل الكباس إلى نهاية مشوار الطرد، ولا يمكن عملياً تلاشي هذا الحجم حتى لا يلامس الكباس صفيحة الصمامات الموجودة برأس الأسطوانة.

ب) وجود فقد ضغط قدره ΔP_1 في خط السحب عند دخول البخار إلى الضاغط كنتيجة لاحتكاك السريان مع صمام السحب.

ج) وجود فقد ضغط قدره ΔP_2 عند سريان البخار المضغوط من الأسطوانة إلى خط الطرد (خط الغاز الساخن).



شكل ١٣,٢ علاقة الضغط بالحجم داخل أسطوانة ضاغط ترددي.

١٣,٢,٢ إزاحة الكباس

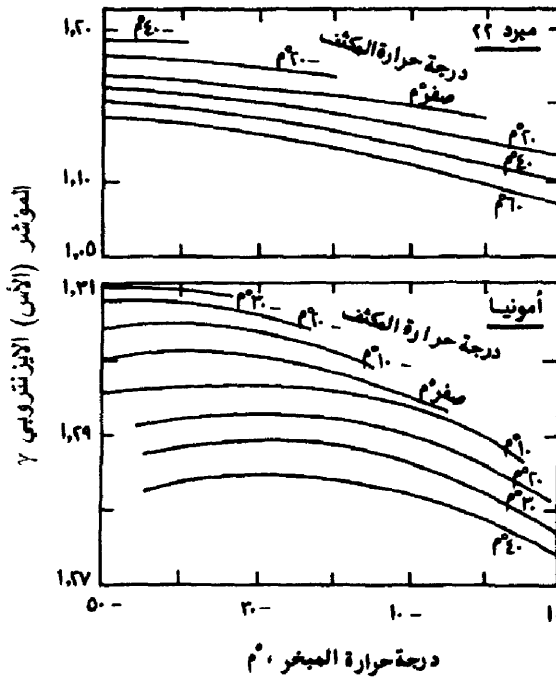
من شكل ١٣,٢ تعرف إزاحة الكباس النظرية، بأنها الحجم الذي يزيحه الضاغط في وحدة الزمن. فإذا كان عدد الأسطوانات بالضاغط هو N_c وكانت سرعة دوران عمود إدارة الضاغط هي N لفة/دقيقة، فإن حجم إزاحة الكباس عندئذ يكون كما يلي:

$$\overline{PD}_a = \frac{I}{60} \frac{\pi}{4} D^2 L N_c N \quad (13.1)$$

حيث D و L هما قطر وطول المشوار على التوالي، و I هي عدد الفعل للكباس، وتأخذ I القيمة ١ أو ٢ إذا كان الضاغط فردي الفعل أو مزدوج الفعل على التوالي.

يلاحظ الآن أن إزاحة الكباس الفعلية تختلف عن القيمة السابقة، حيث إن الحجم المسحوب فعليًا للبخار يتم من النقطة a إلى النقطة b كما هو مبين بشكل ١٣،٢، وتكون إزاحة الكباس الفعلية كما يلي:

$$\overline{PD}_a = V_b - V_a \quad (13.2)$$



شكل ١٣،٣ تغير قيمة المؤشر الأيزنتروبي لمبرد ٢٢ والأمونيا مع درجتي حرارة المبخر والمكثف [Gosney 1982].

عندئذ تعطى إزاحة الكباس الفعلية كما يلي:

$$\overline{PD}_a = \overline{PD} \{1 + C - C r_p^{1/n}\} \quad (13.3)$$

حيث C هي نسبة حجم الخلوص V_d إلى إزاحة الكباس النظرية $\overline{PD}$ و r_p هي نسبة الانضغاط، أي نسبة ضغط الطرد P_d إلى ضغط السحب P_a . أما إذا كانت عملية التمدد والانضغاط أيزنتروبية، أي لم يكن هناك تبادل حراري بين البخار داخل الأسطوانة والمحيط به، وكانت عمليتا التمدد والانضغاط انعكاسيتين (أي أهمل الاحتكاك) فإن قيمة المؤشر البوليتروبي n تصبح مساوية لقيمة المؤشر الأيزنتروبي γ (النسبة بين الحرارة النوعية عند ثبات الضغط إلى الحرارة النوعية عند ثبات الحجم). وتعتمد قيمة n على ضغط ودرجة حرارة المبرد المستخدم، ويبين شكل ١٣،٣ قيم γ المتوسطة عند مدى واسع لدرجات حرارة المبخر والمكثف لمبرد ٢٢ والأمونيا.

١٣،٢،٣ الكفاءة الحجمية

تعرف الكفاءة الحجمية للضاغط الترددي بأنها النسبة بين معدل الكتلة الفعلي الذي قام الضاغط بمناولته إلى المعدل الظاهري للكتلة الذي يبدو أن الضاغط قام بمناولته، أي إن* (Threlkeld 1970&1998)

$$\eta_v = \frac{\dot{m}}{\overline{PD}/v_1} = \frac{\overline{PD}_a/v_b}{\overline{PD}/v_1} \quad (13.4)$$

وتؤول هذه المعادلة إلى الآتي:

* تعرف الكفاءة الحجمية في بعض المراجع بأنها نسبة الحجم الفعلي المزاح للمبرد إلى الحجم الظاهري المزاح بالضاغط وهو تعريف يختلف عن التعريف المعطى هنا.

$$\eta_v = \frac{v_1}{v_b} (1 + C - C r_p^{1/n}) \quad (13.5)$$

حيث v_1 هي الحجم النوعي لبخار المبرد بخط السحب قبل دخوله الضاغط و v_b هي الحجم النوعي عند نهاية مشوار السحب داخل الأسطوانة. ويلاحظ من العلاقة السابقة أن الكفاءة الحجمية للضاغط تقل بزيادة نسبة الانضغاط، لهذا السبب لا يفضل عادة استخدام الضواغط الترددية وحيدة المرحلة عند نسبة انضغاط مرتفعة. ومن المعادلتين السابقتين يعطى معدل سريان المبرد الذي يستطيع الضاغط مناولته كما يلي:

$$\dot{m} = \frac{1}{v_1} \overline{PD} \eta_v \quad (3.16)$$

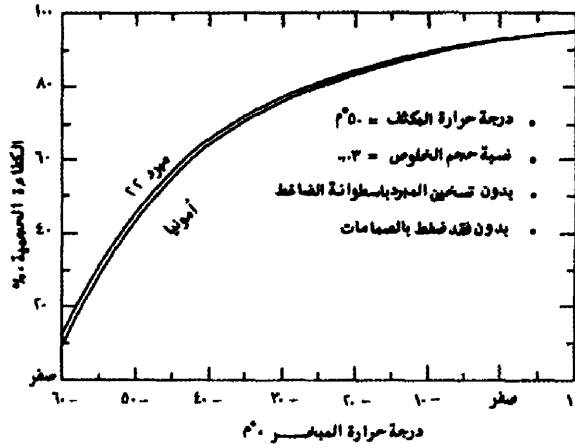
ويوضح شكل ١٣،٤ تغير الكفاءة الحجمية لضاغط ترددي وحيد المرحلة مع درجة حرارة المبخر لمبرد ٢٢ والأمونيا وذلك بفرض تساوى قيمتي v_b و v_1 ، ودرجة حرارة مكثف قدرها ٥٠°م، ونسبة خلوص $C = 0.03$ ، هذا، ولقد فرض أيضاً عند إعداد هذه العلاقة أن انضغاط المبرد تم خلال عملية أيزنتروبية.

١٣،٢،٤ سعة التبريد

يتم ضغط المبرد بالضاغط الترددي المثالي بعملية أيزنتروبية، أي عملية أدياباتية انعكاسية. عندئذ تعطى قدرة الانضغاط كما يلي:

$$\dot{W} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (13.7)$$

حيث h_1 و h_2 هما إنثالبي المبرد قبل صمام السحب وبعد صمام الطرد بالضاغط على التوالي. أما عملياً، فيحيد الضاغط عن هذه العملية المثالية نتيجة الآتي:



شكل ١٣,٤ تغير الكفاءة الحجمية للضواغط الترددية مع درجة حرارة المبخر لمبرد ٢٢ والأمونيا.

- أ) فقد ضغط المبرد عند سريانه خلال صمامي السحب والطرء.
- ب) تسخين المبرد خلال مروره فوق الموتور في حالة الضواغط محكمة أو نصف محكمة الغلق.
- ج) تسخين المبرد في أسطوانة الضاغط أثناء مشوار السحب.
- د) انتقال الحرارة من المبرد إلى أسطوانة الضاغط أثناء مشوار الانضغاط، نتيجة تبريد الأسطوانة بالهواء المحيط أو بالماء في بعض الحالات.

هـ) الاحتكاك الناشئ عن السريان المضطرب للمبرد داخل أسطوانة الضاغط وكذلك احتكاك السريان مع جدار أسطوانة الضاغط.

ويلاحظ أن البند (هـ) عاليه يجعل عملية الانضغاط لا انعكاسية، أما البند (ج) فيجعل عملية الانضغاط لا أدياباتية، وينتج عن البنود (أ) و (ب) و (ج) عاليه اختلاف حالة المبرد عند بداية ونهاية عملية الانضغاط عن الدورة المثالية، حتى عندما لا يؤخذ التأثيران (د) و(هـ) في الاعتبار، مما يزيد القدرة اللازمة لانضغاط المبرد.

وبفرض إهمال البند (هـ) عاليه، يمكن القول أن انضغاط المبرد يتم بعملية بوليتروبية بدلاً من العملية الأيزنتروبية، عندئذ تعطى القدرة اللازمة لانضغاط المبرد كما يلي:

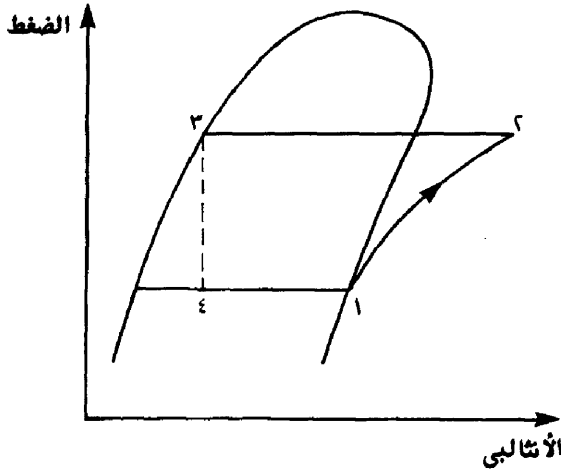
$$\dot{W} = \dot{m} \frac{n}{n-1} P_b v_b [r_p^{(n-1)/n} - 1] \quad (13.8)$$

ويعتمد أداء دورة التبريد إلى حد كبير على أداء الضاغط الذي هو أحد المكونات الأساسية لدورة التبريد. ويقصد عادة بأداء الضاغط تغير معدل سريان كتلة المبرد خلال الضاغط والقدرة اللازمة لانضغاط المبرد مع تغير ظروف تشغيل الضاغط. ولقد فضل الكثير من مصنعي الضواغط استبدال معدل سريان الكتلة خلال الضاغط بسعة التبريد التي تتناسب طردياً مع معدل سريان الكتلة. وبفرض أن الضاغط يعمل بدائرة تبريد مثالية كالمبينة على خريطة الضغط الإنثاليبي بشكل ١٣،٥ فإن سعة تبريد الضاغط $\dot{Z}$ تعطى عندئذ كما يلي:

$$\dot{Z} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (13.9)$$

وبالتعويض عن قيمة $\dot{m}$ بدلالة الكفاءة الحجمية ينتج أن:

$$\dot{Z} = \frac{1}{v_1} \overline{PD} (1 + C - C r_p^{1/n}) (h_1 - h_2) \quad (13.10)$$



شكل ١٣,٥ دورة تبريد بسيطة.

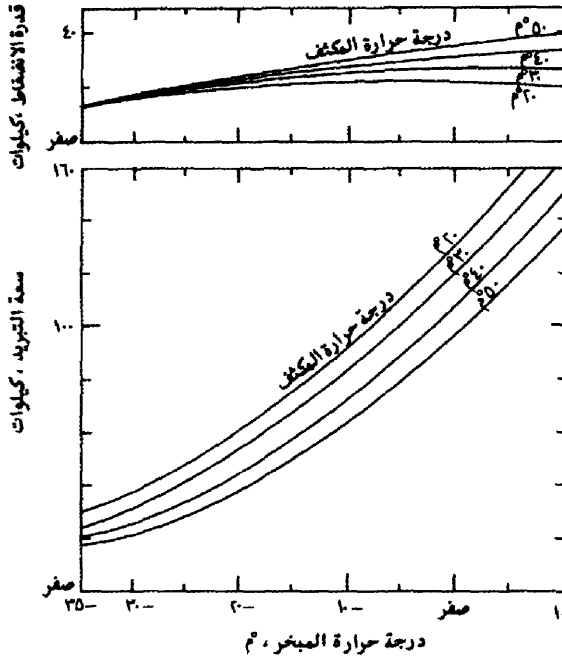
ويبين شكل ١٣,٦ تغير كل من سعة التبريد وقدرة الانضغاط لأحد الضواغط الترددية مع درجتي حرارة المبخر والمكثف لمبرد ٢٢. ويمثل الشكل حالة نمطية للمبردات الأخرى وباستخدام ضواغط أخرى، وذلك من حيث اتجاه المنحنيات بالشكل، دون القيمة العددية.

بمراجعة الشكل يمكن استنتاج الآتي عن أداء الضواغط الترددية:

أ) انخفاض سعة تبريد الضاغط بانخفاض درجة حرارة المبخر (ضغط السحب) و/أو ارتفاع درجة حرارة المكثف (ضغط الطرد).

ب) انخفاض قدرة الضاغط بانخفاض درجة حرارة المبخر (ضغط السحب) و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف (ضغط الطرد).

ج (زيادة قدرة الانضغاط لكل وحدة سعة تبريد بانخفاض درجة حرارة المبخر و/أو ارتفاع حرارة المكثف.



شكل ١٣،٦ تغير سعة التبريد وقدرة الانضغاط لأحد الضواغط مع درجتي حرارة التشبع بالمكثف والمبخر لمبرد ٢٢ [Gosney 1982] .

أيضاً تعطى قدرة الانضغاط بالضغوط كما يلي:

$$\dot{W} = \overline{PD} \left(1 + C - C r_p^{1/n} \right) \frac{n}{n-1} P_b \left[r_p^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (13.11)$$

ونظراً للبند ج عاليه يفضل وجود طريقة تحكم لسعة تبريد الضاغط لتقليل قدرة الانضغاط لكل وحدة سعة تبريد عند انخفاض سعة التبريد بدورة

التبريد. وهناك عدة تقنيات للتحكم في سعة تبريد الضاغط الترددي. ولمزيد من التفاصيل حول هذا الموضوع يمكن الرجوع إلى [السيد ١٩٩٣].

مثال ١٣،١

يتكون ضاغط ترددي فردي الفعل من ٤ أسطوانات قطر كل منها الداخلي ٩٢مم، وبطول مشوار قدره ٦٧مم. يعمل الضاغط بسرعة دوران ١٤٥٠ لفة/دقيقة بين درجتي حرارة تشبع بالمبخر والمكثف قدرهما -10°C و 50°C على التوالي. افرض أن الانضغاط أيزنتروبي وأن الضاغط يستخدم مبرد ٢٢، وأن نسبة حجم الخلوص هي ٣٪، وأن بخار المبرد يخرج من الضاغط عند حالة التشبع. أيضا افرض ١٠ كيلو بسكال فقد ضغط في صمام السحب وصمام الطرد، و 50°C تسخين في مشوار السحب بأسطوانة الضاغط.

(أ) احسب إزاحة الكباس النظرية والفعلية.

(ب) احسب الكفاءة الحجمية للضاغط.

(ج) احسب معدل كتلة المبرد التي يناولها الضاغط.

الحل

(أ) تعطى إزاحة الكباس النظرية كما يلي:

$$\overline{PD} = \frac{1}{60} * \frac{\pi}{4} (0.092)^2 * 0.067 * 4 * 1450 \text{ m}^3/\text{s}$$

من ملحوظ (أ) لخواص مبرد ٢٢ نجد أن ضغط المبخر المناظر لدرجة حرارة -10°C هو ٣٥٤،٨ كيلوبسكال مطلق وضغط المكثف المناظر لدرجة حرارة 50°C هو ١٩٤٢،٧ كيلوبسكال مطلق، وتكون نسبة الانضغاط r_p مساوية ٥،٤٨. من شكل ١٣،٣ نجد أن قيمة γ لمبرد ٢٢ هي ١،١٢، وتحسب إزاحة الكباس الفعلية كما يلي:

$$\overline{PD}_a = 0.043 * \{1 + 0.03 - 0.03 * (5.48)^{1/1.12}\} = 0.0384 \text{ m}^3 / s$$

ب (من خريطة مبرد ٢٢ في ملحق (أ) نجد أن قيمة v_1 و v_b تعطى كما يلي:

$$v_1 = 0.06527 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_b = 0.0071 \text{ m}^3/\text{kg}$$

وتحسب الكفاءة الحجمية كما يلي:

$$\eta_v = \frac{0.065}{0.071} \left\{ 1 + 0.03 - 0.03 \left\{ \frac{1942.7 + 10}{354.8 - 10} \right\}^{1/1.12} \right\} = 0.814$$

ج (يحسب معدل الكتلة التي يناولها الضاغط كما يلي:

$$\dot{m} = \frac{1}{0.065} \times 0.043 \times 0.814 = 0.54 \text{ kg/s}$$

١٣,٣ الضواغط اللولبية

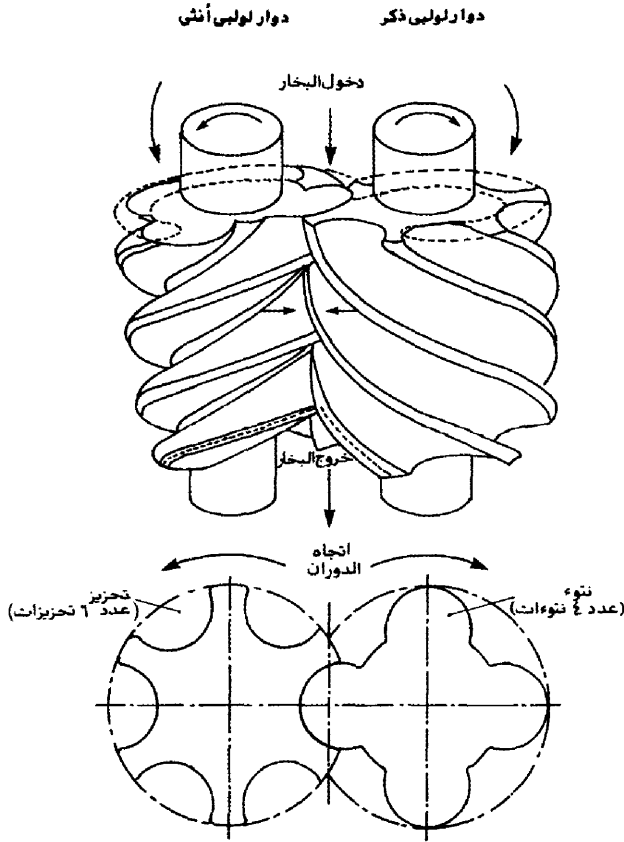
١٣,٣,١ طريقة العمل

الضواغط اللولبية هي ضواغط موجبة الإزاحة. ولقد دخلت الضواغط اللولبية صناعة التبريد وتكييف الهواء بعد عام ١٩٦٠م. ومنذ ذلك التاريخ تطورت صناعة هذه الضواغط تطوراً كبيراً وشهدت العديد من التغيرات في تصميمها. وتمتاز هذه الضواغط بالسهولة في التصميم والتشغيل وقوة تحملها وطول عمرها وصغر حجمها وارتفاع كفاءتها بالمقارنة بالضواغط الترددية. وتتوفر الضواغط اللولبية بسعات تبريد أكبر من ٧٠ كيلووات (حوالي ٢٠ طن تبريد) وحتى ٦٤٠٠ كيلووات (حوالي ١٣٠٠ طن تبريد). وتعمل الضواغط

اللولبية بنسبة انضغاط (نسبة ضغط الطرد إلى ضغط السحب) مرتفعة نسبياً تصل إلى حوالي ١:٢٥ مما يؤهلها للاستخدام كمرحلة واحدة بنظم التبريد منخفضة درجة الحرارة، بدلاً من استخدام مرحلتين أو أكثر من الضواغط.

يتكون الضاغط اللولبي من المكونات الأساسية الآتية: دوار لولبي ذكر، ودوار لولبي أنثى، وأسطوانة حاوية للدوارين، ووصلة سحب بخار المبرد إلى الضاغط، ووصلة طرد بخار المبرد إلى خط الطرد، وذلك بالإضافة إلى أجهزة الأمان والتحكم الأخرى. ويبين شكل ١٣,٧ رسماً تخطيطياً لأحد هذه الضواغط مبيناً مكوناته. وكما هو مبين يتكون الدوار اللولبي الذكر من عمود أسطوانى به نتوءات مستديرة حلزونية، أما الدوار اللولبي الأنثى فهو عبارة عن عمود أسطوانى به تجاويف (أو تحازيز) مستديرة حلزونية، وبدوران الدوار الذكر يتم تعشيق نتوءاته في تجاويف الدوار الأنثى مسبباً دورانه هو الآخر. كما هو مبين بالشكل أيضاً يدخل بخار المبرد من وصلة السحب ويملاً الفراغات بين الدوارين والأسطوانة الخارجية، وبدوران الدوار الذكر ومن ثم دوران الدوار الأنثى، يزاح بخار المبرد بين الدوارين والأسطوانة إلى الأمام، حيث يقل الحجم، مما يسبب انضغاط بخار المبرد. وينتقل بخار المبرد تدريجياً في اتجاه وصلة الطرد، حيث يدفع إلى خارج هذه الوصلة عند ضغط الطرد. وتصمم الضواغط الدورانية باختلاف عدد النتوءات بالدوار الذكر عن عدد التجاويف (التحزيرات) بالدوار الأنثى وهى عادة ٤ في الأول و ٦ في الثانى.

ويتضح من فكرة تشغيل الضاغط اللولبي أن هذا الضاغط له نسبة انضغاط ثابتة تعتمد على نسبة التغير في الحجم بين السحب والطرد بالضاغط. كما يتضح أيضاً أن عملية السحب والطرد هنا تتم بطريقة مستمرة وليس بطريقة متقطعة كما هو الحال في الضاغط الترددي، مما يساعد على خفض الاهتزاز والضوضاء بالضاغط اللولبي بالمقارنة بالضاغط الترددي.



شكل ١٣,٧ رسم تخطيطي لفكرة تشغيل الضاغط اللولبي.

يُدرس أداء الضواغط اللولبية بنفس الطريقة التي يُدرس بها أداء الضواغط الترددية. ويلزم لدراسة الضواغط اللولبية أن يحدد أولاً إزاحة الكباس بالضاغط وكفاءته الحجمية. عندئذ يمكن حساب تغير سعة تبريد الضاغط وقدرة الانضغاط اللازمة له بتغير ظروف التشغيل المختلفة مثل درجتي حرارة التشبع بالمبخر والمكثف.

١٣,٣,٢ إزاحة الكباس

وبفرض أن الدوارين الذكر والأنثى يعملان معًا ككباس، فإن إزاحة الكباس تقدر عندئذ بمعدل الحجم الذي يزيحه الكباس من ضغط السحب إلى ضغط الطرد، مقياسًا عند ضغط السحب. فإذا كان عدد الفتوات بالدوار الذكر هو ٤ وكان يدور بسرعة N ، وكان عدد التجويفات بالدوار الأنثى ٦ فإن سرعة دورانه تصبح ثلثي القيمة N . وبأخذ مقطع الضاغط عند وصلة السحب به وقبل بدء عملية انضغاط البخار، فإن مساحة المقطع المملوء بالبخار بين أي نتوئين بالدوار الذكر وسطح الأسطوانة الحاوية هو a_m ، وكذلك مساحة المقطع المملوء بالبخار بين أي تجويف بالدوار الأنثى وسطح الأسطوانة الحاوية هو a_f ، كما هو مبين بشكل ١٣,٧. عندئذ تعطى إزاحة الكباس النظرية كما يلي:

$$\overline{PD} = L(4a_m N + 6a_f \cdot \frac{2}{3}N) \quad (13.12)$$

حيث L هي طول أي من الدوارين. وتؤول العلاقة السابقة إلى الآتي:

$$\overline{PD} = 4LN(a_m + a_f) \quad (13.13)$$

فإذا كان قطر أي من الدوارين (نفس القطر لكل منهما) هو D فإن إزاحة الكباس تصبح

$$\overline{PD} = K \frac{\pi}{4} D^2 LN \quad (13.14)$$

حيث K معامل يعطى كما يلي:

$$K = \frac{4(a_m + a_f)}{(\pi/4)D^2} \quad (13.15)$$

وهي تمثل النسبة بين مساحة المقطع بالضواغط اللولبي المملوءة بالبخار قبل عملية الانضغاط إلى هذه المساحة بضواغط ترددي له نفس قطر الكباس D . عندئذ تعطى الإزاحة الفعلية للضاغط اللولبي بالصورة الآتية :

$$\overline{PD} = K \overline{PD}_r \quad (13.16)$$

حيث $\overline{PD}_r$ هي إزاحة الكباس بضواغط ترددي له نفس القطر D ونفس طول المشوار L ونفس سرعة الدوران N . ويأخذ المعامل K عادة القيمة ٠,٦٢ .

١٣,٣,٣ الكفاءة الحجمية

تعرف الكفاءة الحجمية للضاغط اللولبي بنفس التعريف المستخدم في الضواغط الترددي. وعليه تعطى الكفاءة الحجمية للضاغط اللولبي كما يلي:

$$\eta_v = \frac{v_1}{v_b} (1 + C - Cr_p^{1/n}) \quad (13.17)$$

حيث v_1 و v_b هما الحجم النوعي خارج وصلة السحب وداخل الضواغط قبل عملية السحب، على التوالي. وتعرف C في المعادلة السابقة بأنها نسبة حجم الخلوص في نهاية عملية الانضغاط إلى إزاحة الكباس بالضواغط، وتعرف n بأنها المعامل البوليتروبي لعملية الانضغاط. ونلاحظ أن قيمة v_1 تساوي تقريباً v_b لانخفاض قيمة فقد الضغط في وصلة السحب بالضواغط اللولبي بالمقارنة بهذا الفقد في الضواغط الترددي. أيضاً تتضاءل قيمة C بالضواغط اللولبي بالمقارنة بالضواغط الترددي، ولهذا السبب تكون الكفاءة الحجمية للضاغط اللولبي أعلى بكثير منها للضاغط الترددي، ولا تتخفض هذه الكفاءة كثيراً، (كما هو الحال بالضواغط الترددي)، عند ارتفاع نسبة الانضغاط r_b بالضواغط (مرة

أخرى لصغر قيمة C). ويقدر معدل الكتلة التي تبادلها الضاغط اللولبي بنفس المعادلة المستخدمة مع الضاغط الترددي، أي معادلة (13.6).

تعمل الضواغط اللولبية بنسبة انضغاط ثابتة، فإذا كانت عملية الانضغاط بوليتروبية بمؤشر n ، وكان حجم البخار المسحوب V_s أو بمعدل حجم $\overline{PD}$ تبعاً لتعريف إزاحة الكباس لضاغط اللولبي، وضغطه P_s وكان الحجم في نهاية عملية الانضغاط V_d ، فإن ضغط الطرد داخل الضاغط يكون عندئذ كما يلي:

$$\frac{P_d}{P_s} = \left(\frac{V_s}{V_d} \right)^n = \phi^n \quad (13.18)$$

حيث ϕ هي نسبة الحجم عند بداية عملية الانضغاط إلى الحجم عند نهاية العملية. وتحسب القدرة اللازمة للانضغاط عندئذ كما يلي:

$$\dot{W} = \frac{n}{n-1} P_s \overline{PD} \left\{ \left(r_p \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \quad (13.19)$$

حيث r_b هي نسبة انضغاط الضاغط، أي النسبة بين P_d و P_s . فإذا كانت العملية أيزنتروبية، يستخدم المؤشر الأيزنتروبي γ بدلاً من المؤشر البوليتروبي n في العلاقة السابقة. ويعتمد ضغط السحب بالضاغط P_s على ضغط المبخر P_1 ، حيث يتساوى الضغطان في القيمة. أما ضغط الطرد من الضاغط P_d فيعتمد أساساً على نسبة الحجمين في بداية ونهاية عملية الانضغاط، وهي تعتمد بدورها على الأبعاد الهندسية للضاغط وطريقة تصميمه، وقد يختلف هذا الضغط بالتالي عن الضغط بخط الطرد خارج الضاغط والمساوي لضغط المكثف P_2 تبعاً لظروف تشغيل نظام التبريد. وهذا الاختلاف بين P_d و P_2 يؤثر على قيمة القدرة $\dot{W}$ ، والمعطاة سابقاً في حالة تساوي P_d و P_2 فقط. وعليه تكون القدرة

اللازمة لعملية الانضغاط عند أي قيمة لضغط الطرد P_d الضاغط كما يلي [السيد ١٩٩٣]:

$$\dot{W} = \frac{n}{n-1} P_1 \overline{PD} [\phi^{n-1} - 1] + P_1 \overline{PD} \phi^{n-1} \left[\frac{P_2/P_1}{\phi^n} - 1 \right] \quad (13.20)$$

١٣,٣,٤ الكفاءة الأيزنتروبية

وتقدر الكفاءة الأيزنتروبية للضاغط بدلالة القدرة السابقة كما يلي:

$$\eta_{isen} = \frac{\dot{m}(h_2 - h_1)}{\dot{W}} \quad (13.21)$$

حيث h_1 و h_2 هي إنتالبي البخار خارج الضاغط بخط السحب والطرء على التوالي لعملية انضغاط أيزنتروبية من الحالة ١ بخط السحب إلى الحالة ٢ بخط الطرد، و $\dot{m}$ هي معدل سريان بخار المبرد. وتؤول المعادلة السابقة إلى الآتي:

$$\eta_{isen} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{\frac{n}{n-1} [\phi^{(n-1)} - 1] + \phi^{n-1} \left[\frac{P_2/P_1}{\phi^n} - 1 \right]} \quad (13.22)$$

حيث h_1 و h_2 هما على التوالي الضغط بخط السحب وبخط الطرد.

مثال ١٣,٢

يعمل ضاغط لولبي ثنائي القلاووظ بين درجتي حرارة مبخر ومكثف قدرهما ٣٠- و ٥٥°م على التوالي، مستخدماً مبرد ٢٢، وبالمواصفات الآتية: قطر دوار قدره ١٥سم، وطول مشوار قدره ١٢سم، وسرعة دوران قدرها ٣٥٠٠ لفة/دقيقة، ومعامل نسبة مساحة مقطع K قدره ٠,٦، ونسبة حجم خلوص

قدرها ٠,٠١، ونسبة حجم في بداية الانضغاط إلى الحجم في نهاية الانضغاط قدرها ٥. افرض عملية انضغاط بوليتروبية بمؤشر n قدره ١,٢٠، احسب الآتي:

- (أ) إزاحة الكباس للضاغط.
- (ب) الكفاءة الحجمية للضاغط .
- (ج) قدرة التشغيل.
- (د) الكفاءة الأيزنترورية لعملية الانضغاط.
- (هـ) سعة التبريد لدورة تبريد بسيطة تعمل بهذا الضاغط.
- (و) معامل أداء دورة التبريد.

الحل

- (أ) باستخدام معطيات المثال تقدر إزاحة الكباس كما يلي:

$$\overline{PD} = 0.6 * \frac{\pi}{4} * (0.15)^2 * 0.12 * \frac{3500}{60} = 0.0742 \text{ m}^3 / \text{s}$$

- (ب) يمكن إيجاد نسبة الضغط العالي إلى الضغط المنخفض r_p

$$r_p = \frac{P_d}{P_s} = \left(\frac{V_s}{V_d} \right)^n = (5)^{1.2} = 6.9$$

- (ج) وبإهمال التغير في الحجم النوعي لبخار المبرد قبل وبعد عملية السحب تقدر الكفاءة الحجمية كما يلي:

$$\eta_v = 1 + 0.01 - 0.01(6.9)^{1/1.2} = 0.96$$

- (د) من ملحوظ أن لمبرد ٢٢ نجد أن ضغط المبخر P_l هو ١٦٣,٩ كيلوبسكال وضغط المكثف هو ١٩٤٢,٧ كيلوبسكال. وبأخذ قيمة n

مساوية ١,٢ كما هو معطى بالمثال فإن قدرة التشغيل تعطى كما يلي:

$$\dot{W} = \frac{1.20}{1.20 - 1} * 163.9 * 0.0742(5^{0.2} - 1) + 163.9 * 0.0742 * 5^{0.2} \left(\frac{1943.2}{163.9 * 5^{1.2}} - 1 \right) = 39.76 \text{ kW}$$

هـ) بفرض دائرة تبريد بسيطة كالموضحة بشكل ١٣,٥، ومن ملحق أ نجد أن الإنتالبي h_1 بخط السحب تساوي ٣٩٢,٧ كيلوجول/كجم، وإنتالبي الخروج من الضاغط h_2 بخط الطرد تساوي ٤٥٧ كيلوجول/كجم، وإنتالبي الخروج من المكثف h_3 تساوي ٢٦٣ كيلوجول/كجم، وحجم البخار النوعي v_1 بخط سحب الضاغط يساوي ٠,١٣٥ م^٣/كجم. عندئذ يحسب معدل الكتلة $\dot{m}$ التي يناولها الضاغط كما يلي:

$$\dot{m} = \frac{1}{0.135} \times 0.0742 \times 0.96 = 0.528 \text{ kg/s}$$

وتكون قدرة التشغيل لعملية أيزنتروبية كما يلي:

$$\dot{W}_{isen} = \dot{m}(h_2 - h_1) = 0.528(457 - 392.7) = 34 \text{ kW}$$

وتحسب الكفاءة الأيزنتروبية كما يلي:

$$\eta_{isen} = \frac{34}{39.76} = 0.86$$

و) تعطى سعة تبريد الدورة البسيطة كما يلي

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= \dot{m}(h_1 - h_3) \\ &= 0.528(392.7 - 263) = 68.48 \text{ kW} \end{aligned}$$

يقدر معامل أداء دورة التبريد البسيطة التي تعمل بالضاغط المعطى
بهذا المثال كما يلي

$$\text{COP} = \frac{68.48}{39.76} = 1.72$$

الرموز ومعانيها للفصل الثالث عشر

a_f	مساحة المقطع المملوء بالبخار في تجويف الدوار الأنثى [م ^٢]
a_m	مساحة المقطع المملوء بالبخار في تجويف الدوار الذكر [م ^٢]
C	نسبة الخلوص [-]
D	القطر [م]
h	الانثالي [كجول/كجم]
I	عدد الفعل للضاغط [-]
K	النسبة بين إزاحة الكباس اللولبي والتردد
L	طول المشوار [م]
$\dot{m}$	معدل سريان الكتلة [كجم/ث]
N	عدد لفات الضاغط في الدقيقة [١/دقيقة]
n	أس العملية البولتروبية [-]
N_c	عدد الأسطوانات في الضاغط [-]
P_a	ضغط السحب [كيلو باسكال]
PD	إزاحة الكباس [م ^٣ /ث]
PD_r	الإزاحة لكباس ترددي [م ^٣ /ث]
P_d	ضغط الطرد [كيلو باسكال]
PD_a	الإزاحة الفعلية [م ^٣ /ث]
P_s	ضغط السحب [باسكال]
r_p	نسبة ضغط الطرد إلى ضغط السحب [-]
v_1	الحجم النوعي عند السحب [م ^٣ /كجم]
v_b	الحجم النوعي في نهاية مشوار السحب داخل الأسطوانة [م ^٣ /كجم]
$\dot{W}$	القدرة [كيلو وات]
$\dot{Z}$	سعة الضاغط [كيلو وات]

الحروف الإغريقية

η_{isen}	الكفاءة الايزنتروبية للضاغط [-]
η_v	الكفاءة الحجمية [-]
φ	نسبة الحجم عند بداية عملية الانضغاط إلى الحجم عند نهاية العملية
γ	المؤشر الايزنتوبي (C_p/C_v) [-]

الفصل الرابع عشر

ملفات التبريد والمكثفات

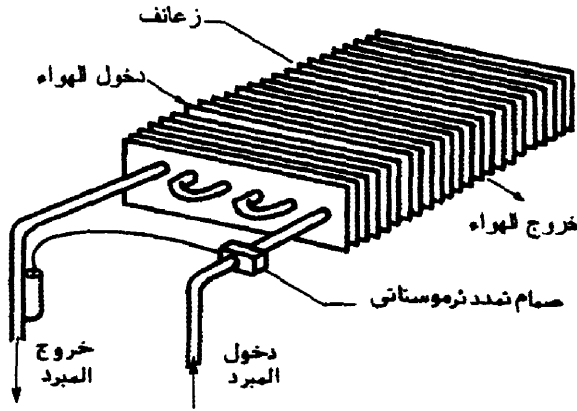
١٤,١ مقدمة

في الفصل الثاني قدمنا دورة التبريد المستخدمة في مخازن التبريد وعرضنا أساسيات تحليل هذه الدورة، وحساب الأحمال الحرارية الخاصة بالعمليات المختلفة بها. وفي الفصل الثامن قمنا بتقديم نظم التبريد الشائعة الاستخدام في مخازن التبريد وكيفية المفاضلة بين هذه النظم واختيارها في التطبيقات المتنوعة لمخازن التبريد. وبالطبع لا تعمل هذه النظم دون معدات تمثلها على أرض الواقع. ويتكون أي نظام تبريد من المكونات الأساسية الآتية: ملف تبريد، وضغط، ومكثف، وصمام تمدد، وأنابيب ومواسير لتوصيل المكونات السابقة مع بعضها البعض، بالإضافة إلى العديد من أجهزة التحكم والقياس. فلقد تم عرض تصميم أنابيب ومواسير نقل المبرد بين المكونات المختلفة لنظم التبريد في الفصل التاسع. وقدمنا في الفصل العاشر صمامات التمدد ونظم وأجهزة التحكم الشائعة الاستخدام في نظم التبريد. وعرضنا لبعض أنواع الضواغط في الفصل الثالث عشر.

وفي الفصل الحالي نقدم عرضاً موجزاً لباقي المعدات الأساسية التي لم نتعرض لها فيما سبق، وهي ملفات التبريد، والمكثفات. ويشمل العرض أهم أنواع هذه المعدات ومواصفاتها وأدائها. ونقدم أيضاً في هذا الفصل كيفية اختيار هذه المعدات وإيجاد نقطة اتزانها عند العمل معاً، وكيفية اختيار المعدات اللازمة لتصميم مخازن التبريد.

١٤,٢ ملفات التبريد

تصنع ملفات التبريد بعدة تصميمات إلا أن أكثرها انتشاراً على الإطلاق هي ملفات التبريد مباشرة التمدد، أي ملفات التبريد التي يسري بها المبرد، فيتم تبخير هذا المبرد مباشرة بالحمل الحراري لملف التبريد. ويتكون هذا النوع من ملفات التبريد من أنابيب معدنية ذات زعانف (أسطح ممتدة) على سطحها الخارجي، كما هو مبين بشكل ١٤,١.



شكل ١٤,١ ملف تبريد مباشر.

يسري المبرد داخل الأنابيب ويسري الهواء خارجها فيتم تبريده بالزعانف. وتعتمد المسافة بين الزعانف وبعضها البعض على درجة حرارة الهواء المراد تبريده. فمثلاً عند استخدام ملفات التبريد في غرف التبريد التي تعمل عند درجات حرارة أعلى من الصفر المئوي تؤخذ كثافة الزعانف لهذه الملفات من ٤٨٠ إلى ٥٦٠ زعنفة/متر. وبانخفاض درجة حرارة غرف التبريد يلزم الإقلال من كثافة الزعانف، نظراً لتكون الصقيع (الجليد) الناتج عن تجمد الماء المكثف من بخار الماء بالهواء. لذا تؤخذ كثافة الزعانف حوالي ٢٤٠ زعنفة/متر في غرف التبريد التي تعمل عند درجة حرارة أقل من الصفر

المثوي، وتقل هذه الكثافة إلى حوالي ١٦٠ زعنفة/متر في تطبيقات درجة الحرارة المنخفضة. وتصنع الأنابيب عادة من النحاس، بينما تصنع الزعانف من الألومنيوم، إلا أن هناك بعض ملفات التبريد المصنوعة من أنابيب نحاس مع زعانف نحاس أو أنابيب الألومنيوم مع زعانف الألومنيوم [ASHRAE 1992].

تنتقل الحرارة بين ملفات التبريد وهواء الغرفة أما بالحمل الحر (أي الحمل الطبيعي) أو بالحمل القسري. ففي الطريقة الأولى يبرد الهواء الملامس لسطح ملف التبريد، فتزيد كثافته ويتجه إلى أسفل مسبباً حركة الهواء، مما يساعد على تحسين عملية التبريد. أما في الطريقة الثانية فتستخدم مروحة لدفع الهواء على سطح ملف التبريد، مما يحسن عملية تبريد الهواء إلى درجة تزيد بقدر كبير مقارنة بانتقال الحرارة بالحمل الحر.

يعتمد اختيار ملف التبريد بغرف التبريد على عدة عوامل أهمها الآتي:

- (أ) أن تكون سعة تبريد الملف مساوية لسعة التبريد المطلوبة.
- (ب) أن تصل درجة حرارة غرف التبريد إلى درجة التصميم.
- (ج) أن يكون أداء ملف التبريد اقتصادياً عند ظروف التشغيل المختلفة.
- (د) أن تكون تكلفته الأولية في الحدود المسموح بها.
- (هـ) أن يكون حجمه ومواصفات أبعاده في حدود الحيز المتاح له بغرفة التبريد.

ويضاف إلى هذه العوامل الخمس السابقة عاملاً سادساً يعرف هذا العامل بفرق درجة المبخّر، ويعطى له الرمز TD. وتعرف فرق درجة حرارة المبخّر بأنها فرق درجات الحرارة بين الهواء الداخل إلى ملف التبريد (ويؤخذ عادة مماثلاً لدرجة حرارة غرفة التبريد) ودرجة حرارة المبرد (أي درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط المبخّر) داخل ملف التبريد.

وتعتمد سعة تبريد ملف التبريد على فرق درجة حرارة المبخر، فتتغير سعة التبريد خطياً مع TD، عند ثبات ظروف التشغيل الأخرى. فمثلاً بزيادة قيمة فرق درجة حرارة المبخر من ٢ إلى ٤°م تزيد سعة التبريد إلى الضعف. لذا يجب اختيار أعلى قيمة ممكنة لفرق درجة حرارة المبخر لضمان توصيف ملف التبريد صغير السطح نسبياً، وبالتالي مقبول التكلفة الأولية. إلا أن فرق درجة حرارة المبخر يؤثر مباشرة في الرطوبة النسبية للهواء الخارج من ملف التبريد، فبارتفاع قيمة TD تقل الرطوبة النسبية للهواء وبانخفاض قيمة TD تزيد قيمة الرطوبة النسبية. ويعزى هذا إلى اعتماد درجة حرارة سطح ملف التبريد على هذا الفرق، مما يعني انخفاض درجة حرارة هذا السطح بزيادة TD، وهذا بالضرورة يعني زيادة الفرق بين درجة حرارة سطح ملف التبريد ودرجة حرارة نقطة الندى للهواء الداخل إلى الملف، أي زيادة معدل تجفيف الهواء.

وبالطبع يؤثر انخفاض الرطوبة النسبية للهواء بغرف التبريد على الأغذية المخزونة بهذه الغرف نتيجة التجفيف الزائد، مما قد يؤدي إلى تلفها، أما ارتفاع الرطوبة النسبية فيؤدي إلى نمو الفطريات والبكتيريا والعفن على سطح هذه الأغذية. لذا من الضروري حفظ الأغذية المكشوفة عند الرطوبة النسبية المثلى المناظرة لدرجة الحرارة المثلى. أما الأغذية المعلبة فلا يحتاج تخزينها إلى تحكم في الرطوبة النسبية.

ويوصي مصنعو ملفات التبريد بقيم محددة لدرجة حرارة المبخر في غرف التبريد للحصول على الرطوبة النسبية المطلوبة، وتعتمد هذه القيم على درجة حرارة الغرفة وكيفية انتقال الحرارة بين سطح الملف وهواء الغرفة، أي إن كان انتقال الحرارة بالحمل الحر أو بالحمل الطبيعي. ويبين جدول ١٤،١ القيم الموصى بها لفرق درجة حرارة المبخر عند ظروف تشغيل مختلفة

[Dossat 1981].

جدول ١٤,١ القيم الموصى بها لفرق درجات الحرارة TD عند ظروف مختلفة للتشغيل

[Dossat 1981].

الرطوبة النسبية	حمل حر	حمل قسري
٩٥-٩١	٨-٧	٦-٤
٩٠-٨٦	٩-٨	٧-٦
٨٥-٨١	١٠-٩	٨-٧
٨٠-٧٦	١١-١٠	٩-٨
٧٥-٧٠	١٢-١١	١٠-٩

يعتمد أداء ملف التبريد على مواصفته الهندسية بالإضافة إلى ظروف التشغيل الخارجية للملف. ويبين شكل ١٤,٢ خريطة أداء عدة ملفات تبريد بالتمدد المباشر باستخدام مبردات ١١٣٤ و ٢٢ و ٤٠٤أ عند ظروف تشغيل مختلفة، كما هي معطاة بإحدى الشركات المصنعة لملفات التبريد [شركة لو- في LU-VE]. وتعرف الرموز بالشكل كما يلي:

TC هي درجة حرارة غرفة التبريد.

CT الحمل الحراري بغرفة التبريد .

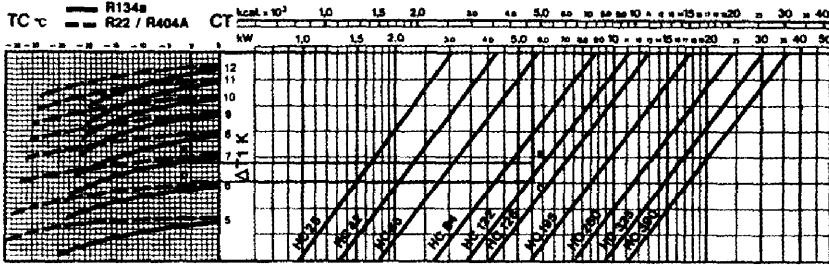
ΔT_1 فرق درجة حرارة المبخر (وقد عرفناها سابقا بالرمز TD) ، أي

الفرق بين درجة حرارة دخول الهواء إلى ملف التبريد ودرجة حرارة المبرد داخل ملف التبريد.

ويبين المثال التالي طريقة استخدام شكل ١٤,٢ لاختيار ملف تبريد.

مثال ١٤,١

اختر ملف تبريد من شكل ١٤,٢ للعمل في غرفة تبريد عند درجة صفر مئوي ورطوبة نسبية قدرها ٨٥٪ إذا كان حمل التبريد للغرفة هو ٥٥٠٠ وات. استخدم مبرد ١١٣٤.



شكل ١٤,٢ مثال لأداء بعض ملفات التبريد شركة [LU-VE].

الحل

من جدول ١٤,١ وبفرض حمل قسري، تكون فرق درجة حرارة المبخر 7°C . عند ΔT_1 تساوي 7°C و TC تساوي 0°C (درجة حرارة غرفة التبريد) وباستخدام مبرد ١٣٤ أ توقع نقطة A على شكل ١٤,٢، كما هو موضح بالشكل. يمد خط أفقي ليقاطع مع حمل تبريد ٥٥٠٠ وات عند النقطة B. ونلاحظ أنه لا يوجد أي ملف تبريد عند النقطة B لذا يتم اختيار الملف الأكبر عند النقطة C وهو ملف تبريد رقم HC122. من نقطة C نتجه يساراً حتى نقطة التقاطع مع الخط الرأس لدرجة حرارة الغرفة عند 0°C ، وتكون نقط التقاطع هي النقطة D. من الشكل تكون فرق درجة حرارة المبخر عند النقطة D هو $6,3^{\circ}\text{C}$. عندئذ تكون درجة حرارة المبخر كما يلي:

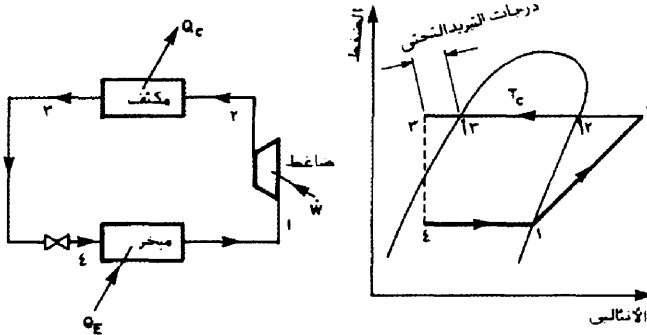
$$T_E = TC - \Delta T_1 = 0 - 6.3 = -6.3^{\circ}\text{C}$$

ويكون الاختيار النهائي هو ملف تبريد موديل HC122 يعمل عند درجة حرارة مبخر قدرها $-6,3^{\circ}\text{C}$.

١٤,٣ المكثفات

المكثف هو أحد المكونات الأساسية لأي نظام تبريد، ففي المكثف يتم طرد الحرارة بالمعدل اللازم لضمان تشغيل دورة التبريد بالأداء الموصى به. تنقسم المكثفات عمومًا، وتبعًا لطريقة طرد الحرارة بها، إلى مكثفات مبردة بالماء، ومكثفات مبردة بالهواء، ومكثفات تبخيرية مبردة بتبخير الماء بالإضافة إلى تبريدها بالهواء.

يمثل شكل ١٤,٣ رسمًا تخطيطيًا لدورة تبريد بسيطة مع تمثيلها على خريطة الضغط - الإنثالبي. وكما هو موضح بالرسم تتم عملية طرد الحرارة بالمكثف بين الحالتين ٢ و ٣. ويقدر الحمل الحراري الداخلي (أي محسوبًا من السريان داخل المكثف) تبعًا لشكل ١٤,٣ كما يلي:



شكل ١٤,٣ دورة تبريد بسيطة.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (14.1)$$

حيث $\dot{m}$ هي معدل سريان المبرد خلال المكثف و h هي إنثالبي المبرد. ويطرد الحمل الحراري $\dot{Q}_c$ من المكثف إلى الخارج بمائع إزالة حرارة يكون عادة ماء أو هواء أو كليهما (كالمكثفات التبخيرية).

عندئذ يعطى الحمل الحراري الخارجي للمكثف كما يلي:

$$\dot{Q}_c = UA\Delta T_m \quad (14.2)$$

حيث U هي المعامل الكلي لانتقال الحرارة بين المبرد داخل المكثف ومائع إزالة الحرارة خارجه، و A هي مساحة انتقال الحرارة بالمكثف، و ΔT_m هي الفرق اللوغارتمي المؤثر لدرجات الحرارة بين المبرد داخل المكثف ومائع إزالة الحرارة خارجه. ويلزم عند ظروف الاستقرار أن يتساوى الحملان الحراريان الداخلي والخارجي المعطيان بالمعادلتين (14.1) و (14.2) على التوالي، فإذا لم يتساويا تغيرت ظروف تشغيل دورة التبريد حتى يتم هذا التساوي للحملين.

بالرجوع إلى معادلة (14.1) وشكل ١٤,٣ يتغير الحمل الحراري الداخلي للمكثف بتغير درجتي حرارة المبخر والمكثف نتيجة:

(أ) تغير الإنثاليبي عند الدخول والخروج إلى ومن المكثف.

(ب) تغير معدل سريان المبرد خلال المكثف، حيث يتغير هذا المعدل مع درجتي حرارة المكثف والمبخر تبعاً لنوع الضاغط المستخدم في دورة التبريد.

ويبين الرسم على اليسار بشكل ١٤,٤ تغير الحمل الحراري الداخلي لأحد وحدات التبريد المستخدمة لمبرد ٢٢ وضغط ترددي مغلق، مع درجتي حرارة المكثف والمبخر. ويلاحظ من الرسم انخفاض قيمة الحرارة المطرودة داخلياً من المبرد بالمكثف بانخفاض درجة حرارة المبخر و/أو ارتفاع درجة حرارة المكثف.

من معادلة ١٤,٢ يتغير الحمل الحراري الخارجي للمكثف بتغير درجة حرارة المكثف ودرجة حرارة مائع إزالة الحرارة من المكثف، اللتين تؤثران مباشرة في تغير ΔT_m . أيضاً يعتمد الحمل الحراري الخارجي للمكثف على حاصل الضرب UA للمكثف. ويبين الرسم إلى اليمين بشكل ١٤,٤ زيادة الحمل

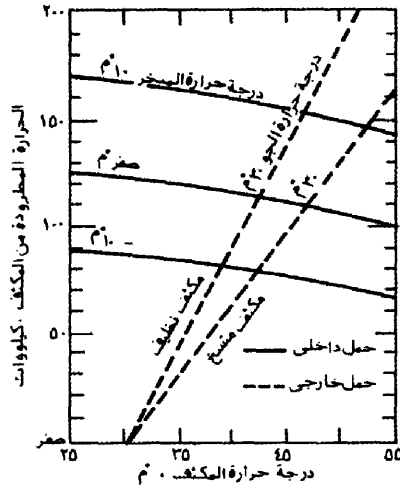
الحراري الخارجي لمكثف ما (مبرد بالهواء ويستخدم مبرد ٢٢) بارتفاع درجة حرارة المكثف و/أو انخفاض درجة حرارة الجو، عند ثبات قيمة UA .

وتحدد درجة حرارة المكثف بتساوي الحمل الحراري الداخلي والحمل الحراري الخارجي للمكثف عند ظروف التشغيل المختلفة. ويبين شكل ١٤,٥ ارتفاع درجة حرارة المكثف من ٣٨ إلى ٤٢,٥°م ثم إلى ٤٧°م إذا ارتفعت درجة حرارة المبخر من -١٠°م إلى صفر°م ثم إلى ١٠°م، إذا كان سطح المكثف نظيفاً. فإذا كان سطح المكثف متسخاً أصبحت درجة حرارة المكثف على التوالي هي ٤٢,٥ و ٤٧ و ٥٣°م. وتعزى هذه الزيادة في درجة حرارة المكثف إلى اتساخ سطحه، مما يخفض قيمة معامل انتقال الحرارة الكلي U بالمعادلة (14.2)، وبالتالي يقل ميل خط الحمل الحراري الخارجي كما هو موضح بشكل ١٤,٥.

يفضل معظم مصممو نظم التبريد، التعبير عن الحمل الحراري للمكثف $\dot{Q}_c$ بدلالة حمل التبريد بالمبخر $\dot{Q}_E$. لذا يعرف معامل طرد الحرارة HRF كما يلي:

$$HRF = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_E} \quad (14.3)$$

ويتغير الحمل الحراري للمكثف وكذلك معامل طرد الحرارة (أي الحمل الحراري لكل وحدة تبريد) مع تغير درجة حرارة المبخر، وكذلك مع تغير درجة حرارة المكثف، فيزيد الحمل الحراري للمكثف، وكذلك يزيد معامل طرد الحرارة بانخفاض درجة حرارة المبخر، أو ارتفاع درجة حرارة المكثف، أو زيادة نسبة الانضغاط بالضاغط (أي نسبة ضغط المكثف إلى ضغط المبخر) كما هو مبين بشكل ١٤,٦ لأحد المبردات.

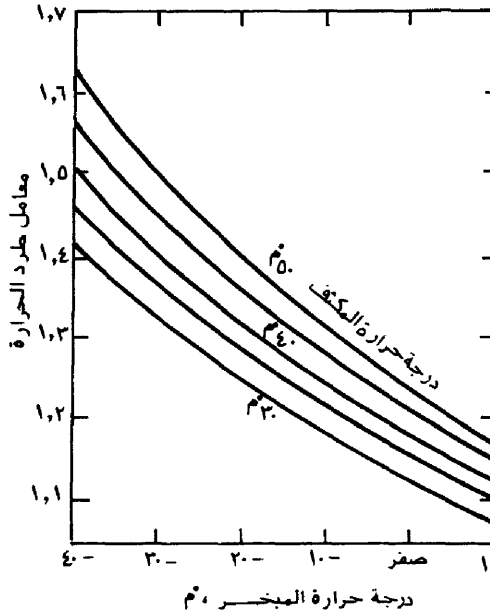


شكل ١٤,٥ درجة حرارة المكثف عند توازن الحمل الحراري الداخلي والحمل الحراري الخارجي لمكثف نظيف وآخر متسخ. البيانات بالخريطة لمكثف تبريد تستخدم مبرد ٢٢ مع ضاغط ترددي معلق ومكثف مبرد بالهواء.

مثال ١٤,٢

تستخدم دورة تبريد بسيطة كالمبينة بشكل ١٤,٣ مبرد ٢٢ بين درجة حرارة مبخر قدرها -10°C ودرجة حرارة مكثف قدرها 50°C . بفرض حالة تشبع لسائل المبرد عند الخروج، وحالة تشبع لخروج البخار من المبخر، وانضغاط أيزنتروبي بالضاغط. ادرس تغير معامل الحرارة لهذه الدورة مع:

- تغيير درجة حرارة المكثف بين 30°C إلى 70°C .
- تغيير درجة حرارة المبخر بين -30°C و -10°C .
- تغير نسبة الانضغاط بالضاغط للحالتين أ و ب عاليه .



شكل ١٤,٦ تغير معامل طرد الحرارة مع درجة حرارة المبخر ودرجة حرارة المكثف لأحد المبردات [ASHRAE 1983].

الحل

يحسب معامل طرد الحرارة للدورة من معادلة (14.3) كما يلي (انظر

شكل ١٤,٣)

$$HRF = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_E} = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3}$$

تقدر قيمة الإنثالبي h من ملحق أ، ويبين جدول ١٤,٢ ملخص حسابات معامل طرد الحرارة عند قيم مختلفة لدرجة حرارة المكثف، وقيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر، وقيم مختلفة لنسبة الانضغاط بالضاغط. ويتضح من الجدول الآتي:

- زيادة معامل طرد الحرارة بارتفاع درجة حرارة المكثف.
- زيادة معامل طرد الحرارة بانخفاض درجة حرارة المبخر.

• زيادة معامل طرد الحرارة بارتفاع قيمة نسبة الانضغاط بالضاغط. ويبين شكل ١٤,٧ هذا التغير عند ثبات درجة حرارة المكثف أو عند ثبات درجة حرارة المبخر.

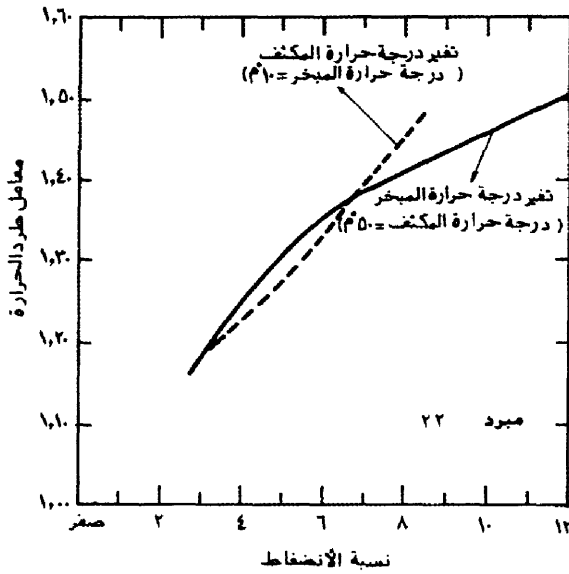
جدول ١٤,٢ مختصر حل مثال ١٤,٢.

درجة حرارة م°	الضغط كيلوياسكال	الانثاليبي كيلوجول/كيلوجرام	معامل الحرارة
المكثف	المبخر	المكثف	المبخر
نسبة الانضغاط	h ₁	h ₂	h ₃
HRF			
٣٠	١٠٠	١١٩١,٩	٣٥٤,٧٩
٤٠	١٠٠	١٥٣٤,٠	٣٥٤,٧٩
٥٠	١٠٠	١٩٤٣,٢	٣٥٤,٧٩
٦٠	١٠٠	٢٤٢٧,٩	٣٥٤,٧٩
٧٠	١٠٠	٢٩٩٧,٥	٣٥٤,٧٩
٨٠	١٠٠	٣٥٧٧,٩	٣٥٤,٧٩
٩٠	١٠٠	٤١٩٧,٩	٣٥٤,٧٩
١٠٠	١٠٠	٤٨٦٧,٩	٣٥٤,٧٩
١١٠	١٠٠	٥٥٨٧,٩	٣٥٤,٧٩
١٢٠	١٠٠	٦٣١٧,٩	٣٥٤,٧٩
١٣٠	١٠٠	٧٠٤٧,٩	٣٥٤,٧٩
١٤٠	١٠٠	٧٨٧٧,٩	٣٥٤,٧٩
١٥٠	١٠٠	٨٧٠٧,٩	٣٥٤,٧٩
١٦٠	١٠٠	٩٦٣٧,٩	٣٥٤,٧٩
١٧٠	١٠٠	١٠٦٦٧,٩	٣٥٤,٧٩
١٨٠	١٠٠	١١٧٩٧,٩	٣٥٤,٧٩
١٩٠	١٠٠	١٢٩٦٧,٩	٣٥٤,٧٩
٢٠٠	١٠٠	١٤٢٩٧,٩	٣٥٤,٧٩

ويلزم التنويه بالآتي:

• يمثل شكل ١٤,٧ علاقة نمطية لتغير معامل طرد الحرارة مع نسبة الانضغاط عند ظروف تشغيل مختلفة.

• يجب على المصمم اختيار أقل درجة حرارة ممكنة بالمكثف، وكذلك أعلى درجة حرارة ممكنة بالمبخر للمحافظة على معامل طرد حرارة منخفض، مما يعني صغر مساحة سطح انتقال الحرارة بالمكثف المطلوب اختياره.



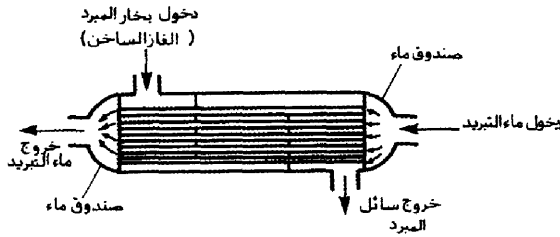
شكل ١٤,٧ تغير معامل طرد الحرارة مع نسبة الانضغاط لمثال ١٤,٢.

١٤,٤ المكثفات المبردة بالماء

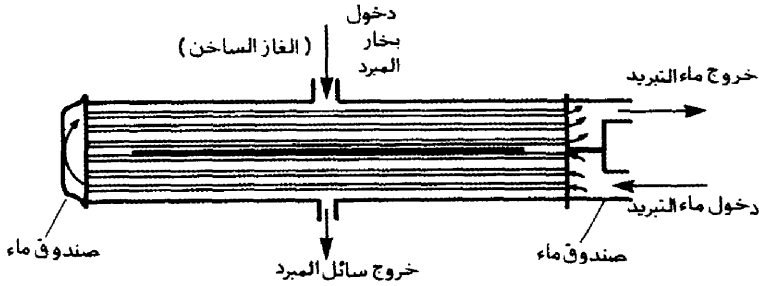
يعتبر مكثف الغلاف والأنبوب هو أكثر أنواع المكثفات المبردة بالماء انتشاراً. ويستخدم هذا المكثف في معظم تطبيقات التبريد لساعات تبريد من ١٢ كيلوات حتى أكثر من ٣٥,٠٠٠ كيلوات تبريد. ويتكون المكثف من غلاف به عدة أنابيب يسري داخلها ماء التبريد. ويدخل بخار المبرد إلى الغلاف من أعلى، حيث يتم التكثيف على السطح الخارجي للأنابيب، ويتساقط البخار المتكثف إلى قاع الغلاف، حيث يخرج سائل المبرد.

يصنف مكثف الغلاف والأنبوب تبعاً لعدد ممرات ماء التبريد بالمكثف، فيقال أن المكثف أحادي الممر لماء التبريد إذا سمح للماء بالمرور مرة واحدة فقط خلال جسم المكثف، كما هو موضح بالحالة "أ" بشكل ١٤,٨، أو ثنائي الممر للماء إذا سمح للماء بالمرور مرتين خلال جسم المكثف، كما هو موضح بالحالة

"ب" بشكل ١٤,٨، وهكذا. وتستخدم بعض التطبيقات الجزء السفلي من الغلاف كمستقبل لسائل المبرد، مما ينفي الحاجة إلى مستقبل خارجي. ويمتاز هذا النوع من المكثفات بكفاءته لعملية انتقال الحرارة وتكثيف بخار المبرد، كما يمتاز أيضًا بسهولة تنظيف أنابيبه ميكانيكيًا بعد فك صندوقي الماء عند طرفي المكثف. ومن عيوب هذا المكثف ارتفاع تكلفته نسبيًا بالمقارنة بأنواع المكثفات الأخرى.



حالة (أ): مكثف أحادي الممر لماء التبريد.



حالة (ب): مكثف ثنائي الممر لماء التبريد.

شكل ١٤,٨ رسم تخطيطي لمكثف غلاف وأنبوب.

وتتوفر هذه المكثفات في صناعة التبريد بعدة مقاسات تبعًا للحمل الحراري المطلوب من المكثف. ويتراوح قطر الغلاف الأسطواني الشكل لهذه المكثفات بين ١٠ سم إلى ١٥ مترًا، وتستخدم أنابيب نحاس بقطر قدره من ١٦ مم إلى ٥٠ مم عادة (نظم هالوكربونات)، أو أنابيب صلب بقطر خارجي قدره ٣١,٧٥ مم عادة (نظم الأمونيا). كما يتراوح طول أنابيب هذه المكثفات عادة

بين متر إلى ٦,٥ مترًا، بعدد أنابيب يتراوح بين ٦ إلى أكثر من ١٠٠٠ أنبوب [ASHRAE 1988].

وتحتوي بعض أنواع هذه المكثفات عددًا إضافيًا من الأنابيب في الجزء السفلي من الغلاف للمساعدة على التبريد التحتي (التبريد الدوني) لسائل المبرد قبل الخروج من المكثف. ويعتمد عدد هذه الأنابيب على درجة التبريد التحتي المطلوبة بالمكثف، ودرجة حرارة دخول ماء التبريد إلى المكثف ومعدل سريانه. أيضًا قد يحوي السطح الخارجي للأنابيب زعانف (أسطح ممتدة) لتحسين عملية انتقال الحرارة عند استخدام نظم الهالوكربونات، ويلفت النظر إلى مراعاة ألا تزيد شحنة المبرد بهذا النوع من المكثفات التي تعمل أيضًا كمستقبل عن حد السماح، حيث يعمل ارتفاع مستوى سائل المبرد بغلاف المكثف على إعاقة عملية انتقال الحرارة لتكثيف بخار المبرد، مما يؤدي إلى ارتفاع الضغط بالمكثف.

وتعتمد درجة حرارة المكثف على درجة حرارة الماء الداخل إلى المكثف، وكذلك على معدل سريان الماء. فتنخفض هذه الدرجة بانخفاض درجة حرارة الماء الداخل للمكثف و/أو زيادة معدل سريان الماء. وتؤخذ عادة درجة حرارة المكثف أعلى من درجة حرارة الماء الخارج منه بحوالي ٤ إلى ٥°م. كذلك يؤخذ عادة فرق درجتي حرارة الماء الداخل إلى المكثف والخارج منه حوالي ٣ إلى ٦°م تبعًا لمعدل سريان الماء إلى المكثف. ويحدد معدل سريان الماء إلى المكثف تبعًا للموازنة بين: تحسين عملية انتقال الحرارة (بزيادة سرعة الماء) بين ماء التبريد والمبرد داخل المكثف، ومنع الترسيب (بزيادة سرعة الماء) داخل أنابيب المكثف، وخفض تكلفة ضخ الماء (بخفض معدل سريانه)، وتآكل أنابيب المكثف الناتج عن السرعات العالية لسريان الماء. ويؤخذ عادة معدل سريان الماء إلى المكثف حوالي ٠,٠٢٥ لتر/ث لكل كيلوات تبريد في نظم إهدار الماء، وحوالي ٠,٠٤ إلى ٠,٠٦ لتر/ث لكل كيلوات تبريد في

نظم إعادة استخدام ماء التبريد (نظم أبراج التبريد)، [Dossat 1981&Harris 1983].

يسري ماء التبريد داخل أنابيب المكثف ويحمل هذا الماء، تبعاً لدرجة نقاوته ونوعيته، بعضاً من المواد الصلبة العالقة به بالإضافة إلى العديد من الأملاح المذابة به، وبمرور الزمن تبدأ عملية الترسيب وتكوين القشور على سطح انتقال الحرارة، وحتى في أنقى أنواع المياه تتم عملية تكوين القشور هذه، ولكن بمعدلات بطيئة. وتعمل القشور المترسبة على تكوين طبقة عازلة حرارياً، مما يؤدي إلى خفض معامل انتقال الحرارة، وبالتالي انخفاض الحمل الحراري المطرود من المكثف. وتعتبر أملاح كربونات الكالسيوم هي أول القشور المترسبة على أسطح المكثف، حيث تكون درجة الحرارة بها مرتفعة نسبياً، مما يساعد على ترسيب هذه القشور. وينصح عادة باستخدام معالجة كيميائية مستمرة لماء التبريد، وذلك باستخدام مضخة خاصة لحقن كيميائيات إلى هذا الماء. وتعمل هذه الكيميائيات على تأخير عملية الترسيب دون منعها كلية، أو إلى جعل القشور المترسبة لينة يسهل إزالتها، أو لكلا الغرضين. كما ينصح عادة للتقليل من تكوين القشور على سطح المكثف المحافظة على ماء التبريد قليلاً بدرجة بسيطة بأن يكون الأس الهيدروجيني له حوالي ٧ من ٧,٥. ويعطي مصنعو المكثفات أداءاً مكثفاتهم لأسطح انتقال حرارة نظيفة نسبياً، مع قيمة سماح صغيرة لمقاومة الاتساخ. لذا يلزم عند التشغيل، التنظيف الدوري لسطح المكثف من جهة سريان الماء للمحافظة على كفاءة عملية انتقال الحرارة عند قيمة مرتفعة، مما يحسن أداء وحدة التبريد. وتنظف أنابيب المكثف أما ميكانيكياً باستخدام فرش خاصة لهذا الغرض مصنعة من الصلب لمواسير الصلب، ومن البلاستيك لمواسير النحاس، وأما باستخدام كيميائيات تتفاعل مع القشور ثم يتم غسلها قبل التشغيل مرة أخرى.

١٤,٥ المكثفات المبردة بالهواء

نظرًا لتوفر الهواء مقارنة بالماء، فإن المكثفات المبردة بالهواء تلاقى قبولًا كبيرًا لمعظم التطبيقات المختلفة لهندسة التبريد. يمرر المبرد في هذا النوع من المكثفات داخل أنابيب المكثف بينما يمرر الهواء الجوي المحيط على السطح الخارجي لانتقال الحرارة بالمكثف. ونظرًا لصغر قيمة معامل انتقال الحرارة من جهة الهواء بالمقارنة بمعامل انتقال الحارة من جهة المبرد يفضل عادة استخدام أسطح ممتدة (زعانف) على سطح انتقال الحرارة من جهة الهواء (السطح الخارجي) لتحسين قيمة معامل انتقال الحرارة للمكثف.

وتصنع أنابيب المكثف لنظم الهالوكربونات عادة من أنابيب نحاس بقطر يتراوح بين ٦ إلى ٢٠ مم، ويركب عليها أسطح ممتدة (زعانف) من رقائق النحاس أو الألمنيوم، وإن كان الألمونيوم هو المستخدم في معظم الأحيان. وتصنع أنابيب مكثفات الأمونيا، وكذلك نظم الهالوكربونات في بعض الأحيان، من الصلب، نظرًا لتفاعل النحاس مع الأمونيا. عندئذ يجب معالجة الصلب لحمايته من العوامل الجوية خاصة إذا وضع المكثف في جو خارجي عالي الرطوبة. وتستخدم الأسطح الممتدة عادة بمسافات تتراوح بين ١,٤ إلى ٣,٢ مم بين هذه الأسطح وتزيد هذه المسافات في الأجواء المتربة وتقل كلما كان الهواء في منطقة عمل المكثف نظيفًا نسبيًا.

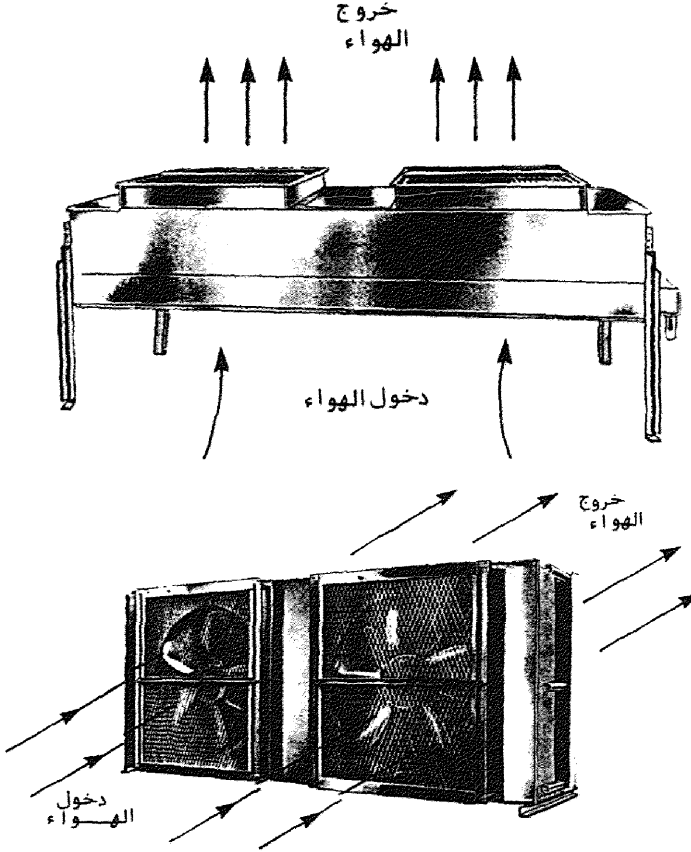
يتحسن معامل انتقال الحرارة في المكثفات المبردة بالهواء بزيادة معدل سريان الهواء خلال هذه المكثفات، مما يعني انخفاض درجة حرارة المكثف، وبالتالي انخفاض قدرة الانضغاط بالضاغط. هذا من ناحية، إلا أنه من ناحية أخرى، يزيد فقد الضغط لسريان الهواء خلال المكثف، مما يزيد من استهلاك قدرة تشغيل مروحة دفع الهواء. ويلزم للمصمم عندئذ حساب أفضل معدل سريان للهواء للموازنة بين تحسين انتقال الحرارة وزيادة فقد الضغط ويتراوح

معدل سريان الهواء الأمثل خلال المكثفات بحوالي من ٨٠ إلى ١٦٠ لتر/ث لكل كيلوات من الحمل الحراري بالمكثف.

وبالرجوع إلى معادلة انتقال الحمل الحراري خلال سطح المكثف، معادلة (14.2)، نجد أن هذا الحمل يعتمد على الفرق المؤثر لدرجات الحرارة بين المبرد والهواء. وبزيادة هذا الفرق، ترتفع درجة حرارة المكثف مما يعني زيادة قدرة الانضغاط بالضاغط بالإضافة إلى انخفاض التأثير التبريدي بالمبخر. ويلزم لخفض قيمة هذا الفرق زيادة معدل سريان الهواء خلال المكثف، أو تكبير مساحة سطح انتقال الحرارة بالمكثف، أو كليهما. وهذا يعني زيادة تكاليف التشغيل أو زيادة التكلفة الأولية أو كليهما معاً. ولقد أظهرت التصميمات وخبرات تشغيل المكثفات المبردة بالهواء أن القيمة المثلى للفرق المؤثر لدرجات الحرارة بين المبرد والهواء يجب أن تتراوح بين ٨ إلى ٢٢°م، تبعاً لظروف التشغيل للمكثف [ASHRAE 1998].

تثبت المكثفات المبردة بالهواء عادة فوق الأسطح أو في منطقة خارجية مسورة، وإن كان يفضل وضعها فوق الأسطح في الأجواء المتربة حتى تكون بعيدة نسبياً عن سطح الأرض، فتتخفض نسبة الأتربة بالجو المحيط بالمكثف. وتحفظ بعض هذه المكثفات - الصغيرة نسبياً - في غرف الآلات بالمباني، ولكن يشترط تجديد هواء الغرف باستمرار، ولا ينصح بذلك إلا للمكثفات الصغيرة فقط. ويسري الهواء الخارجي بهذه المكثفات بواحد من نظامين: نظام أفقي أو نظام رأسي كما هو موضح بشكل ١٤،٩. في النظام الأفقي، يسري الهواء أفقياً على أسطح انتقال الحرارة بالمكثف. ويتأثر نوع المكثفات الذي يعمل بهذه الطريقة باتجاه وشدة الريح، لذا ينصح بوضع عاكس ريح عند خروج الهواء من المكثف في المناطق شديدة سرعة الريح والمتغيرة الاتجاه. ويسري الهواء رأسياً، في النظام الرأسي، خلال المكثف، ولا يعتمد هذا النظام كثيراً على

سرعة واتجاه الريح. ويوجد نظام ثالث من المكثفات يسحب فيه الهواء أفقيًا ويخرج رأسيًا من أعلى المكثف.

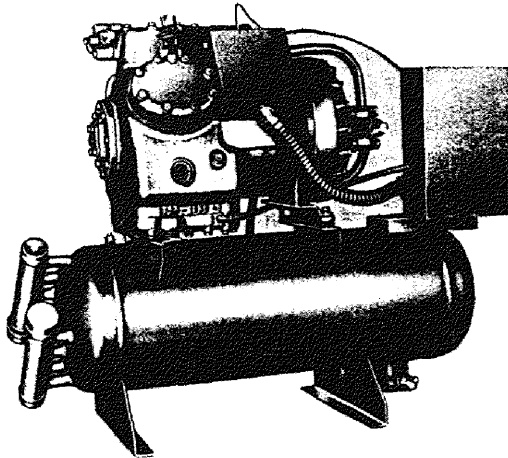


(الرسم العلوي لسريان هواء رأسي، والرسم السفلي لسريان هواء أفقي)

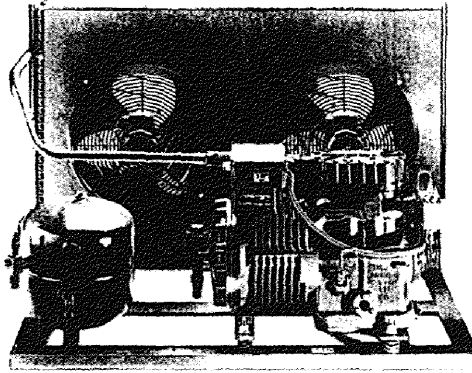
شكل ١٤,٩ رسم تخطيطي لمكثف مبرد بالهواء.

١٤,٦ وحدات التكييف: الضاغط والمكثف

وحدات التكييف هي وحدات سابقة التجميع، أي تم تجميعها بالمصنع، وتضم هذه الوحدات الضاغط والمكثف وأجهزة التحكم الخاصة بهما. وتقوم عدة شركات بتقديم هذه الوحدات للاستخدام مباشرة مع ملفات التبريد في التطبيقات المختلفة. وتضمن الشركات المصنعة توافق أداء الضاغط مع أداء المكثف بهذه الوحدات عند ظروف التشغيل المختلفة. وبالطبع يعتمد أداء هذه الوحدات على مواصفات الضاغط المستخدم وسعته، وكذلك مواصفات المكثف المستخدم بالوحدة وسعته. ويعتبر الضاغط الترددي هو أكثر الضواغط شيوعاً للعمل في وحدات التكييف. وتتوفر وحدات التكييف باستخدام مكثفات مبردة بالماء (انظر شكل ١٤,١٠) وكذلك مكثفات مبردة بالهواء (انظر شكل ١٤,١١).



شكل ١٤,١٠ وحدة تكييف بها مكثف مبرد بالماء [كارير Carrier].



شكل ١٤,١١ وحدة تكثيف بها مكثف مبرد بالهواء [كوبلاند Copeland].

يُعرف أداء وحدات التكثيف ذات المكثف المبرد بالماء بدلالة سعة التبريد التي تعطيها هذه الوحدات عند العمل بدرجات حرارة مختلفة بالمبخر والمكثف، بينما يُعرف أداء وحدات التكثيف المبردة بالهواء بدلالة سعة التبريد التي تعطيها هذه الوحدات ودرجة حرارة الهواء الداخل إلى المكثف.

ويبين جدول ١٤,٣ أداء بعض وحدات التكثيف المبردة بالماء تبعاً لكتالوجات الشركة المصنعة. لاحظ من الجدول انخفاض سعة التبريد بانخفاض درجة حرارة المبخر أو ارتفاع درجة حرارة المكثف. وتفضل معظم الشركات الاستعاضة عن درجة حرارة المكثف، بدرجة حرارة دخول الهواء إلى وحدة التكثيف إذا كانت هذه الوحدات تبرد بالهواء، كما هو موضح بجدول ١٤,٤. ونلاحظ من جدول ١٤,٤، لوحات التكثيف المبردة بالهواء، أن الشركة المصنعة أعطت سعة تبريد وحدات التكثيف عند دخول الهواء بدرجة حرارة قدرها ٢٧ أو ٣٢°م فقط. وقد يتساءل البعض كيف يكون أداء هذه الوحدات عند العمل بهواء جوي تزيد درجة حرارته عن ٣٢°م، كما هو متوقع في فصل الصيف في عدة بلدان عربية.

جدول ١٤,٣ أداء بعض وحدات التكييف ذات المكثف المبرد بالماء لمبرد ٢٢ من واقع كاتالوجات الشركة المصنعة [شركة بوك Bock].

Model	R22 refrigeration capacity*, W										
(R22)	DV	TC	R22 evaporator temperature, °C								
	m ³ /h	°C	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45
SAM 0/45-6 W	2.54	30	1874	1543	1251	1005	797	616	467	350	259
		50	1504	1225	985	778	609	467	350	259	194
SAM 1/45-4 RU	3.78	30	2890	2380	1930	1550	1230	950	720	540	400
SAM 1/45-4 W		50	2320	1890	1520	1200	940	720	540	400	300
SAM 2/58-4 RU	4.93	30	3730	3070	2490	2000	1580	1230	930	700	510
SAM 2/58-4 W		50	2980	2430	1960	1550	1210	920	700	520	390
SAM 2/73-4 RU	6.23	30	4690	3860	3140	2520	1990	1540	1170	880	640
SAM 2/73-4 W		50	3760	3060	2460	1950	1520	1160	880	650	490
SAM 2/95-4 RU	8.14	30	6100	5020	4080	3280	2590	2010	1530	1140	830
SAM 2/95-4 W		50	4890	3990	3210	2540	1980	1510	1140	850	640
SAM 2/121-4 RU	10.30	30	7770	6400	5200	4170	3290	2560	1950	1450	1060
SAM 2/121-4 W		50	6230	5080	4080	3230	2520	1930	1450	1080	810
SAM 3/153-4 RU	12.93	30	9830	8090	6580	5270	4170	3230	2460	1830	1340
SAM 3/153-4 W		50	7870	6420	5160	4090	3190	2440	1840	1370	1030
SAM 3/185-4 RU	15.79	30	11880	9780	7950	6380	5040	3910	2970	2220	1620
SAM 3/185-4 W		50	9520	7760	6240	4950	3850	2950	2220	1660	1240
SAM 3/233-4 RU	19.84	30	14960	12320	10020	8030	6340	4920	3750	2790	2050
SAM 3/233-4 W		50	11990	9780	7860	6230	4850	3710	2800	2090	1570
SAM 4/306-4 RU	26.65	30	19650	16180	13150	10550	8330	6460	4920	3670	2690
SAM 4/306-4 W		50	15750	12840	10330	8180	6370	4880	3670	2740	2060
SAM 4/370-4 RU	32.25	30	23760	19560	15910	12760	10070	7820	5950	4440	3250
SAM 4/370-4 W		50	19040	15530	12490	9890	7700	5900	4440	3310	2490
SAM 4/466-4 RU	40.52	30	29930	24640	20030	16070	12690	9840	7490	5590	4090
SAM 4/466-4 W		50	23980	19550	15730	12460	9700	7430	5590	4170	3130
SAM 4/306-4 RU	53.30	30	39300	32360	26300	21100	16660	12920	9840	7340	5380
SAM 4/306-4 W		50	31500	25680	20660	16360	12740	9760	7340	5480	4120
SAM 4/370-4 RU	64.50	30	47520	39120	31820	25520	20140	15640	11900	8880	6500
SAM 4/370-4 W		50	38080	31060	24980	19780	15400	11800	8880	6620	4980
SAM 4/466-4 RU	81.04	30	59860	49280	40060	32140	25380	19680	14980	11180	8180
SAM 4/466-4 W		50	47960	39100	31460	24920	19400	14860	11180	8340	6260

*Values in Watt at +25°C suction gas temperature, without liquid subcooling. No additional ventilation of the motors is required for deep freezing.

Key: DV = displaced volume

TC = condenser temperature.

جدول ١٤,٤ أداء بعض وحدات التكييف ذات المكثف المبرد بالهواء لمبرد ٢٢ من واقع

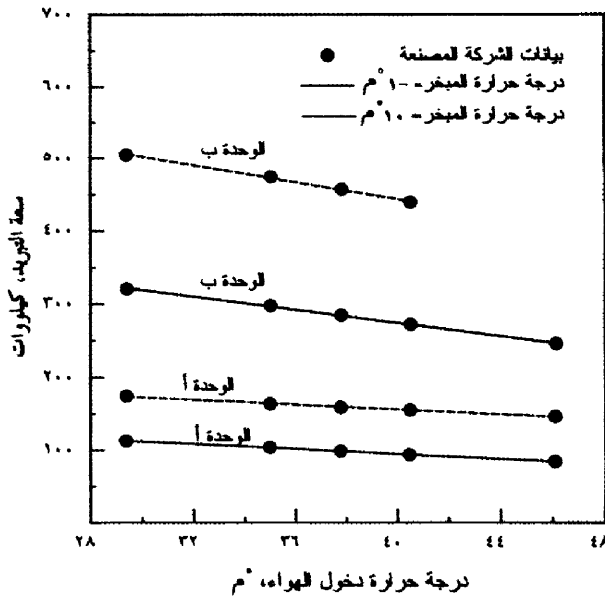
كتالوجات الشركة المصنعة [شركة بوك Bock].

Model	R22 refrigeration capacity*, W										
(R22)	DV	TAI	R22 evaporator temperature, °C								
	m ³ /h	°C	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45
SAM 2/58-4 L	4.93	27	3300	2770	2290	1870	1510	1180	909	686	509
		32	3110	2610	2160	1760	1420	1110	851	641	476
SAM 2/73-4 L	6.23	27	4110	3450	2850	2330	1880	1490	1140	864	641
		32	3860	3240	2680	2190	1760	1400	1070	807	600
SAM 2/95-4 L	8.14	27	5290	4430	3670	3000	2410	1910	1470	1110	823
		32	4960	4160	3440	2810	2260	1790	1370	1040	770
SAM 2/121-4 L	10.30	27	6480	5510	4620	3770	3040	2410	1860	1410	1050
		32	6050	5150	4330	3530	2840	2250	1740	1320	981
SAM 3/153-4 L	12.93	27	8720	7300	6050	4940	3980	3120	2400	1810	1340
		32	8200	6880	5690	4650	3740	2920	2240	1690	1260
SAM 3/185-4 L	15.79	27	10300	8680	7230	5910	4760	3720	2860	2160	1600
		32	9650	8150	6800	5550	4470	3490	2680	2020	1500
SAM 3/233-4 L	19.84	27	12500	10500	8780	7170	5770	4570	3560	2720	2020
		32	11600	9850	8220	6710	5400	4270	3320	2540	1890
SAM 4/306-4 L	26.65	27	17400	14600	12100	9890	7960	6240	4800	3620	2690
		32	16400	13800	11400	9300	7490	5930	4490	3380	2510
SAM 4/370-4 L	32.25	27	20600	17400	14500	11800	9510	7450	5730	4320	3210
		32	19300	16300	13600	11100	8930	6980	5350	4030	3000
SAM 4/466-4 L	40.52	27	24600	20900	17600	14300	11500	9150	7120	5440	4040
		32	23000	19600	16400	13400	10800	8550	6650	5080	3780
SAM 4/306-4 L	53.30	27	34100	28700	23900	19500	15700	12500	9220	7240	5370
		32	31900	27000	22500	18400	14800	11700	8980	6770	5030
SAM 4/370-4 L	64.50	27	40400	34100	28200	23100	18600	14700	11500	8640	6410
		32	37800	31900	26500	21600	17400	13800	10700	8070	6000
SAM 5/601-4 L	52.23	27	34600	29000	24000	19600	15800	12400	9530	7190	5270
		32	32600	27600	22900	18700	15100	11800	9040	6820	4990
SAM 5/724-4 L	62.94	27	40700	34100	28300	23100	18600	14700	11300	8550	6350
		32	38700	32500	26900	22000	17700	14000	10800	8100	6020
SAM 5/847-4 L	73.65	27	47600	39900	33100	27000	21800	17200	13300	10000	7430
		32	45300	38000	31500	25700	20700	16400	12600	9480	7040

* Values in Watt at +25°C suction gas temperature, without liquid subcooling. No additional ventilation of the motor is required for deep freezing.

Key: DV = displaced volume TAI = inlet air temperature to condensing unit.

وللإجابة على هذا السؤال دعنا ندرس تغير أداء هذه الوحدات مع درجة حرارة دخول الهواء. ويبين شكل ١٤,١٢ تغير سعة التبريد لوحدتي تكثيف "أ" و"ب" من كتالوجات إحدى الشركات المصنعة لوحدات التكثيف، مع درجة حرارة دخول الهواء إلى الوحدتين. ونلاحظ من الشكل الآتي:



شكل ١٤,١٢ تغير سعة تبريد وحدة تكثيف مبردة بالهواء مع درجة حرارة دخول الهواء إليها.

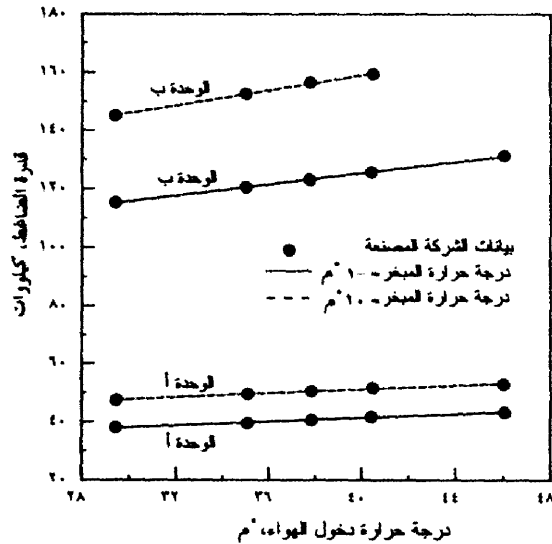
(أ) نقل سعة تبريد وحدة التكثيف خطياً مع ارتفاع درجة حرارة دخول الهواء إلى وحدة التكثيف، ويعتمد معدل التغير (ميل الخط) على مواصفات وحدة التكثيف (لاحظ اختلاف ميل خط الوحدة "أ" عن ميل خط الوحدة "ب").

(ب) تزيد سعة التبريد لوحدة التكثيف بارتفاع درجة حرارة المبخّر.

من النتيجة المعطاة في البند (أ) عاليه يمكننا القول أنه يمكن التنبؤ بسعة التبريد لوحدة التكثيف عند دخول الهواء بدرجات حرارة مختلفة لتلك المعطاة

بكتالوجات الشركة المصنعة، وذلك بفرض علاقة خطية كما ذكرنا ذلك سابقاً، إلا أن هناك بعض التحفظ على ذلك إذا كانت درجة حرارة دخول الهواء خارج مدى درجات الحرارة المعطاة بالكاتالوجات.

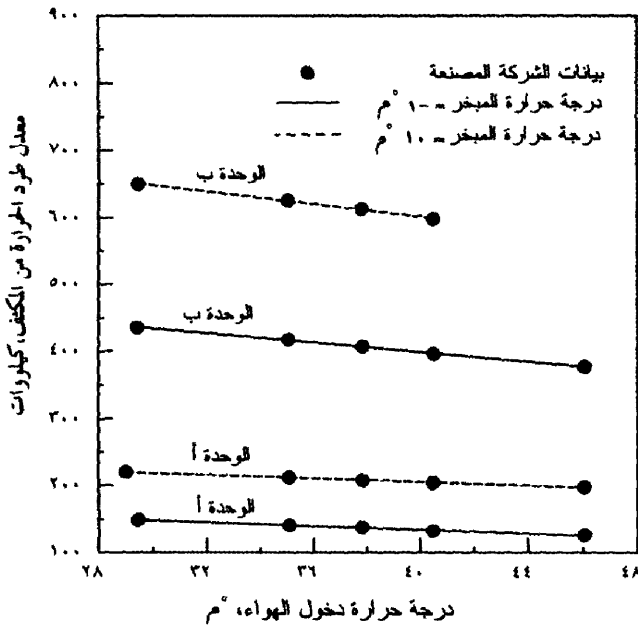
وللتعرف على طبيعة هذا التحفظ دعنا ندرس تغيير القدرة اللازمة لتشغيل الضاغط مع درجة حرارة دخول الهواء لنفس الوحدتين "أ" و"ب". من شكل ١٤،١٣ يبدو جلياً زيادة القدرة اللازمة لعملية الانضغاط خطياً بارتفاع درجة حرارة دخول الهواء. عندئذ قد يخشى من التحميل الزائد لموتور الضاغط بارتفاع درجة حرارة دخول الهواء ما لم يكون حجم الموتور يكفي للتشغيل. أيضاً، قد يخشى من أن يكون مساحة سطح المكثف لا تكفي لطرد الحرارة من



شكل ١٤،١٣ تغير القدرة اللازمة لتشغيل الضاغط بوحدة تكثيف مبردة بالهواء مع درجة حرارة دخول الهواء إلى الوحدة.

وحدة التكييف إذا زادت درجة حرارة دخول الهواء عن حد معين. وبمراجعة شكل ١٤,١٤ نجد انخفاض مقدار الحرارة المطردة من وحدة التكييف بارتفاع درجة حرارة دخول الهواء، أي إن ارتفاع درجة حرارة دخول الهواء لوحدة التكييف لا يمثل أي مشكلة لطرد الحرارة منها.

وبالتالي يكون التحفظ الوحيد على الاستنباط الخطي لعمل وحدة التكييف عند درجة حرارة دخول الهواء أعلى من تلك المعطاة بالجدول هو التأكد من عدم التحميل الزائد لموتور الضاغط.

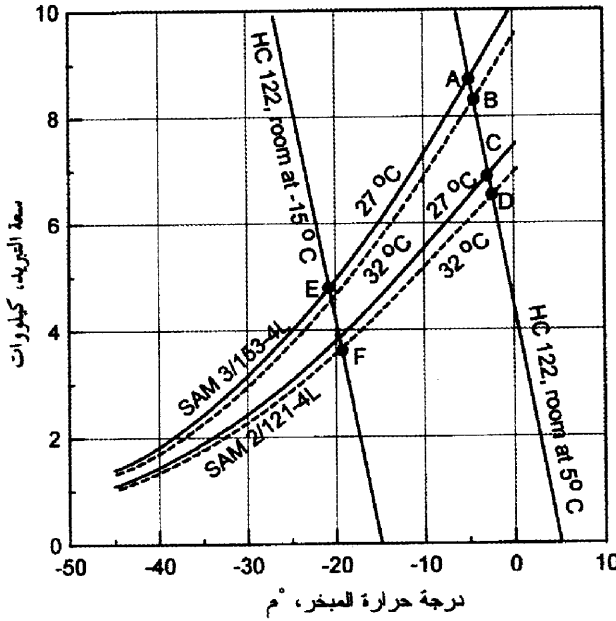


شكل ١٤,١٤ تغير معدل طرد الحرارة من وحدة تكييف مبردة بالهواء مع درجة حرارة دخول الهواء إلى الوحدة.

١٤,٧ توافق أداء معدات التبريد

بينما فيما سبق أداء ملف التبريد، وكذلك أداء وحدات التكيف عند ظروف تشغيل مختلفة. نتساءل الآن ماذا يكون أداء هذه المعدات عندما تعمل مع بعضها البعض؟ نجيب فنقول أن نقطة الاتزان لعمل هذه الوحدات معا تعتمد على أداء كل وحدة منها بمفردها.

ولتوضيح ذلك نأخذ المثال الآتي: ماذا تكون نقطة الاتزان عندما يعمل ملف تبريد موديل HC122 (شكل ١٤,٢) بغرفة تبريد لها درجة حرارة 5°C مع وحدة تكثيف موديل SAM 3/153-4L (جدول ١٤,٤) وتبريد بهواء عند درجة حرارة قدرها 27°C . للإجابة على هذا السؤال نرسم العلاقة بين سعة التبريد ودرجة حرارة المبخر باستخدام كتالوجات الشركات المصنعة لهذه الوحدات، كما هو معطى بشكل ١٤,٢ وجدول ١٤,٤ (انظر شكل ١٤,١٥). ويتقاطع منحنى الأداء لملف التبريد ووحدة التكثيف عند نقطة الاتزان A. ويعني هذا أن الودنتين تعملان عند درجة حرارة مبخر قدرها -5°C وسعة تبريد قدرها $8,8$ كيلووات. فإذا ارتفعت درجة حرارة الهواء الداخل إلى وحدة التكثيف لتكون 32°C ، انخفضت سعة التبريد إلى $8,3$ كيلووات وارتفعت درجة حرارة المبخر إلى -4°C (نقطة اتزان B بالشكل)، وباختيار وحدة تكثيف موديل SAM 2/121-4L بدلا من وحدة التكثيف السابقة، أصبحت نقطة اتزان الودنتين هي النقطة C أو النقطة D عندما يكون دخول الهواء إلى وحدة التكثيف عند درجة حرارة 27°C أو 32°C على التوالي (انظر الشكل). لاحظ الآن من الشكل نقطتي اتزان عمل وحدتي التكثيف السابقتين عند تغير درجة حرارة غرفة التبريد لتكون -10°C مع دخول هواء التبريد إلى وحدة التكثيف عند 27°C أو 32°C .



شكل ١٤،١٥ توافق أداء ملف التبريد مع وحدة التكييف.

مثال ١٤،٣

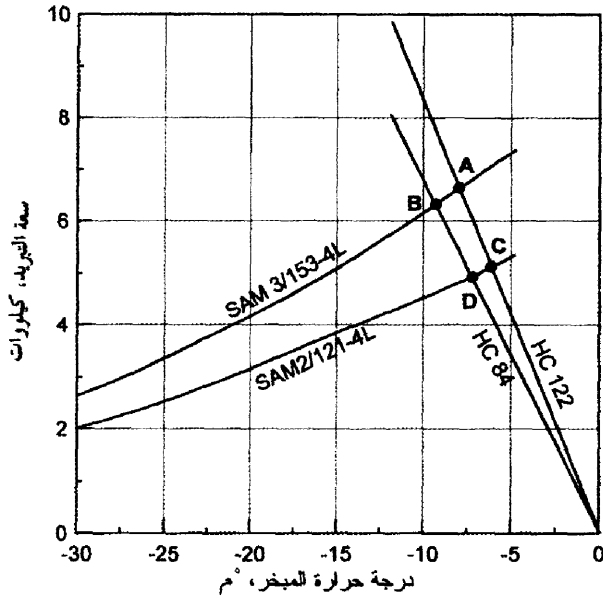
يعمل مخزن تبريد عند درجة حرارة صفر°م ورطوبة نسبية قدرها ٨٥٪ وحمل تبريد قدره ٥,٥ كيلوات. اختر من جداول الشركات المصنعة وحدة تكييف مبردة بالهواء وملف تبريد مباشر مناسبين للعمل معًا عند هذه الظروف مع استخدام مبرد ٢٢. افرض دخول هواء التبريد إلى وحدة التكييف عند ٤٠°م.

الحل

من جدول ١٤،٤ نجد أن وحدة التكييف موديل SAM 3/153-4L قد تكون هي المناسبة. ويعطي الجدول أداء هذه الوحدة عند دخول الهواء بدرجة حرارة قدرها ٢٧ و ٣٢°م. من هذه البيانات يمكن استنباط أداء الوحدة عند دخول الهواء بدرجة حرارة قدرها ٤٠°م إلا أنه يلزم التأكد من قدرة موتور

الضاغط على العمل عند هذه الظروف. ويبين شكل ١٤,١٦ تغير سعة التبريد لوحدة التكهيف مع درجة حرارة المبخر عند دخول الهواء عند درجة حرارة قدرها 40°C . أيضا من جدول ١٤,١ نجد أن فرق درجة حرارة المبخر الواجب استخدامها هي 7°C ، وهي تناظر درجة حرارة مبخر قدرها -7°C . عندئذ، باستخدام شكل ١٤,٢ نجد أن ملف التبريد المناسب هو موديل HC122، ومنه يمكن إيجاد تغير سعة تبريد هذا الملف مع درجة حرارة المبخر لغرفة عند درجة حرارة صفر 0°C . ويبين شكل ١٤,١٦ هذه العلاقة. من الشكل نجد أن نقطة الاتزان لملف التبريد مع وحدة التكهيف هي النقطة A، أي عند سعة تبريد قدرها ٦,٧ كيلوات ودرجة حرارة مبخر قدرها $-8,2^{\circ}\text{C}$ ، أي ما يمثل فرق درجة حرارة مبخر $-8,2^{\circ}\text{C}$ وليس 7°C ، كما هو مطلوب. ويعني هذا انخفاض الرطوبة النسبية بالغرفة قليلا عن القيمة المطلوبة، وهي ٨٥٪. وتعطي نقطة الاتزان أيضا سعة تبريد تزيد عن المطلوب بغرفة التبريد، مما يعني إعطاء الفرصة لإيقاف الضاغط لبعض الوقت.

ويبين شكل ١٤,١٦ نقطة الاتزان عند استخدام وحدة تكثيف وملف تبريد أصغر من الاختيارين السابقين. عندئذ تكون نقاط الاتزان هي النقاط B و C و D بالشكل. وكما هو واضح، فإن نقطتي الاتزان C و D تعطيان سعة تبريد أقل من حمل التبريد المطلوب للمخزن، مما يعني عدم صلاحية وحدة التكهيف SAM 2/121-4L للاستخدام مع التطبيق الحالي. أيضا نلاحظ من الرسم أن نقطة الاتزان B تعطي درجة حرارة مبخر -9°C ، أي بفرق درجة حرارة مبخر قدرها 9°C ، مما يؤدي إلى خفض الرطوبة النسبية عن ٨٥٪ وبقدر أكبر من نقطة الاتزان A. لذلك السبب يكون أفضل الاختيارات في التطبيق الحالي هو ملف تبريد موديل HC122 مع وحدة تكثيف موديل SAM 3/153-4L عند نقطة اتزان A.



شكل ١٤,١٦ اختيار ملف التبريد ووحدة التكثيف لمثال ١٤,٣.

الرموز ومعانيها للفصل الرابع عشر

معدل الحجم المزاح [م ^٣ /ساعة]	DV
الانتالبي [كيلو جول/ كيلوجرام]	h
معامل طرد الحرارة [-]	HRF
معدل سريان المائع [كيلوجرام/ ث]	$\dot{m}$
كمية الحرارة للمكثف [وات]	$\dot{Q}_C$
كمية الحرارة للمبخر [وات]	$\dot{Q}_E$
درجة حرارة الهواء الداخل لوحدة التكييف [م°]	TAI
الفرق بين درجة حرارة الهواء الداخل للمبخر و درجة حرارة	TD
المبخر [م°]	
المعامل الكلي لانتقال الحرارة [وات/م ^٢ .م°]	U

الحروف الإغريقية

الفرق اللوغارتمي المؤثر لدرجات الحرارة للمبادل الحراري [م°]	ΔT_m
الفرق بين درجة حرارة الهواء الداخل للمبخر ودرجة حرارة المبخر [م°]	ΔT_l

الفصل الخامس عشر

تصميم مخازن التبريد

١٥,١ مقدمة

في الفصل السابع تم تقديم الحسابات المختلفة لحمل التبريد لغرفة تبريد أو تجميد، حيث تم استعراض الطرق الحسابية لإيجاد الحمل الحراري نتيجة مختلف الأحمال الداخلية (مثل الأشخاص والإضاءة والمعدات) والأحمال الخارجية، مثل: حمل انتقال الحرارة، وحمل المنتج، وحمل تسرب الهواء. وبيننا كيفية استخدام الأشكال والجداول والعلاقات المختلفة. كما تم في الفصل الخامس تقديم خواص المواد الغذائية المطلوبة لحسابات الحمل الحراري نتيجة المادة المراد تخزينها. وفي هذا الفصل يتم تلخيص عملية إيجاد الحمل الحراري لمخزن تبريد على هيئة خطوات متتابعة.

١٥,٢ خطوات حسابات تصميم غرف التبريد

لتسهيل العمليات الحسابية للأحمال اللازمة للتصميم تم إعداد نموذج لحسابات وتصميم غرف التبريد على شكل جداول، انظر الشكل ١٥,١. وتتم عملية التصميم بناءً على المدخلات الخاصة بغرفة التبريد. ويحتوي النموذج على جداول يمكن استقاؤها في خطوات متسلسلة لعمل كافة الحسابات بناءً على البيانات المدخلة. ولقد تم تقسيم خطوات التصميم إلى ١٤ خطوة، كما هو موضح في النموذج. وينبغي على المصمم اتباع التصميم خطوة بخطوة مع استيفاء المعلومات المطلوبة والإرشادات المرفقة للوصول إلى قيمة حمل غرفة التبريد. وقبل البدء في إجراء الحسابات المختلفة، يتم استيفاء معلومات المشروع كمسمى المشروع، وموقعه، والعنوان ووسائل الاتصال، إضافة لمعلومات

الشخص الذي قام باستيفاء المعلومات، وفيما يلي شرح لبعض التفاصيل المهمة لخطوات تصميم غرف التبريد.

الخطوة ١: مخطط الغرفة

في هذه الخطوة، كما يظهر في الشكل ١٥،١، يقوم المصمم برسم مخطط توضيحي بسيط لغرفة التبريد مع بيان أبعادها وارتفاع السقف، ودرجة الحرارة والرطوبة النسبية داخل غرفة التبريد وخارج حوائطها المختلفة.

الخطوة ٢: شروط التصميم

في هذه الخطوة يقوم المصمم بإدخال شروط التصميم للجو الخارجي وللترربة أسفل غرفة التبريد، إذا كانت غرفة التبريد في الدور الأرضي. وتتخذ درجة حرارة التربة أقل من درجة الحرارة الجافة للهواء بحوالي 15°C ، إذا كانت الغرفة تعمل عند درجة حرارة أعلى من الصفر المئوي، وبحوالي 35°C ، إذا كانت غرفة التبريد تعمل تحت الصفر المئوي.

الخطوة ٣: مواصفات الغرفة

في هذه الخطوة يتم استيفاء الخانات بالمعلومات المتوفرة عن غرفة التبريد، مثل طول وعرض وارتفاع الغرفة خارجيًا، ودرجة الحرارة الداخلية، والرطوبة النسبية للغرفة، وفرق درجات الحرارة بين درجة حرارة الغرفة ودرجة حرارة الهواء الخارجية. كما يتم استيفاء معلومات الحوائط الخارجية والسقف، مثل: سمك العازل، والمعامل الكلي لانتقال الحرارة، وتصحيح درجات الحرارة، إضافة لعدد الأبواب وأبعادها. يقوم المصمم بعد ذلك بعمل الحسابات

البسيطة، مثل: حسابات الطول والعرض الداخلي للغرفة، وحسابات الحجم الداخلي، والحجم المقترح للتخزين.

الخطوة ٤: مواصفات المواد المخزنة

في هذه الخطوة يقوم المصمم بإدخال نوع المنتج الذي سوف يتم تخزينه في الغرفة، وحالة التبريد (تبريد أم تجميد)، وكمية المادة المخزنة، ومقدار المواد الداخلة يوميا للغرفة، ودرجة حرارة الدخول، ودرجة حرارة التخزين المطلوبة، والحرارة النوعية للمادة المخزنة (تحت درجة حرارة التجمد وفوق التجمد)، والحرارة الكامنة (إن وجد)، وحرارة التتفس (إن وجد)، وطول فترة الخفض الأولي لدرجة حرارة الغرفة. يمكن الاستفادة من الفصلين ٥ و ٦ لاستيفاء بعض المعلومات في هذه الخطوة، مثل خواص المواد الغذائية.

الخطوة ٥: مواصفات مواد التغليف والبالات

يقوم المصمم هنا بإدخال نوع مادة التعبئة ووزنها وحرارتها النوعية، وعدد البالات ووزن كل بالة، حرارتها النوعية، والوزن الإجمالي. ويتم استخدام هذه البيانات لحساب الحمل الناتج من مواد التغليف والبالات.

الخطوة ٦: مواصفات ومعلومات أخرى

في هذه الخطوة يتم إدخال البيانات الكهربائية للمواتير والأوناش من حيث الفولت والتردد والقدرة وعدد ساعات العمل لكل منها.

المتكلم العالم بمرافقة الكبير يد

بقوة مع جميع العاملين العرب في الطريقة السنيّة

الرقم	معلومات عامة	1
%	على الإجمالي	
%	نسبة النقص المتوقعة	
الرقعة المتوقعة	الرقعة متوقعة التجميع	
كثافة	عدد القوالب في القوالب	
مساحة	عدد ساعات عمل المساحة	

[illegible][illegible][illegible]

شكل ١٥,١ نموذج حسابات حمل غرفة التبريد.

[illegible][illegible][illegible][illegible]

11	مخفض حمل التبريد		
أ	العمل المنقول للمخفف	كيلو واط	
ب	حمل المواد المبردة	كيلو واط	
ج	حمل تبريد الهواء	كيلو واط	
د	أحمال أخرى	كيلو واط	
هـ	المجموع الحراري	كيلو واط	
و	العمل نتيجة عامل الإجماع	كيلو واط	
ز	المجموع بدون المبردات و حمل أزالة المصنوع	كيلو واط	
ح	عدد ساعات عمل المصاعد		
ط	المجموع نتيجة عمل ساعات المصاعد	كيلو واط	

12	حمل دورة الآلية المصنعي		
أ	دورة آلية المصنعي		
ب	عدد دورات آلية المصنعي في اليوم		
ج	مدة تشغيل دورة الآلية المصنعي	دقيقة	
د	عامل آلية المصنعي		
هـ	حمل آلية المصنعي ككمية من العمل الكلي		
	حمل آلية المصنعي	كيلو واط	

0.4
كيلو واط
0.5
كيلو واط

		حمل مروحة المبخر	13
		عدد موثر المرواح المستخدمة لكل مبخر	١
كيلو وات		فترة العتور	٢
		عدد ساعات العمل للموثرين	٣
		المكافئ الحراري	
كيلو وات		العمل الحراري لمرواح كل مبخر	٤

		العمل الكلي شاملا حمل مرواح المبخر و حمل أذابة الصقيع	14
درجة مئوية		فرق درجات الحرارة للمبخر TD	
درجة مئوية		درجة حرارة التفتيح للمبخر	
درجة مئوية		فرق درجات الحرارة للتجميد	
درجة مئوية		درجة حرارة السحب الضاغطة	
كيلو وات		العمل الاسمي	
		عدد المبخرات	
كيلو وات		العمل الحراري لفرقة التبريد	
كيلو وات		العمل الحراري لكل مبخر	

الخطوة ٧: حمل التبريد المنتقل من الغلاف

يقوم المصمم بحساب معامل انتقال الحرارة الكلي لكل حائط، وللسقف، وللأرضية وإدخال ذلك بالجدول مع إدخال أبعاد كل سطح من أسطح انتقال الحرارة، وكذلك فرق درجة الحرارة بين جهتي السطح. وبعد إجراء حساب معدل انتقال الحرارة على كل سطح، يعطي الجدول مجموع معدلات الحرارة المنتقلة إلى الغرفة من الغلاف الخارجي.

الخطوة ٨: حمل التبريد من المواد المخزنة

هنا يقوم المصمم بحساب حمل التبريد الناتج عن المواد المخزنة، ويتم ذلك على عدة مراحل بعد إدخال البيانات الخاصة بكل مرحلة من المراحل الآتية على الترتيب (إن وجدت): خفض درجة حرارة المنتج لدرجة حرارة التجمد، والتجميد، وخفض درجة حرارة المنتج تحت درجة التجمد، وخفض درجة حرارة مواد التغليف، وخفض درجة حرارة بالات التحميل، وأخير التصحيح للخفض الأولي لدرجة الحرارة. وأخيرًا يتم حساب مجموع الحمل الناتج من المواد الخزنة في نهاية هذه الخطوة.

الخطوة ٩: حمل التبريد من تسرب الهواء الخارجي

كما بينا سابقا في بند ٧,٥ بفصل ٧، يتم إيجاد عامل الحرارة المحسوسة (SHR) عند انتقال الهواء المتسرب من خارج الغرفة إلى حالة الهواء داخل الغرفة باستخدام الجدول ٧,٤. كما يتم إيجاد العامل $\dot{Q}_r / A$ من الشكل ٧,٣. و يتم إيجاد عامل فتح الباب D_r وعامل السريان D_r من المعادلات المناسبة من الفصل ٧، كما يتم استيفاء أو تقدير عامل فعالية أجهزة حماية تسرب الهواء E .

بعد ذلك يتم استخدام العلاقتين (7.20) و (7.22) المقترحتين من جمعية آشري للتبريد والتكييف لإيجاد الحمل الناتج من تسرب الهواء خلال باب غرفة التبريد.

الخطوة ١٠: حمل التبريد من المصادر الداخلية

يقوم المصمم بعد ذلك بحساب باقي أجزاء حمل التبريد الداخلية التي تم عرضها بفصل ٧، بعد إدخال البيانات اللازمة لذلك، وهي على الترتيب: حمل التبريد الناتج من الأشخاص، وحمل التبريد الناتج من الإضاءة، وحمل التبريد الناتج من الأوناش، وحمل التبريد نتيجة المواير المختلفة بغرفة التبريد، ثم إجمالي هذه الأحمال.

الخطوة ١١: ملخص حمل التبريد

تشمل هذه الخطوة إدخال الأجزاء المختلفة لحمل التبريد طبقا لما تم حسابه في الخطوات السابقة، وذلك في البنود من أ إلى د ثم إجمالي هذه الأجزاء (انظر الشكل ١٥،١ الخطوة ١١). يقوم المصمم بإدخال معامل الامان للتصميم في بداية المعلومات العامة عن المشروع (١٠٪ على سبيل المثال) ومنه يمكن حساب الحمل نتيجة عامل الأمان. يقوم المصمم بعد ذلك بإدخال عدد الساعات المقترحة لعمل الضاغط (بند ج) ثم أخيرًا حساب حمل تبريد الغرفة بعد إدخال التصحيح اللازم لعدد ساعات الضاغط.

الخطوة ١٢: حمل بورة إذابة الصقيع

هنا يقوم المصمم باستيفاء معلومات نظام إذابة الصقيع، كنوعه (سخان كهربائي، أو غاز ساخن، أو خلافيهما)، وعدد مرات إذابة الصقيع في اليوم والفترة الزمنية لإذابة الصقيع، وعندئذ يتم حساب حمل إذابة الصقيع باستخدام

المعادلة (7.15) ويؤخذ معامل الحمل لإذابة الصقيع F_{def} مساوياً لـ ٠,٥ إذا استخدمت الكهرباء كمصدر حراري أو ٠,٤ إذا استخدم الغاز الساخن كمصدر حراري لإذابة الصقيع.

الخطوة ١٣: حمل مواتير مروحة المبخر

في هذه الخطوة يتم استيفاء معلومات موتور المبخر وعدد المراوح لكل مبخر وقدرة الموتور، وعدد ساعات العمل، وعلى ضوء ذلك يتم حساب حمل مواتير المراوح لكل مبخر باستخدام المعادلة (7.14) والجدول ٧,٣.

الخطوة ١٤: حسابات حمل المبخر

يتم استيفاء وإعادة كتابة درجة حرارة غرفة التبريد، والرطوبة النسبية، وكذلك فرق درجات الحرارة TD، كما يتم عمل حسابات درجة حرارة التشبع للمبخر، و درجة حرارة التحميص، ثم يتم عمل حساب حمل التبريد لكل مبخر.

يبين الشكل ١٥,١ نموذج حسابات الحمل الحراري لغرفة تبريد، كما جاءت في الخطوات سالفة الذكر. وقد تم عمل لوحة عمل على برنامج Excel لتسهيل العمليات الرياضية، وفي الفقرة التالية نقدم مثالا على ذلك.

١٥,٣ مثال لتصميم غرف التبريد

المطلوب هو حساب الحمل الحراري لغرفة تبريد لتخزين كمية من اللحم. سيتم استخدام نموذج حسابات الحمل الحراري (شكل ١٥,١). ويمكن اختصار معلومات تصميم غرفة التبريد الأساسية كالآتي:

أ- للهواء الخارجي عند درجة حرارة بصيلة جافة ٤٣°م، ورطوبة نسبية ٣٠٪.

- ب- طول غرفة التبريد الخارجي ٢٠م، والعرض ١٢م، و الارتفاع ٦م.
- ج- درجة حرارة الغرفة الداخلية -١٨°م، ورطوبة ٩٠٪.
- د- المواد المراد تخزينها: ٥٠٠,٠٠٠ كجم لحم، الكمية اليومية ٥٠,٠٠٠ كيلوجرام.
- هـ- درجة حرارة دخول المواد المراد تخزينها -٥°م.

بالإضافة إلى معلومات أخرى عن الغرفة، ومواد التغليف، والأحمال الداخلية كالأشخاص والإضاءة والأوناش وغيرها. وقد تم استيفاء معلومات التصميم ووضعها في نموذج حسابات الحمل الحراري للغرفة، كما يظهر في الشكل ١٥,٢.

ومن خلال عمل الخطوات الأربعة عشر اللازمة لعمل حسابات الحمل الحراري، وجد أن الحمل الحراري لغرفة التبريد حوالي ٩٢ كيلووات، شاملا حمل إذابة الصقيع، وحمل مراوح المبخّر، والحمل الناتج عن عامل الأمان، كما يظهر في الشكل ١٥,٢.

3.

د	1	عدد البساتين (1)	1	الارض	2	الارتفاع 2.5
هـ	0	عدد البساتين (2)	0	الارض		
و	19.6	الارتفاع الداخلي	19.6			
ز	11.6	الارض الداخلي	11.6			
ح	5.4	الارتفاع الداخلي	5.4			
ط	1,226.6	الارتفاع الداخلي	1,226.6			
ي	490.6	حجم الخرسان	490.6			
ك	227.2	الصلابة الزمنية	227.2			

9	العمل نتيجة التسريب	
	SHR معدل الحرارة المسمومة	0.82
	Qs/A الدائم	18.00
	Q كمية الحرارة	100.13
	P عدد مرات فتح الباب	32.00
	الوقت لكل مرة يفتح فيها الباب	12.00
	الزمن الذي يفتح فيه الباب لاصصال اخرى	40.00
	تدفئة / يوم	
	معدل زمن فتح الباب (Dr)	0.03
	عامل تبريد الهواء من الباب (Dr)	0.80
	فعالية نظام فتح الباب	0.90
	العمل نتيجة التمررب	0.26
	كيلو وات	

10	حمل التبريد من الداخلية	
	حمل التبريد من	0.26
	كيلو وات	
	ب	1.14
	حمل الانصاية	
	كيلو وات	
	ج	0.75
	حمل الاندخال	
	1- حمل المواتير (1)	0.00
	2- حمل المواتير (2)	0.00
	3- حمل المواتير (3)	0.00
	مجموع الحمل الاخرى	2.15
	كيلو وات	

ملخص حمل التبريد			11
الحمل المتبقي للأغذية	10.5	ا	
حمل الهواء المبردة	27.6	ب	
حمل تبريد الهواء	0.3	ج	
أعمال أخرى	2.1	د	
المجموع الوزني	40.5	هـ	
الحمل نتيجة عمل الإجمالي	4.0	و	
المجموع بدون المعجزات و حمل إزالة المصقيع	44.5	ز	
عدد ساعات عمل المضخة	18.0	ح	
المجموع نتيجة عمل ساعات المضخة	59.4	ط	
كيلو واط			

حمل دورة إزالة المصقيع			12
دورة إزالة المصقيع		ا	
عدد دورات إزالة المصقيع في اليوم	6.0	ب	
مدة تشغيل دورة إزالة المصقيع	20.0	ج	
عمل إزالة المصقيع	0.5	د	
حمل إزالة المصقيع كنسبة من الحمل الكلي	0.8	هـ	
حمل إزالة المصقيع	2.0		
كيلو واط			

كيلو بابتا 0.5، هواء ساخن 0.4

13	حمل مبردة المبرد	
	عدد مواتير المراوح المستخدمة لكل متر	2.0
	فترة الدور	1.7
	عدد ساعات العمل اليومي	22.0
	الكثافة الحرارية	1.5
	العمل الحراري لمراوح كل متر	6.2
	كيلو وات	د

14	الحمل الكلي شاملا حمل مراوح المبرد و حمل آتية الصفيح	
	فرق درجات الحرارة للمبرد TD	6.0
	درجة مبردة	درجة مبردة
	درجة حرارة التفتيش للمبرد	-24.0
	فرق درجات الحرارة للتفتيش	1.0
	درجة مبردة	درجة مبردة
	درجة حرارة السحب الضاغطة	-23.0
	العمل الانسيبي	59.4
	كيلو وات	كيلو وات
	عدد المبرعات	4.0
	العمل الحراري لدرجة التبريد	92.2
	العمل الحراري لكل متر	23.1
	كيلو وات	كيلو وات

المراجع

أولاً: المراجع العربية

محمود، رمضان أحمد (١٩٨٨م) ، مخازن التبريد (أساسيات - تطبيقات - مسائل محلولة)، منشأة المعارف بالإسكندرية، الإسكندرية، مصر .

السيد، مصطفى محمد، وفتحي، قدري أحمد، ودرويش، محمد علي (١٩٩٤م)،
هندسة التبريد وتكييف الهواء، مركز النشر العلمي: جامعة الملك
عبدالعزیز .

أساسيات التحكم في أنظمة التبريد والتكييف، المؤسسة العامة للتبريد والتدريب
المهني، المملكة العربية السعودية. <http://cdd.gotevot.edu.sa/mvtpbooks>.

السيد، مصطفى محمد (١٩٩٣م)، المعدات الأساسية لهندسة التبريد، دار الفكر
العربي، القاهرة، مصر .

ثانياً: المراجع الأجنبية

Al-Hasawi, Refrigerator & Water Cooler Factories, Hasawi Cold Stores, General Catalogue, Kuwait. <https://alhasawi.com>.

Althouse, A. D., Turnquist C. H. and A. F. Bracciano (1992), Modern Refrigeration and Air conditioning, The Goodheart-Willcox Company publishers.

ASHRAE (1992, 2004), Handbook of HVAC Systems and Equipment, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, U.S.A.

ASHRAE (1983, 1988), *Handbook of Equipment, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.*, Atlanta, U.S.A.

ASHRAE (1985, 1989, 1993, 2005, 2009), *Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.*, Atlanta, U.S.A.

ASHRAE (1986, 1990, 1994, 2002, 2006.2010), *Handbook of Refrigeration Systems and Applications*, SI edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, U.S.A.

Beckwith, T. G. and Marangoni, R. D. (2006) *Mechanical Measurements*, 6th edition, Addison-Wesley Publishing Company.

Bock GmbH & Co., *Catalogue of Modular Refrigeration Units SAM*, Book GmbH & Co., Kältemaschinenfabrik, Postfach 1129, KiBlingstraBe 20, D-7440 Nürtingen, Germany.

Carrier Corporation, *Carrier Water-Cooled Condensing Units, Catalogue No. 520-701*, Carrier Corporation, U.S.A (www.carrier.com).

Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M. (2006) *Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications*, McGraw-Hill.

Cengel, Y. A. (1998), *Heat Transfer A practical approach*, McGraw-Hill.

Copeland GmbH, *Condensing Units, Catalogue, Copeland GmbH*, Eichborndamm 141-175, D-1000 Berlin 51, Germany (www.emersonclimate.com).

Cole, R. A. (1984), *Infiltration: A load calculation guide, The international Institute of Ammonia Refrigeration*, Sixth annual meeting, San Francisco.

Danfoss Nordborg Denmark, www.danfoss.com المنظمات الاتوماتيكية لمنشآت التبريد التجاري وتكييف الهواء

- Dossat, R.J.** (1981), *Principles of Refrigeration*, SI version, John Wiles & Sons, New York, U.S.A.
- Dossat, R. J.** (1991), *Principle of Refrigeration*, Third Edition, Prentice-Hall International editions.
- EES Engineering Equation Solver, www.fchart.com
- Elsayed, M.M.** (1997), *Infiltration Load in Cold Rooms*, Final Report of Project No. EM 097 Research Administration of Kuwait University, Kuwait University, Kuwait.
- Figliola, R. S. and D. E. Beastey** (2006), *Theory and Design for Mechanical Measurements*, 4th Edition, Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- Fox, R. W., McDonlad, A. T. and Pritchard, P. J.** (2004), *Introduction to fluid mechanics*, 6th Edition, Wiley.
- Gahin, S., Elsayed, M. M. and Ghazi, M.A.** (1985), *Introduction to Engineering Fluid Mechanics*, King Abdulaziz University Press, Jeddah, Saudi Arabia.
- Gosney, W.B. and Olama, H. A.** (1975), "Heat and enthalpy gains through cold rooms doorways", *Proceedings of Institute of Refrigeration, Environmental Science and Technology, The Polytechnic of the South Bank, London*.
- Gosney, W.B.** (1982), *Principles of Refrigeration*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Hallowell, E. R.** (1980), *Cold and Freezer Storage Manual*, AVI Publishing Company, Inc, Westport, CI, USA.
- Harris, N.C.** (1983), *Modern Air Conditioning Practice*, McGraw-Hill Book Company, New York, U.S.A.

Heap, R. D. (2006), Cold Chain Performance Issues Now and in the Future, Review Article, *International Institute of Refrigeration (IIR), Bulletin* 2006-4.

Holman, J. P. (2001), *Experimental Methods for Engineers*, 7th Edition, McGraw-Hill.

Honeywell Engineering Manual of Automatic Control for Commercial Buildings (1988), Honeywell, Honeywell Inc., USA.

<http://www.epa.gov/ozone/index.html>

<http://ozone.unep.org>

Incropera, F. P. and Dewitt, D. P. (2002), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Fourth Edition, John Wiley.

IIR (International Institute of Refrigeration) (1993), *Cold Store Guide*, Published by International Institute of Refrigeration, France.

Jones, B.W., Beck, B.T. and Steele (1983), *Latent Loads in Low-Humidity Rooms due to Moisture*, ASHRAE Trans., No. 2738.

LU-VE Contrado (1994), *Thermal Environmental Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., U.S.A.

Koelet, P. C. (1992), *Industrial Refrigeration: Principles, Design and Applications*, Marcel Dekker .

Kreith, F. and Bohn, M. S. (1993), *Principle of Heat Transfer*, 5th Edition, West Publication, New York, USA.

Kuehn, T. H., Ramsey, J. W. and Therlkelde, J. L. (1998), *Thermal Environmental Engineering*, 3^{ed} Edition, Prentice Hall.

McAdams, W. H. (1954), *Heat Transmission*, 3th Edition.

- McQuiston, F. C., Parker, J. D. and Spitler, J. D.** (2005), *Heating, Ventilation, and Air Conditioning (Analysis and Design)*. 6th Edition, John Wiley.
- Munson, B. R., Young, D.F. and Okiishi, T.H.** (1998), *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 3ed Edition, John Wiley.
- Ozisik, M. N.** (1989), *Heat Transfer: A Basic Approach*, McGraw-Hill.
- Pita, E.G.** (1984), *Refrigeration Principles and Systems: An Energy Approach*, John Wiley & Sons, New York, U.S.A.
- Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties*, (2007), Refprop8, NIST Standard Reference 23, version 8, National Institute of Standard Technology, www.nist.org
- Raznjevic, K.** (1976), *Handbook of Thermodynamic Tables and Charts*, Hemisphere Publishing Corp.
- Schneider, R. K.** (1981), *HVAC Control Systems*, Wiley, New York.
- Siebel, J. E.** (1892), *Specific Heat of Various Products, Ice and Refrigeration*, p.256
- Staefa Control System** (1988), *Introduction to HVAC Control Engineering and Computers*, Staefa Control System.
- Stoecker, W. F. and Jones, J. W.** (1982), *Refrigeration and Air Conditioning*, McGraw-Hill, 2nd Edition.
- Threlkeld, J.L.** (1970), *Thermal Environmental Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., U.S.A.
- Wang, S. K.** (2001), *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*, 2nd Edition, McGraw-Hill.

الملاحق
ثبت المصطلحات
عربي / إنجليزي

- أ -

control action	إجراء أداة التحكم
controlled device	أداة التحكم
defrost	إذابة الصقيع
feed back	إشارة مرجعية
offset	الانحراف
derivative control	التحكم التفاضلي
high pressure control	التحكم في الضغط العالي
time lag	التأخير الزمني
acutal differential	التفاوت الفعلي
frost	الصقيع
dynamic viscosity	اللزوجة الديناميكية
kinematic viscosity	اللزوجة الكينماتيكية
controller	المتحكم
controlled variable	المتغير المراد التحكم فيه
ozone	أوزون
digital signal	إشارة رقمية

- ب -

vapor	بخار

cooling tower	برج تبريد
bulb	بصيلة
valve	بلف أو صمام أو محبس
internal environmental	بيئة داخلية

- ت -

refrigeration effect	تأثير تبريدي
vapor compression refrigeration	تبريد بانضغاط البخار
sensible cooling	تبريد محسوس
safety control	تحكم أمان
automatic control	تحكم آلي
proportional control	تحكم تناسبي
proportional + integral control	تحكم تناسبي + تكاملي
digital control	تحكم رقمي
modulating control	تحكم متغير
on-off control	تحكم من نوع تشغيل - قفل
time on-off control	تحكم من نوع تشغيل - قفل موقت
floating control	تحكم من نوع عائِم سائب
thermal storage	تخزين حراري
sensible heating	تسخين محسوس
operational differential	تفاوت التشغيل
control differential	تفاوت التحكم
air conditioning	تكييف هواء
turbine	توربين

- ث -

thermistor	ثيرمستور
thermostat	ثيرموستات

- ج -

ASHRAE	جمعية مهندسي التبريد وتكييف الهواء الأمريكيين

- ح -

temperature sensor	حاس درجة حرارة
bimetal temperature sensor	حاس درجة حرارة ثنائي المعدن
specific volume	حجم نوعي
load	حمل
cooling load	حمل التبريد
free convection (natural)	حمل حر (حمل طبيعي)
thermal load	حمل حراري
forced conversion	حمل قسري

- خ -

air damper	خانقة هواء
psychrometric chart	خريطة السيكرومترية
thermobank	خزان حراري (بنك حراري)

- د -

closed loop control	دائرة تحكم مغلقة
open loop control	دائرة تحكم مفتوحة
pump down cycle	دائرة ضخ التفريغ

transfer function	دالة التحويل
temperature	درجة حرارة
dry bulb temperature	درجة حرارة بصيلة جافة
wet bulb temperature	درجة حرارة بصيلة مبللة
dew point temperature	درجة حرارة نقطة الندى
- ر -	
thermal comfort	راحة حرارية
relative humidity	رطوبة نسبية
digital	رقمي
vane	ريشة
- ز -	
fin	زعنفة
- س -	
flow	سريان
extended surface	سطح ممتد
strain gauge	سلك الانفعال
RTD	سلك المقاومة الحراري
psychrometry	سيكروميتري
- ش -	
semi conductor	شبه موصل
under shoot	شطح سفلي
overshoot	شطح علوي
work	شغل

mechanical work

شغل ميكانيكي

- ص -

orifice plate valve

صمام الصفيحة والنقب

solenoid valve

صمام أو بلف مغناطيسي

expansion valve

صمام تمدد

thermostatic expansion valve

صمام تمدد ثرموستاتي

non-return valve

صمام لا عودة

- ض -

compressor

ضاغط

reciprocating compressor

ضاغط ترددي

screw compressor

ضاغط لولبي

hermetic compressor

ضاغط محكم الغلق

open compressor

ضاغط مفتوح

semi hermetic compressor

ضاغط نصف مغلق

- ط -

discharge

طرد

- ع -

exhaust

عادم

process

عملية

psychrometric process

عملية سيكرومترية

- ف -

revise acting

فعل عكسي

direct acting فعل مباشر

- ك -

piston كباس

efficiency كفاءة

- م -

makeup water ماء تعويض

refrigerant مائع تبريد

re-evaporator مبادل إعادة البخر

heat exchanger مبادل حراري

evaporator, shell and tube مبخر الأنبوب والغلاف

humidistat متحكم في الرطوبة

pressurestat متحكم في الضغط

multi zone متعدد المناطق

chiller منثج مياه

sensor مجس

two way valve محبس ثلاثي

three way diverting valve محبس ثلاثي للتوزيع

three way mixing valve محبس ثلاثي للخلط

check valve محبس عدم مرور

signal convertor محول إشارة

throttling range مدى التحكم

relay مرحل

relay valve مرحل بيلف

humidifier	مُرطَّب
elastic	مرونة
suction stroke	مشوار السحب
discharge stroke	مشوار الطرد
electronic source	مصدر إلكتروني
energy source	مصدر طاقة
electric source	مصدر كهربائي
pump	مضخة
thermal expansion factor	معامل التمدد الحراري
normally closed	مغلق عادة
safety switch	مفتاح أمان
low oil pressure switch	مفتاح ضغط الزيت
low pressure cut out	مفتاح ضغط السحب
high pressure cutout	مفتاح ضغط الطرد
normally open	مفتوح عادة
condenser	مكثف
condenser, evaporative	مكثف تبخيري
condenser, water cooled	مكثف مبرد بالماء
condenser, air cooled	مكثف مبرد بالهواء
split air conditioner	مكيف منفصل الوحدات (سبليت)
cooling coil	ملف تبريد
heating coil	ملف تسخين
zone	منطقة

bellows	منفاخ
specification	مواصفة
actuator	موجه ، محرك، محفز
microprocessor	ميكروبروسيسور

- ن -

humidity ratio	نسبة رطوبة
set point	نقطة الضبط
control point	نقطة ضبط
indoor air quality	نوعية الهواء الداخلي

- ه -

pneumatic	هوائي
hygrometer	هيجروميتر

- و -

fan coil unit	وحدة ملف و مروحة
control medium	وسط المحكوم
control agent	وسيط (وسيلة) التحكم

إنجليزي / عربي

- A -

actuator	موجه ، محرك ، محفز
actual differential	التفاوت الفعلي
air conditioning	تكييف هواء
air damper	خانقة هواء
ASHRAE	جمعية مهندسي التبريد وتكييف الهواء الأمريكيين
automatic control	تحكم آلي

- B -

bellows	منفاخ
bimetal temperature sensor	حاس درجة حرارة ثنائي المعدن
bulb	بصيلة

- C -

check valve	محبس عدم مرور
chiller	متلج مياه
closed loop control	دائرة تحكم مغلقة
compressor	ضاغط
condenser	مكثف
condenser, air cooled	مكثف مبرد بالهواء
condenser, evaporative	مكثف تبخيري
condenser, water cooled	مكثف مبرد بالماء
control action	إجراء أداة التحكم
control agent	وسيط (وسيلة) التحكم
control differential	تفاوت الحاكم
control medium	وسط المحكوم

control point	نقطة الضبط
controlled device	أداة التحكم
controlled variable	المتغير المراد التحكم فيه
controller	المتحكم
cooling coil	ملف تبريد
cooling load	حمل التبريد
cooling tower	برج تبريد

- D -

defrost	إذابة الصقيع
derivative control	التحكم التفاضلي
dew point temperature	درجة حرارة نقطة الندى
digital	رقمي
digital control	تحكم رقمي
digital signal	إشارة رقمية
direct acting	فعل مباشر
discharge	طرد
discharge stroke	مشوار الطرد
dry bulb temperature	درجة حرارة بصيلة جافة
dynamic viscosity	اللزوجة الديناميكية

- E -

efficiency	كفاءة
elastic	مرونة
electric source	مصدر كهربائي
electronic source	مصدر إلكتروني
energy source	مصدر طاقة
evaporator, shell and tube	مبخر الأنبوب والغلاف
exhaust	عادم

expansion valve	صمام تمدد
extended surface	سطح ممتد
- F -	
fan coil unit	وحدة ملف و مروحة
feed back	إشارة مرجعية
fin	زعنفة
floating control	تحكم من نوع عائم سائب
flow	سريان
forced conversion	حمل قسري
free convection (natural)	حمل حر (حمل طبيعي)
frost	الصقيع
- H -	
heat exchanger	مبادل حراري
heating coil	ملف تسخين
hermetic compressor	ضاغط محكم الغلق
high pressure control	التحكم في الضغط العالي
high pressure cutout	مفتاح ضغط الطرد
humidifier	مرطب
humidistat	متحكم في الرطوبة
humidity ratio	نسبة رطوبة
hygrometer	هيجروميتر
- I -	
indoor air quality	نوعية الهواء الداخلي
internal environmental	بيئة داخلية
- K -	
kinematic viscosity	اللزوجة الكينماتيكية
- L -	
load	حمل

low oil pressure switch

مفتاح ضغط الزيت

low pressure cut out

مفتاح ضغط السحب

- M -

makeup water

ماء تعويض

mechanical work

شغل ميكانيكي

microprocessor

ميكروبروسيسور

modulating control

تحكم متغير

multi zone

متعدد المناطق

- N -

non-return valve

صمام لا عودة

normally closed

مغلق عادة

normally open

مفتوح عادة

- O -

offset

الانحراف

on-off control

تحكم من نوع تشغيل - قفل

open compressor

ضاغط مفتوح

open loop control

دائرة تحكم مفتوحة

operational differential

تفاوت التشغيل

orifice plate valve

صمام الصفيحة والنقب

overshoot

شطح علوي

ozone

أوزون

- P -

piston

كباس

pneumatic

هوائي

pressurestat

متحكم في الضغط

process

عملية

proportional + integral control

تحكم تناسبي + تكاملي

proportional control	تحكم تناسبي
psychrometric chart	خريطة السيكرومترية
psychrometric process	عملية سيكرومترية
psychrometry	سيكرومتري
pump	مضخة
pump down cycle	دائرة ضخ التفريغ

- R -

reciprocating compressor	ضاغط ترددي
re-evaporator	مبادل إعادة البخار
refrigerant	مائع تبريد
refrigeration effect	تأثير تبريدي
relative humidity	رطوبة نسبية
relay	مرحل
relay valve	مرحل بيلف
reverse acting	فعل عكسي
RTD	سلك المقاومة الحراري

- S -

safety control	تحكم أمان
safety switch	مفتاح أمان
screw compressor	ضاغط لولبي
semi conductor	شبه موصل
semi hermetic compressor	ضاغط نصف مغلق
sensible cooling	تبريد محسوس
sensible heating	تسخين محسوس
sensor	مجس
set point	نقطة الضبط
signal convertor	محول إشارة

solenoids valve	صمام أو بلف مغناطيسي
specific volume	حجم نوعي
specification	مواصفة
split air conditoner	مكيف منفصل الوحدات (سبليت)
strain gauge	سلك الانفعال
suction stroke	مشوار السحب

- T -

temperature	درجة حرارة
temperature sensor	حاس درجة حرارة
three way diverting valve	محبس ثلاثي للتوزيع
three way mixing valve	محبس ثلاثي للخلط
thermal comfort	راحة حرارية
thermal expansion factor	معامل التمدد الحراري
thermal load	حمل حراري
thermal storage	تخزين حراري
thermistor	ثيرمستور
thermobank	خزان حراري (بنك حراري)
thermostat	ثيرموستات
thermostatic expansion valve	صمام تمدد ثرموستاتي
throttling range	مدى التحكم
time lag	التأخير الزمني
time on-off control	تحكم من نوع تشغيل - قفل موقوف
transfer function	دالة التحويل
turbine	توربين
two way valve	محبس ثلاثي

- U -

under shoot	شطح سفلي

- V -

valve

بلف أو صمام أو محبس

vane

ريشة

vapor

بخار

vapor compression
refrigeration

تبريد بانضغاط البخار

- W -

wet bulb temperature

درجة حرارة بصيلة مبللة

work

شغل

- Z -

zone

منطقة

جدول ٢-١ خواص المبرد (R22) للبخار المحمص [NIST-Refprop8]

شريط ١.٠٠ ميفاسكال (تشيع ٠.٨٣، ٠.٨٤ م°)				شريط ١.٠٠ ميفاسكال (تشيع ٠.٩٠، ٠.٩١ م°)				شريط ١.٠٠ ميفاسكال (تشيع ٠.٨٣، ٠.٨٤ م°)			
فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كحول/كجم	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كحول/كجم	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كحول/كجم
م	م	م	م	م	م	م	م	م	م	م	م
sat.L	1449.3	138.81	0.75168	sat.L	1410	153.70	0.81763	sat.L	1383.4	163.59	0.85929
sat.V	2.4348	381.10	1.8615	sat.V	4.6463	387.62	1.8257	sat.V	6.7902	391.76	1.8058
-50	2.3779	383.88	1.8741	-40	4.6216	388.28	1.8285	-30	6.7216	393.07	1.8112
-40	2.2690	389.71	1.8996	-30	4.4086	394.37	1.8541	-20	6.4134	399.38	1.8366
-30	2.1704	395.63	1.9245	-20	4.2167	400.54	1.8789	-10	6.1386	406.75	1.8613
-20	2.0805	401.65	1.9488	-10	4.0426	406.78	1.9031	0	5.8859	412.18	1.8853
-10	1.9981	407.78	1.9725	0	3.8835	413.10	1.9267	10	5.6572	418.69	1.9087
0	1.9223	414.01	1.9957	10	3.7375	419.53	1.9498	20	5.4474	425.29	1.9316
10	1.8523	420.34	2.0185	20	3.6027	426.05	1.9724	30	5.2539	431.97	1.9540
20	1.7874	426.79	2.0409	30	3.4779	432.68	1.9946	40	5.0747	438.75	1.9760
30	1.7270	433.35	2.0629	40	3.3620	439.38	2.0164	50	4.9082	445.62	1.9976
40	1.6706	440.01	2.0845	50	3.2538	446.21	2.0379	60	4.7529	452.69	2.0188
50	1.6179	446.79	2.1058	60	3.1527	453.13	2.0590	70	4.6077	459.68	2.0397
60	1.5685	453.67	2.1268	70	3.0579	460.16	2.0798	80	4.4715	466.83	2.0603
70	1.5221	460.67	2.1475	80	2.9688	467.30	2.1003	90	4.3435	474.09	2.0806
80	1.4784	467.77	2.1679	90	2.8849	474.53	2.1205	100	4.2228	481.46	2.1006
90	1.4371	474.97	2.1880	100	2.8057	481.87	2.1404	110	4.1080	488.92	2.1204
100	1.3981	482.28	2.2078	110	2.7309	489.31	2.1601	120	4.0013	496.48	2.1398
شريط ٢.٠٠ ميفاسكال (تشيع ٠.٨٣، ٠.٨٤ م°)				شريط ٢.٠٠ ميفاسكال (تشيع ٠.٩٠، ٠.٩١ م°)				شريط ٣.٠٠ ميفاسكال (تشيع ٠.٨٣، ٠.٨٤ م°)			
فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كحول/كجم	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كحول/كجم	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كحول/كجم
م	م	م	م	م	م	م	م	م	م	م	م
sat.L	1362.5	171.24	0.89045	sat.L	1345	177.6	0.91566	sat.L	1329.7	183.09	0.93695
sat.V	8.8992	394.83	1.7921	sat.V	10.985	397.27	1.7817	sat.V	13.058	399.31	1.7734
-20	8.6763	398.19	1.8055	-10	10.4890	403.60	1.8062	-10	12.7580	402.48	1.7855
-10	8.2842	404.69	1.8307	0	10.0250	410.27	1.8311	0	12.1690	409.28	1.8109
0	7.9322	411.24	1.8551	10	9.6082	416.98	1.8552	10	11.6440	416.09	1.8354
10	7.6134	417.84	1.8789	20	9.2301	423.73	1.8787	20	11.1710	422.94	1.8592
20	7.3227	424.52	1.9020	30	8.8848	430.56	1.9015	30	10.7420	429.83	1.8823
30	7.0658	431.27	1.9247	40	8.5677	437.45	1.9238	40	10.3500	436.79	1.9049
40	6.8097	438.10	1.9469	50	8.2750	444.43	1.9459	50	9.9886	443.82	1.9270
50	6.5818	445.03	1.9686	60	8.0036	451.49	1.9674	60	9.6549	450.83	1.9486
60	6.3698	452.04	1.9900	70	7.7509	458.63	1.9885	70	9.3451	457.82	1.9699
70	6.1719	459.15	2.0110	80	7.5150	465.87	2.0093	80	9.0564	465.39	1.9908
80	5.9668	466.35	2.0317	90	7.2941	473.20	2.0298	90	8.7865	472.75	2.0113
90	5.8131	473.65	2.0521	100	7.0865	480.62	2.0499	100	8.5334	480.20	2.0316
100	5.6497	481.04	2.0722	110	6.8912	488.13	2.0698	110	8.2966	487.73	2.0515
110	5.4957	488.53	2.0920	120	6.7089	495.73	2.0894	120	8.0714	495.36	2.0712
120	5.3502	496.11	2.1115	130	6.5328	503.43	2.1087	130	7.8598	503.08	2.0905
130	5.2125	503.78	2.1308	140	6.3676	511.22	2.1278	140	7.6595	510.88	2.1097
شريط ٤.٠٠ ميفاسكال (تشيع ٠.٩٠، ٠.٩١ م°)				شريط ٥.٠٠ ميفاسكال (تشيع ٠.٩٠، ٠.٩١ م°)				شريط ٦.٠٠ ميفاسكال (تشيع ٠.٨٣، ٠.٨٤ م°)			
فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كحول/كجم	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كحول/كجم	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كحول/كجم
م	م	م	م	م	م	م	م	م	م	م	م
sat.L	1303.4	192.37	0.97201	sat.L	1281.1	200.15	1.0005	sat.L	1261.3	206.92	1.0248
sat.V	17.187	402.56	1.7604	sat.V	21.312	405.09	1.7505	sat.V	25.451	407.15	1.7424
10	16.6210	407.21	1.7777	10	20.2500	412.33	1.7785	10	24.8790	410.30	1.7536
20	15.8490	414.26	1.8030	20	19.3110	419.59	1.8017	20	23.6380	417.81	1.7797
30	15.1620	421.30	1.8274	30	18.4800	426.82	1.8280	30	22.5580	425.24	1.8046
40	14.5480	428.35	1.8511	40	17.7350	434.06	1.8495	40	21.5980	432.63	1.8286
50	13.9890	435.44	1.8741	50	17.0610	441.33	1.8723	50	20.7390	440.03	1.8519
60	13.4800	442.59	1.8968	60	16.4480	448.63	1.8946	60	19.9810	447.45	1.8745
70	13.0120	449.79	1.9185	70	15.8810	456.00	1.9163	70	19.2510	454.91	1.8965
80	12.5800	457.07	1.9400	80	15.3600	463.42	1.9377	80	18.5980	462.42	1.9181
90	12.1800	464.41	1.9611	90	14.8780	470.92	1.9586	90	17.9960	469.98	1.9392
100	11.8070	471.84	1.9819	100	14.4280	478.48	1.9782	100	17.4370	477.61	1.9599
110	11.4580	479.35	2.0023	110	14.0050	486.13	1.9994	110	16.9170	485.31	1.9803
120	11.1320	486.94	2.0223	120	13.6110	493.85	2.0193	120	16.4310	493.08	2.0003
130	10.8250	494.61	2.0421	130	13.2400	501.85	2.0389	130	15.9740	500.83	2.0200
140	10.5360	502.37	2.0616	140	12.8910	509.53	2.0582	140	15.6450	508.85	2.0395
150	10.2620	510.21	2.0808	150	12.5610	517.50	2.0772	150	15.3410	516.85	2.0586
160	10.0040	518.14	2.0988	160	12.2480	525.54	2.0980	160	14.7590	524.83	2.0775

جدول ٢-أ خواص المبرد ٢٢ (R22) للبخار المحمص [NIST-Refprop8] (مستمر)

ضبط ٠.٧٠ ميغاسكال (تتبع ٠.٩٢ م ^٢)				ضبط ٠.٨٠ ميغاسكال (تتبع ٠.٩٥ م ^٢)				ضبط ٠.٩٠ ميغاسكال (تتبع ٠.٩٦ م ^٢)			
فتردي	ثلاثي	كحول/كجم م ^٣	كثافة	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم م ^٣	كثافة	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم م ^٣	كثافة
١٠٤٦	١٠٤٦	١٠٤٦	١٠٤٦	١٠٤٦	١٠٤٦	١٠٤٦	١٠٤٦	١٠٤٦	١٠٤٦	١٠٤٦	١٠٤٦
sat.L	1243.4	212.98	1.046	sat.L	1226.9	218.49	1.065	sat.L	1211.4	223.57	1.0822
sat.V	29.815	408.86	1.7356	sat.V	33.812	410.31	1.7296	sat.V	38.05	411.54	1.7243
20	28.1670	415.94	1.7601	20	32.9270	413.97	1.7422	20	37.9570	411.88	1.7264
30	26.7910	423.59	1.7858	30	31.2020	421.87	1.7687	30	35.8120	420.08	1.7529
40	25.5880	431.16	1.8103	40	29.7170	429.64	1.7939	40	34.0000	428.07	1.7788
50	24.5210	436.70	1.8340	50	28.4150	437.34	1.8181	50	32.4320	435.93	1.8036
60	23.5820	446.24	1.8570	60	27.2560	445.00	1.8415	60	31.0500	443.74	1.8273
70	22.6930	453.80	1.8794	70	26.2130	452.67	1.8641	70	29.8150	451.51	1.8503
80	21.8990	461.39	1.9012	80	25.2650	460.35	1.8862	80	28.7000	459.29	1.8727
90	21.1700	469.03	1.9225	90	24.3980	468.07	1.9078	90	27.6860	467.10	1.8945
100	20.4950	476.73	1.9434	100	23.6010	475.84	1.9288	100	26.7560	474.93	1.9158
110	19.8690	484.49	1.9639	110	22.8620	483.65	1.9495	110	25.8980	482.81	1.9366
120	19.2850	492.31	1.9841	120	22.1780	491.53	1.9698	120	25.1040	480.74	1.9570
130	18.7390	500.20	2.0039	130	21.5360	499.47	1.9898	130	24.3650	488.73	1.9771
140	18.2270	508.17	2.0234	140	20.9370	507.48	2.0094	140	23.6740	506.78	1.9968
150	17.7450	516.20	2.0426	150	20.3740	515.55	2.0287	150	23.0270	514.89	2.0162
160	17.2910	524.32	2.0616	160	19.8440	523.70	2.0477	160	22.4190	523.08	2.0353
170	16.8610	532.50	2.0803	170	19.3440	531.92	2.0665	170	21.8460	531.33	2.0542
ضبط ١.٠٠ ميغاسكال (تتبع ١.٠٣ م ^٢)				ضبط ١.٠٢ ميغاسكال (تتبع ١.٠٦ م ^٢)				ضبط ١.٠٤ ميغاسكال (تتبع ١.٠٦ م ^٢)			
فتردي	ثلاثي	كحول/كجم م ^٣	كثافة	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم م ^٣	كثافة	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم م ^٣	كثافة
١٠٩٨	١٠٩٨	١٠٩٨	١٠٩٨	١٠٩٨	١٠٩٨	١٠٩٨	١٠٩٨	١٠٩٨	١٠٩٨	١٠٩٨	١٠٩٨
sat.L	1196.8	228.3	1.098	sat.L	1169.7	236.96	1.1262	sat.L	1144.5	244.78	1.1512
sat.V	42.335	412.61	1.7194	sat.V	51.064	414.32	1.7108	sat.V	60.041	415.6	1.7032
30	40.6490	418.19	1.7380	40	47.9590	422.94	1.7388	40	58.4570	419.09	1.7144
40	38.4540	426.43	1.7648	50	45.3330	431.44	1.7655	50	54.8010	428.18	1.7429
50	36.5820	434.48	1.7901	60	43.1040	439.73	1.7908	60	51.8010	436.88	1.7694
60	34.9490	442.44	1.8143	70	41.1660	447.90	1.8149	70	49.2560	445.34	1.7945
70	33.5040	450.34	1.8377	80	39.4550	456.00	1.8382	80	47.0470	453.70	1.8185
80	32.2070	458.22	1.8603	90	37.9240	464.07	1.8607	90	45.0960	461.98	1.8416
90	31.0340	466.10	1.8824	100	36.5400	472.14	1.8826	100	43.3530	470.22	1.8640
100	29.9620	474.01	1.9038	110	35.2790	480.22	1.9040	110	41.7780	478.44	1.8858
110	28.9790	481.96	1.9248	120	34.1220	488.33	1.9249	120	40.3430	486.67	1.9070
120	28.0700	489.94	1.9454	130	33.0550	496.47	1.9453	130	39.0280	494.93	1.9277
130	27.2270	497.98	1.9656	140	32.0650	504.66	1.9654	140	37.8140	503.21	1.9480
140	26.4410	506.08	1.9855	150	31.1430	512.89	1.9851	150	36.6890	511.54	1.9679
150	25.7060	514.23	2.0050	160	30.2820	521.19	2.0045	160	35.6420	519.91	1.9875
160	25.0170	522.45	2.0241	170	29.4740	529.54	2.0235	170	34.6640	528.33	2.0067
170	24.3690	530.73	2.0431	180	28.7140	537.95	2.0423	180	33.7460	536.80	2.0256
180	23.7570	539.08	2.0617	190	27.9980	546.42	2.0608	190	32.8830	545.33	2.0442
ضبط ١.٠٦ ميغاسكال (تتبع ١.١٠ م ^٢)				ضبط ١.٠٨ ميغاسكال (تتبع ١.١٤ م ^٢)				ضبط ١.١٠ ميغاسكال (تتبع ١.١٦ م ^٢)			
فتردي	ثلاثي	كحول/كجم م ^٣	كثافة	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم م ^٣	كثافة	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم م ^٣	كثافة
١١٥٨	١١٥٨	١١٥٨	١١٥٨	١١٥٨	١١٥٨	١١٥٨	١١٥٨	١١٥٨	١١٥٨	١١٥٨	١١٥٨
sat.L	1120.8	251.98	1.1737	sat.L	1098.1	258.69	1.1943	sat.L	1076.1	265.03	1.2134
sat.V	69.303	416.52	1.6962	sat.V	78.89	417.15	1.6897	sat.V	88.845	417.52	1.6834
50	65.1710	424.58	1.7215	50	76.7290	420.80	1.7004	50	82.4680	426.87	1.7119
60	61.1500	433.79	1.7496	60	71.3010	430.49	1.7305	60	76.8720	436.75	1.7411
70	57.8400	442.65	1.7758	70	67.0070	439.80	1.7581	70	72.3870	446.13	1.7680
80	55.0270	451.29	1.8006	80	63.4510	448.78	1.7839	80	68.6450	455.19	1.7933
90	52.5820	459.80	1.8244	90	60.4170	457.54	1.8084	90	65.4370	464.07	1.8174
100	50.4220	468.23	1.8472	100	57.7740	466.18	1.8318	110	62.6310	472.82	1.8406
110	48.4900	476.62	1.8694	110	55.4350	474.74	1.8545	120	60.1420	481.49	1.8629
120	46.7450	484.99	1.8910	120	53.3390	483.26	1.8784	130	57.9090	490.12	1.8846
130	45.1540	493.36	1.9120	130	51.4440	491.78	1.8978	140	55.8830	498.73	1.9057
140	43.6980	501.75	1.9326	140	49.7160	500.25	1.9186	150	54.0350	507.36	1.9263
150	42.3500	510.18	1.9527	150	48.1290	508.76	1.9389	160	52.3360	515.97	1.9465
160	41.1020	518.61	1.9724	160	46.6650	517.30	1.9589	170	50.7660	524.62	1.9662
170	39.9400	527.11	1.9918	170	45.3060	525.87	1.9784	180	49.3080	533.30	1.9856
180	38.8540	535.65	2.0109	180	44.0400	534.48	1.9976	190	47.9490	542.02	2.0046
190	37.8350	544.24	2.0296	190	42.8670	543.13	2.0165	200	46.6780	550.77	2.0233
200	36.8770	552.88	2.0481	200	41.7460	551.83	2.0351	210	45.4840	559.57	2.0417

جدول (٢-أ) خواص المبرد ٢٢ (R22) للبخار المحمص [NIST-Refprop8] (التهلي)

ضغط ٢.٢ ميفاسكال (تثليج ٠.٠١ م°)

Temp °C	Density kg/m ³	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat L	1054.5	271.05	1.2312
sat V	99.216	417.86	1.6773
60	94.9840	422.86	1.6930
70	87.5960	433.47	1.7244
80	81.9260	443.32	1.7527
90	77.3210	452.74	1.7790
100	73.4450	461.87	1.8038
110	70.1030	470.83	1.8275
120	67.1690	479.68	1.8503
130	64.5560	488.45	1.8724
140	62.2060	497.19	1.8938
150	60.0710	505.91	1.9146
160	58.1190	514.62	1.9350
170	56.3220	523.36	1.9549
180	54.6600	532.11	1.9744
190	53.1150	540.89	1.9936
200	51.6730	549.71	2.0124
210	50.3320	558.56	2.0310

ضغط ٢.٨ ميفاسكال (تثليج ٠.٧١ م°)

Temp °C	Density kg/m ³	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat L	990.93	287.85	1.2797
sat V	133.44	416.79	1.6591
70	127.900	421.39	1.6726
80	115.520	433.66	1.7079
90	106.780	444.56	1.7383
100	99.9950	454.74	1.7660
110	94.4560	464.48	1.7917
120	89.7820	473.94	1.8161
130	85.7450	483.22	1.8394
140	82.1970	492.37	1.8618
150	79.0370	501.45	1.8835
160	76.1920	510.47	1.9046
170	73.6090	519.47	1.9251
180	71.2460	528.46	1.9452
190	69.0710	537.45	1.9648
200	67.0590	546.46	1.9841
210	65.1890	555.48	2.0030
220	63.4440	564.54	2.0215

ضغط ١.٠ ميفاسكال (تثليج ٠.٥١ م°)

Temp °C	Density kg/m ³	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat L	850.11	319.35	1.3662
sat V	226.65	406.64	1.6159
90	198.390	420.89	1.6499
100	172.110	436.50	1.6923
110	156.030	449.26	1.7261
120	144.490	460.74	1.7557
130	135.300	471.51	1.7827
140	127.840	481.81	1.8080
150	121.550	491.82	1.8319
160	116.110	501.61	1.8548
170	111.330	511.26	1.8768
180	107.070	520.81	1.8981
190	103.250	530.29	1.9188
200	99.7730	539.73	1.9390
210	96.5990	549.14	1.9587
220	93.6800	558.54	1.9779
230	90.9820	567.94	1.9968
240	88.4750	577.35	2.0153

ضغط ٢.١ ميفاسكال (تثليج ٠.١٧ م°)

Temp °C	Density kg/m ³	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat L	1033.3	276.83	1.2482
sat V	110.06	417.58	1.6713
60	109.410	418.24	1.6733
70	99.4030	429.89	1.7077
80	92.1800	440.34	1.7378
90	86.5090	450.16	1.7652
100	81.8410	459.59	1.7908
110	77.8770	468.79	1.8151
120	74.4370	477.82	1.8384
130	71.4030	486.75	1.8608
140	68.6920	495.61	1.8826
150	66.2460	504.44	1.9037
160	64.0190	513.26	1.9243
170	61.9790	522.08	1.9444
180	60.0980	530.90	1.9641
190	58.3560	539.75	1.9834
200	56.7340	548.63	2.0024
210	55.2200	557.54	2.0210

ضغط ٢.٠ ميفاسكال (تثليج ٠.٠٠ م°)

Temp °C	Density kg/m ³	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat L	969.46	293.16	1.2947
sat V	146.16	416.08	1.6529
80	129.150	429.84	1.6924
90	118.100	441.49	1.7250
100	109.880	452.14	1.7539
110	103.340	462.21	1.7806
120	97.9070	471.92	1.8055
130	93.2720	481.39	1.8293
140	89.2370	490.71	1.8521
150	85.6690	499.91	1.8742
160	82.4750	509.05	1.8955
170	79.5900	518.14	1.9163
180	76.9610	527.22	1.9365
190	74.5500	536.28	1.9563
200	72.3270	545.36	1.9757
210	70.2660	554.44	1.9947
220	68.3460	563.55	2.0133
230	66.5520	572.69	2.0317

ضغط ١.٨ ميفاسكال (تثليج ٠.١٨ م°)

Temp °C	Density kg/m ³	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat L	769.08	333.93	1.4049
sat V	289.55	400.86	1.5884
100	218.410	425.67	1.6564
110	190.280	441.32	1.6978
120	172.630	454.28	1.7312
130	159.790	466.99	1.7606
140	149.720	478.97	1.7875
150	141.460	487.48	1.8126
160	134.490	497.67	1.8365
170	128.460	507.65	1.8592
180	123.170	517.48	1.8812
190	118.470	527.20	1.9024
200	114.230	536.84	1.9230
210	110.390	546.43	1.9430
220	106.880	555.98	1.9626
230	103.660	565.53	1.9818
240	100.680	575.06	2.0005
250	97.9120	584.60	2.0189

ضغط ٢.٦ ميفاسكال (تثليج ٠.٢٢ م°)

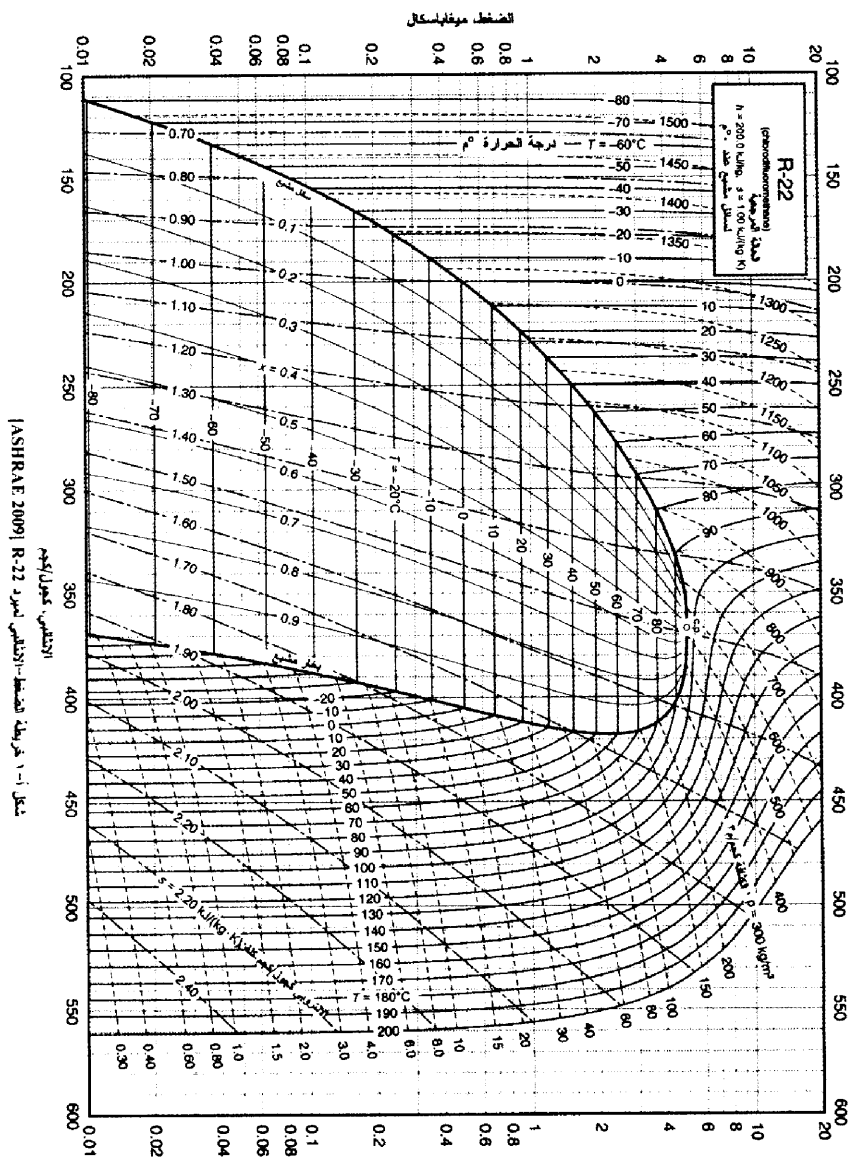
Temp °C	Density kg/m ³	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat L	1012.1	282.42	1.2843
sat V	121.44	417.29	1.6652
70	112.64	425.91	1.6906
80	103.31	437.14	1.7229
90	96.293	447.44	1.7517
100	90.671	457.22	1.7782
110	85.983	466.67	1.8032
120	81.967	475.91	1.8270
130	78.460	485.00	1.8499
140	75.352	494.01	1.8719
150	72.585	502.96	1.8933
160	70.042	511.88	1.9142
170	67.740	520.78	1.9345
180	65.626	529.69	1.9544
190	63.674	538.61	1.9738
200	61.882	547.55	1.9929
210	60.175	556.52	2.0117
220	58.596	565.52	2.0301

ضغط ٣.٠ ميفاسكال (تثليج ٠.٧٧ م°)

Temp °C	Density kg/m ³	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat L	913.37	306.18	1.3307
sat V	182.01	413.29	1.636
80	173.91	421.66	1.6484
90	151.55	432.66	1.6903
100	137.74	444.98	1.7238
110	127.69	456.12	1.7532
120	119.78	466.58	1.7802
130	113.28	476.62	1.8054
140	107.78	486.38	1.8293
150	103.01	495.95	1.8522
160	98.805	505.40	1.8743
170	95.060	514.78	1.8957
180	91.685	524.06	1.9164
190	88.619	533.32	1.9366
200	85.813	542.57	1.9564
210	83.229	551.81	1.9757
220	80.838	561.07	1.9947
230	78.615	570.33	2.0133

ضغط ٥.٠ ميفاسكال

Temp °C	Density kg/m ³	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
100	296.59	408.94	1.6062
110	234.11	431.69	1.6684
120	205.85	447.00	1.7059
130	187.40	459.98	1.7385
140	173.75	471.80	1.7675
150	162.96	482.92	1.7941
160	154.08	493.58	1.8190
170	146.55	503.93	1.8426
180	140.04	514.08	1.8652
190	134.31	524.03	1.8870
200	129.21	533.89	1.9080
210	124.63	543.67	1.9285
220	120.46	553.40	1.9484
230	116.68	563.09	1.9679
240	113.18	572.75	1.9869
250	109.92	582.41	2.0055



جدول ٤-أ- خواص المبرد ١٣٤a (R134a) للبخار المحمص [NIST-Refprop8]

ضغط ٠.١٠ ميغاباسكال (تشبع ١٣.١٣°م)				ضغط ٠.١٠ ميغاباسكال (تشبع ٢٦.٠٦°م)				ضغط ٠.١٠ ميغاباسكال (تشبع ٣٦.٠٦°م)			
فتردي	النتابي	كجول/كجم	كجول/كجم	فتردي	النتابي	كجول/كجم	كجول/كجم	فتردي	النتابي	كجول/كجم	كجول/كجم
كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم
sat.L	1349.4	177.36	0.91482	sat.L	1377.5	165.44	0.86756	sat.L	1419	147.57	0.79317
sat.V	7.6172	368.32	1.7388	sat.V	5.1932	362.6	1.7475	sat.V	2.7082	373.71	1.765
-10	7.3629	394.21	1.7815	-20	5.0401	387.65	1.7677	-40	2.7023	374.05	1.7685
0	7.0416	402.49	1.7824	-10	4.8208	395.64	1.7986	-30	2.5800	381.58	1.7980
10	6.7531	410.86	1.8225	0	4.6232	403.73	1.8288	-20	2.4699	389.21	1.8288
20	6.4913	419.33	1.8519	10	4.4433	411.95	1.8584	-10	2.3697	398.99	1.8590
30	6.2520	427.94	1.8808	20	4.2784	420.31	1.8874	0	2.2780	404.92	1.8885
40	6.0318	436.68	1.9091	30	4.1265	428.82	1.9190	10	2.1937	413.02	1.9176
50	5.8283	445.57	1.9371	40	3.9860	437.49	1.9441	20	2.1157	421.27	1.9463
60	5.6394	454.60	1.9646	50	3.8554	446.30	1.9718	30	2.0433	429.69	1.9745
70	5.4634	463.79	1.9918	60	3.7336	455.28	1.9991	40	1.9759	438.28	2.0024
80	5.2989	473.12	2.0186	70	3.6198	464.41	2.0281	50	1.9130	447.03	2.0299
90	5.1446	482.61	2.0451	80	3.5130	473.70	2.0528	60	1.8541	455.94	2.0571
100	4.9987	492.25	2.0713	90	3.4126	483.14	2.0792	70	1.7989	465.02	2.0839
110	4.8631	502.04	2.0971	100	3.3181	492.74	2.1053	80	1.7489	474.26	2.1105
120	4.7341	511.98	2.1228	110	3.2288	502.50	2.1311	90	1.6979	483.67	2.1367
130	4.6121	522.08	2.1481	120	3.1444	512.42	2.1586	100	1.6516	493.24	2.1627
140	4.4965	532.33	2.1732	130	3.0844	522.49	2.1819	110	1.6079	502.96	2.1884
ضغط ٠.٣٠ ميغاباسكال (تشبع ١٧.٧٢°م)				ضغط ٠.٣٠ ميغاباسكال (تشبع ٢٨.٠٨°م)				ضغط ٠.٣٠ ميغاباسكال (تشبع ٣٨.٠٨°م)			
فتردي	النتابي	كجول/كجم	كجول/كجم	فتردي	النتابي	كجول/كجم	كجول/كجم	فتردي	النتابي	كجول/كجم	كجول/كجم
كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم
sat.L	1292.8	200.9	1.0033	sat.L	1308.8	194.27	0.97898	sat.L	1327.4	186.6	0.95027
sat.V	14.77	399	1.7267	sat.V	12.394	396.08	1.7296	sat.V	10.012	392.62	1.7334
10	14.0980	407.34	1.7567	0	12.1310	399.83	1.7434	-10	10.0090	392.68	1.7337
20	13.4870	416.24	1.7876	10	11.5740	408.55	1.7748	0	9.5410	401.20	1.7654
30	12.9070	425.17	1.8175	20	11.0820	417.30	1.8051	10	9.1281	409.73	1.7961
40	12.4020	434.19	1.8468	30	10.6390	426.12	1.8347	20	8.7577	418.33	1.8259
50	11.9440	443.31	1.8755	40	10.2380	435.04	1.8637	30	8.4220	427.04	1.8551
60	11.5250	452.53	1.9036	50	9.8712	444.07	1.8921	40	8.1152	435.87	1.8838
70	11.1380	461.89	1.9312	60	9.5339	453.23	1.9200	50	7.8331	444.83	1.9120
80	10.7810	471.37	1.9585	70	9.2220	462.53	1.9475	60	7.5725	453.92	1.9397
90	10.4490	480.99	1.9863	80	8.9323	471.96	1.9746	70	7.3305	463.16	1.9670
100	10.1390	490.74	2.0118	90	8.6622	481.53	2.0013	80	7.1051	472.54	1.9939
110	9.8486	500.63	2.0380	100	8.4097	491.25	2.0277	90	6.8944	482.07	2.0206
120	9.5762	510.67	2.0638	110	8.1727	501.11	2.0537	100	6.6967	491.75	2.0468
130	9.3197	520.85	2.0894	120	7.9498	511.11	2.0795	110	6.5109	501.57	2.0728
140	9.0777	531.17	2.1147	130	7.7396	521.26	2.1050	120	6.3359	511.55	2.0985
150	8.8489	541.64	2.1397	140	7.5410	531.56	2.1302	130	6.1705	521.67	2.1239
160	8.6321	552.25	2.1645	150	7.3530	542.00	2.1552	140	6.0140	531.94	2.1491
ضغط ٠.٥٨ ميغاباسكال (تشبع ٢١.٠٩°م)				ضغط ٠.٥٨ ميغاباسكال (تشبع ٣١.٠٩°م)				ضغط ٠.٥٨ ميغاباسكال (تشبع ٤١.٠٩°م)			
فتردي	النتابي	كجول/كجم	كجول/كجم	فتردي	النتابي	كجول/كجم	كجول/كجم	فتردي	النتابي	كجول/كجم	كجول/كجم
كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم	كجول/كجم
sat.L	1219.5	229.68	1.1037	sat.L	1240.8	221.5	1.0759	sat.L	1264.7	212.11	1.0433
sat.V	29.155	410.57	1.7175	sat.V	24.317	407.47	1.7197	sat.V	19.529	403.72	1.7226
30	27.7900	418.96	1.7455	20	23.7440	411.61	1.7339	10	19.4150	404.72	1.7261
40	26.4090	428.73	1.7772	30	22.5540	421.16	1.7659	20	18.4460	414.01	1.7584
50	25.2150	438.43	1.8077	40	21.5280	430.63	1.7967	30	17.8070	423.22	1.7893
60	24.1610	448.13	1.8373	50	20.6190	440.11	1.8265	40	16.8650	432.45	1.8192
70	23.2180	457.88	1.8661	60	19.8080	449.64	1.8555	50	16.2010	441.74	1.8484
80	22.3660	467.70	1.8943	70	19.0740	459.25	1.8839	60	15.6000	451.11	1.8770
90	21.5890	477.81	1.9220	80	18.4060	468.95	1.9118	70	15.0500	460.58	1.9050
100	20.8770	487.62	1.9492	90	17.7920	478.76	1.9392	80	14.5460	470.17	1.9325
110	20.2190	497.74	1.9759	100	17.2250	488.68	1.9661	90	14.0800	479.88	1.9597
120	19.6090	507.97	2.0023	110	16.7000	498.72	1.9927	100	13.6470	489.72	1.9864
130	19.0400	518.33	2.0283	120	16.2110	508.88	2.0189	110	13.2440	499.68	2.0127
140	18.5090	528.81	2.0540	130	15.7530	519.18	2.0447	120	12.8670	509.78	2.0387
150	18.0110	539.42	2.0794	140	15.3240	529.60	2.0703	130	12.5130	520.02	2.0645
160	17.5420	550.16	2.1045	150	14.9210	540.17	2.0955	140	12.1810	530.39	2.0899
170	17.1000	561.04	2.1293	160	14.5400	550.86	2.1205	150	11.8670	540.91	2.1150
180	16.6820	572.04	2.1539	170	14.1800	561.70	2.1453	160	11.5700	551.56	2.1399

جدول ٤-١ خواص المبرد ١٣٤ (R134a) للبغلة المصنص [NIST-Refprop8] (مستمع)

ضبط ٠.٧ موفياستال (تثبي ٢٦.٧١°م)					ضبط ٠.٨ موفياستال (تثبي ٣١.٣٣°م)					ضبط ٠.٩ موفياستال (تثبي ٣٥.٠٢°م)				
الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم
sat.L	1200.2	236.99	1.128		sat.L	1182.2	243.65	1.1497		sat.L	1165.4	249.78	1.1695	
sat.V	34.064	413.2	1.7156		sat.V	39.025	415.46	1.714		sat.V	44.078	417.43	1.7126	
30	33.371	416.60	1.7269		40	36.988	424.59	1.7436		40	42.7810	422.32	1.7283	
40	31.549	426.72	1.7598		50	35.030	434.84	1.7758		50	40.3070	432.92	1.7616	
50	30.010	436.87	1.7910		60	33.363	444.95	1.8067		60	38.2470	443.28	1.7932	
60	28.674	446.57	1.8212		70	31.908	455.03	1.8365		70	36.4780	453.54	1.8236	
70	27.493	456.47	1.8505		80	30.619	465.12	1.8654		80	34.9280	463.78	1.8530	
80	26.435	466.42	1.8791		90	29.462	475.25	1.8937		90	33.5500	474.03	1.8816	
90	25.478	476.44	1.9070		100	28.414	485.45	1.9214		100	32.3090	484.34	1.9096	
100	24.605	486.54	1.9345		110	27.457	495.74	1.9486		110	31.1830	494.71	1.9370	
110	23.804	496.74	1.9615		120	26.578	506.12	1.9754		120	30.1530	505.17	1.9640	
120	23.064	507.05	1.9880		130	25.764	516.60	2.0017		130	29.2050	515.72	1.9905	
130	22.377	517.47	2.0142		140	25.009	527.20	2.0277		140	28.3270	526.38	2.0166	
140	21.737	528.01	2.0400		150	24.305	537.91	2.0533		150	27.5110	537.14	2.0423	
150	21.139	538.67	2.0656		160	23.646	548.74	2.0786		160	26.7500	548.02	2.0678	
160	20.577	549.46	2.0907		170	23.027	559.70	2.1036		170	26.0360	559.02	2.0929	
170	20.049	550.37	2.1156		180	22.445	570.78	2.1283		180	25.3680	570.15	2.1177	
180	19.550	561.42	2.1403		190	21.894	582.00	2.1528		190	24.7340	581.39	2.1422	
ضبط ٠.٩ موفياستال (تثبي ٣٩.٣٩°م)					ضبط ١.٠ موفياستال (تثبي ٤١.٣٢°م)					ضبط ١.١ موفياستال (تثبي ٤٣.٤١°م)				
الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم
sat.L	1149.3	256.5	1.1876		sat.L	1119.2	265.95	1.2201		sat.L	1090.9	275.4	1.2489	
sat.V	49.222	419.16	1.7113		sat.V	59.815	422.04	1.7087		sat.V	70.87	424.3	1.7062	
40	48.004	419.86	1.7135		50	58.135	426.41	1.7223		60	66.6430	433.82	1.7345	
50	45.879	430.88	1.7482		60	54.335	437.79	1.7570		70	82.2670	445.25	1.7689	
60	43.350	441.53	1.7806		70	51.276	448.76	1.7895		80	96.7450	456.48	1.8012	
70	41.218	452.00	1.8116		80	48.710	459.53	1.8204		90	110.5940	467.52	1.8320	
80	39.372	462.40	1.8414		90	46.499	470.22	1.8502		100	123.2540	478.45	1.8617	
90	37.746	472.79	1.8705		100	44.558	480.87	1.8792		110	135.0280	489.34	1.8905	
100	36.296	483.21	1.8988		110	42.830	491.54	1.9074		120	145.0490	500.24	1.9186	
110	34.985	493.67	1.9264		120	41.275	502.25	1.9350		130	154.2690	511.17	1.9460	
120	33.792	504.21	1.9536		130	39.862	513.03	1.9621		140	162.6530	522.16	1.9730	
130	32.699	514.83	1.9803		140	38.569	523.87	1.9886		150	170.1770	533.21	1.9994	
140	31.692	525.55	2.0065		150	37.379	534.81	2.0148		160	177.8170	544.35	2.0254	
150	30.758	536.37	2.0324		160	36.277	545.84	2.0405		170	185.5600	555.58	2.0510	
160	29.889	547.30	2.0579		170	35.252	556.97	2.0660		180	193.3920	566.91	2.0763	
170	29.076	558.35	2.0831		180	34.295	568.22	2.0911		190	201.3010	578.34	2.1013	
180	28.314	569.51	2.1080		190	33.399	579.57	2.1158		200	209.3790	589.89	2.1259	
190	27.598	580.79	2.1327		200	32.556	591.05	2.1403		210	217.6190	601.54	2.1503	
ضبط ١.٠ موفياستال (تثبي ٤٣.٤١°م)					ضبط ١.١ موفياستال (تثبي ٤٥.٥٠°م)					ضبط ١.٢ موفياستال (تثبي ٤٧.٦٨°م)				
الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم	الحرارة كجم/كجم
sat.L	1063.7	284.11	1.2748		sat.L	1037.3	292.26	1.2987		sat.L	1011.4	299.95	1.3209	
sat.V	82.464	426.04	1.7036		sat.V	94.662	427.36	1.7007		sat.V	107.63	428.28	1.6978	
60	80.824	428.84	1.7120		70	88.2740	437.07	1.7293		70	104.4600	432.06	1.7086	
70	74.458	441.40	1.7491		80	81.5700	449.67	1.7655		80	94.8880	445.77	1.7461	
80	69.828	453.22	1.7831		90	76.4050	461.63	1.7989		90	88.0030	458.38	1.7833	
90	65.722	464.66	1.8150		100	72.1980	473.25	1.8305		100	82.6120	470.45	1.8160	
100	62.443	475.91	1.8456		110	68.6510	484.68	1.8607		110	78.1820	482.21	1.8471	
110	59.619	487.06	1.8751		120	65.5900	496.02	1.8899		120	74.4280	493.80	1.8770	
120	57.143	498.16	1.9037		130	62.9000	507.32	1.9183		130	71.1710	505.31	1.9059	
130	54.941	509.27	1.9316		140	60.5040	518.61	1.9460		140	68.3040	516.78	1.9340	
140	52.960	520.40	1.9589		150	58.3480	529.93	1.9731		150	65.7450	528.24	1.9614	
150	51.162	531.59	1.9856		160	56.3890	541.30	1.9996		160	63.4370	539.74	1.9883	
160	49.519	542.84	2.0119		170	54.5970	552.74	2.0257		170	61.3390	551.28	2.0146	
170	48.007	554.17	2.0378		180	52.9480	564.25	2.0514		180	59.4170	562.88	2.0405	
180	46.608	565.58	2.0632		190	51.4270	575.84	2.0767		190	57.6480	574.57	2.0660	
190	45.307	577.10	2.0884		200	50.0010	587.53	2.1017		200	56.0050	586.34	2.0912	
200	44.093	588.71	2.1132		210	48.8760	599.32	2.1263		210	54.4780	598.20	2.1160	
210	42.957	600.44	2.1377		220	47.4340	611.21	2.1507		220	53.0620	610.15	2.1405	

جدول ٤-أ- خواص المبرد ١٣٤a (R134a) للبغاري المحمص [NIST-Refprop8] (النتهي)

ضبط ٢.٢ ميغاسكال (نتيخ ٣٧١.٧٣°م)				
دحرره م	الكثافه كجم/م ^٣	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم
sat.L	985.47	307.3	1.3417	
sat.V	121.42	428.84	1.8941	
80	110.070	441.40	1.7301	
90	100.740	454.87	1.7877	
100	93.8050	467.48	1.8020	
110	88.2810	479.62	1.8341	
120	83.6960	491.60	1.8647	
130	79.7840	503.24	1.8942	
140	76.3790	514.89	1.9228	
150	73.3670	526.52	1.9506	
160	70.8730	538.15	1.9777	
170	68.2380	549.81	2.0043	
180	66.0200	561.52	2.0305	
190	63.9850	573.29	2.0562	
200	62.1080	585.13	2.0815	
210	60.3670	597.06	2.1064	
220	58.7450	609.08	2.1310	
230	57.2290	621.20	2.1554	

ضبط ٢.٨ ميغاسكال (نتيخ ٨٢.٩٠°م)				
دحرره م	الكثافه كجم/م ^٣	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم
sat.L	905.19	328.01	1.399	
sat.V	169.84	428.33	1.6807	
90	150.190	441.77	1.7181	
100	133.950	457.19	1.7800	
110	122.970	471.01	1.7986	
120	114.680	484.04	1.8301	
130	108.020	496.62	1.8618	
140	102.480	508.95	1.8920	
150	97.7410	521.12	1.9211	
160	93.6100	533.21	1.9493	
170	89.9560	545.25	1.9768	
180	86.6840	557.29	2.0037	
190	83.7280	569.35	2.0300	
200	81.0340	581.45	2.0568	
210	78.5840	593.61	2.0813	
220	76.2840	605.83	2.1063	
230	74.1700	618.13	2.1310	
240	72.2020	630.52	2.1554	

ضبط ٤.٠ ميغاسكال (نتيخ ٣٠٠.٣٤°م)				
دحرره م	الكثافه كجم/م ^٣	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم
sat.L	832.87	376.67	1.5247	
sat.V	390.23	405.38	1.8048	
110	234.040	446.28	1.7131	
120	200.280	465.10	1.7816	
130	180.220	480.90	1.8013	
140	165.990	495.38	1.8368	
150	155.030	509.12	1.8697	
160	146.160	522.43	1.9008	
170	138.730	535.47	1.9305	
180	132.370	548.33	1.9592	
190	126.820	561.08	1.9871	
200	121.910	573.78	2.0142	
210	117.510	586.46	2.0407	
220	113.540	599.14	2.0667	
230	109.820	611.85	2.0922	
240	106.800	624.60	2.1173	
250	103.640	637.40	2.1420	
260	100.710	650.27	2.1684	

ضبط ٢.٠٤ ميغاسكال (نتيخ ٧٥.٩٢°م)				
دحرره م	الكثافه كجم/م ^٣	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم
sat.L	969.38	314.38	1.3615	
sat.V	136.24	429.04	1.6902	
80	128.02	438.31	1.7109	
90	114.95	451.02	1.7520	
100	105.83	464.31	1.7881	
110	99.035	476.91	1.8214	
120	93.452	489.12	1.8526	
130	88.772	501.11	1.8830	
140	84.750	512.97	1.9121	
150	81.230	524.76	1.9403	
160	78.108	536.53	1.9678	
170	75.302	548.31	1.9947	
180	72.782	560.13	2.0210	
190	70.443	571.99	2.0469	
200	68.312	583.92	2.0724	
210	66.342	595.92	2.0975	
220	64.514	608.00	2.1223	
230	62.809	620.18	2.1467	

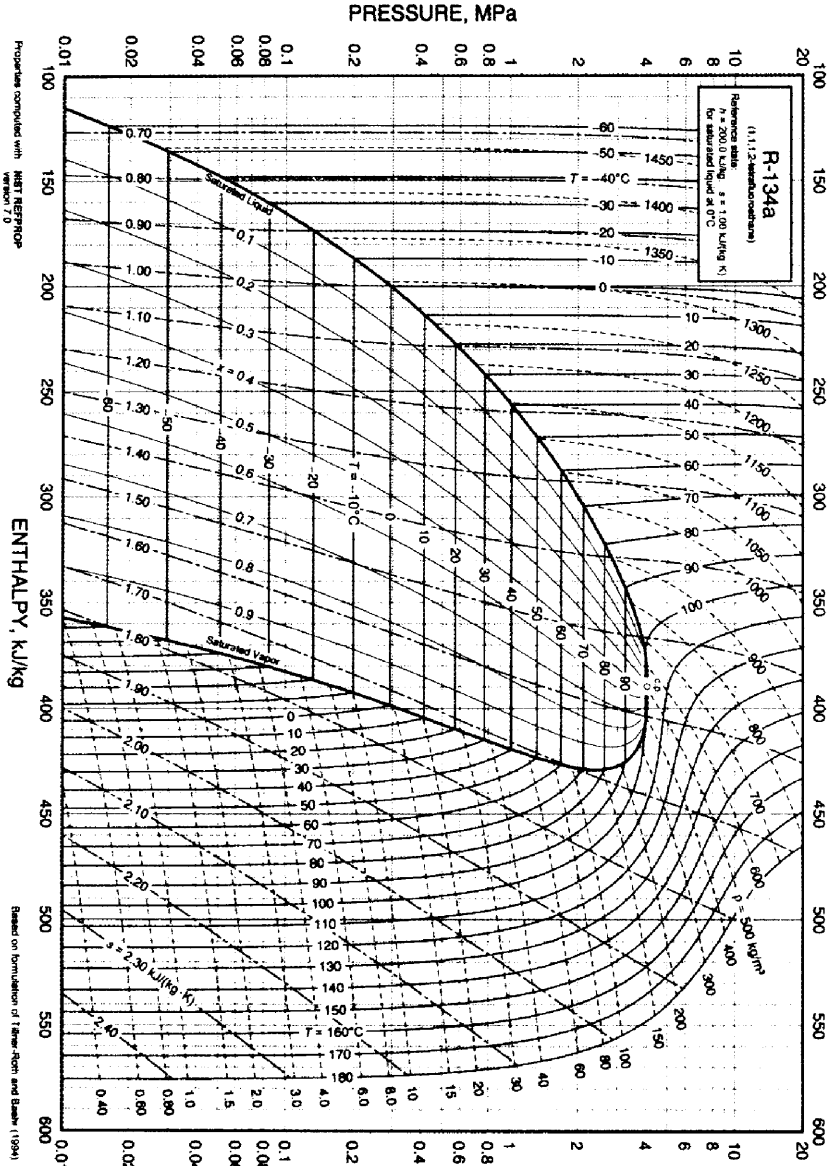
ضبط ٣.٠ ميغاسكال (نتيخ ٨٦.٢٠°م)				
دحرره م	الكثافه كجم/م ^٣	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم
sat.L	878.21	334.7	1.4171	
sat.V	189.35	427.34	1.6748	
90	173.860	435.78	1.6982	
100	150.580	453.10	1.7453	
110	136.480	467.77	1.7841	
120	126.320	481.32	1.8190	
130	118.380	494.26	1.8515	
140	111.900	506.85	1.8824	
150	106.430	519.24	1.9120	
160	101.700	531.50	1.9406	
170	97.5810	543.68	1.9684	
180	93.8760	555.84	1.9956	
190	90.5830	568.01	2.0221	
200	87.5580	580.20	2.0482	
210	84.8130	592.44	2.0738	
220	82.2880	604.73	2.0990	
230	79.9540	617.10	2.1238	
240	77.7850	629.54	2.1483	

ضبط ٤.٥ ميغاسكال				
دحرره م	الكثافه كجم/م ^٣	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم
110	341.900	428.22	1.6561	
120	254.710	454.33	1.7286	
130	220.250	472.91	1.7753	
140	198.770	488.86	1.8144	
150	183.300	503.58	1.8495	
160	171.300	517.55	1.8822	
170	161.540	531.11	1.9132	
180	153.370	544.38	1.9428	
190	146.350	557.48	1.9714	
200	140.230	570.46	1.9991	
210	134.810	583.39	2.0261	
220	129.960	596.28	2.0525	
230	125.570	609.17	2.0784	
240	121.680	622.09	2.1038	
250	117.920	635.04	2.1288	
260	114.540	648.05	2.1536	

ضبط ٧.٦ ميغاسكال (نتيخ ١٠١.١٦°م)				
دحرره م	الكثافه كجم/م ^٣	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم
sat.L	932.74	321.26	1.3805	
sat.V	152.28	428.88	1.6858	
80	150.81	430.04	1.6891	
90	131.14	446.72	1.7357	
100	119.21	460.90	1.7742	
110	110.55	474.04	1.8090	
120	103.76	486.63	1.8414	
130	98.171	498.90	1.8722	
140	93.442	510.96	1.9018	
150	89.349	522.96	1.9305	
160	85.748	534.88	1.9583	
170	82.539	546.79	1.9855	
180	79.648	558.72	2.0121	
190	77.022	570.68	2.0382	
200	74.620	582.69	2.0639	
210	72.408	594.77	2.0891	
220	70.360	606.92	2.1140	
230	68.466	619.16	2.1386	

ضبط ٩.٧٣ ميغاسكال (نتيخ ١٢٠.٧٣°م)				
دحرره م	الكثافه كجم/م ^٣	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم
sat.L	791.62	351.87	1.4627	
sat.V	252.02	422.23	1.6545	
100	206.830	439.98	1.7025	
110	178.860	458.47	1.7514	
120	159.320	473.85	1.7910	
130	146.900	487.94	1.8284	
140	137.330	501.35	1.8593	
150	129.580	514.34	1.8903	
160	123.050	527.08	1.9201	
170	117.460	539.66	1.9488	
180	112.570	552.15	1.9767	
190	108.240	564.59	2.0039	
200	104.360	577.02	2.0304	
210	100.850	589.47	2.0564	
220	97.6530	601.96	2.0820	
230	94.7160	614.49	2.1072	
240	92.0040	627.08	2.1320	
250	89.4900	639.74	2.1564	

ضبط ١٠.٠ ميغاسكال				
دحرره م	الكثافه كجم/م ^٣	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم	فئالي كجول/كجم
110	807.830	391.02	1.5613	
120	335.330	440.09	1.6880	
130	270.040	463.66	1.7472	
140	236.820	481.89	1.7914	
150	214.900	497.61	1.8295	
160	198.740	512.42	1.8641	
170	186.040	526.58	1.8964	
180	175.650	540.32	1.9271	
190	166.900	553.79	1.9566	
200	159.360	567.06	1.9849	
210	152.760	580.27	2.0126	
220	146.920	593.39	2.0393	
230	141.680	606.48	2.0656	
240	136.930	619.57	2.0914	
250	132.610	632.67	2.1167	
260	128.650	645.81	2.1416	



شکل ٢-١: دیاگرام فشار-انرژی-دما برای R-134a [ASHRAE 2009]

جدول أ-٥ الخواص التيرموديناميكية لمبرد R-717 لسانل و بخار مشبع [SHRAE 2009]

[illegible]

النقطة الثالثة:

درجة حرارة الخزان الطبيعية^٥

نقطة العرجة:

جدول ٦-أ خواص المبرد ٧١٧ (R717) لتبخار المحمص [NIST-Refprop8]

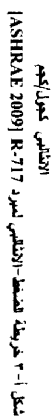
ضبط ٠.٠٥ ميفاسكسل (تثبيع ٢٠.٥٢°م)				ضبط ٠.١٠ ميفاسكسل (تثبيع ٢٢.٥٩°م)				ضبط ٠.١٥ ميفاسكسل (تثبيع ٢٥.٢١°م)			
الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة °م
sat.L	697.97	9.501	0.16216	sat.L	682.29	47.599	0.40684	sat.L	671.8	85.069	0.56927
sat.V	0.45978	1397.1	6.3685	sat.V	0.87867	1417.9	6.1267	sat.V	1.2841	1430.3	5.9861
-40	0.4459	1411.3	6.4305	-30	0.8641	1426.1	6.1607	-20	1.2535	1442.6	6.035
-30	0.4285	1432.9	6.5211	-20	0.8263	1448.5	6.2513	-10	1.1995	1485.6	6.1242
-20	0.4088	1454.3	6.6072	-10	0.7923	1470.6	6.3369	0	1.1508	1488.2	6.2085
-10	0.3926	1475.5	6.6895	0	0.7612	1492.5	6.4184	10	1.1066	1510.5	6.2886
0	0.3777	1496.7	6.7686	10	0.7328	1514.2	6.4965	20	1.0680	1532.6	6.3654
10	0.3640	1517.9	6.8447	20	0.7066	1535.9	6.5717	30	1.0286	1554.6	6.4392
20	0.3513	1539.1	6.9183	30	0.6823	1557.5	6.6443	40	0.9940	1576.6	6.5105
30	0.3395	1560.4	6.9897	40	0.6597	1579.2	6.7146	50	0.9617	1598.8	6.5796
40	0.3284	1581.7	7.059	50	0.6387	1600.9	6.7829	60	0.9317	1620.6	6.6467
50	0.3181	1603.2	7.1265	60	0.6190	1622.7	6.8493	70	0.9036	1642.7	6.712
60	0.3085	1624.8	7.1923	70	0.6006	1644.6	6.9141	80	0.8771	1664.9	6.7758
70	0.2994	1646.5	7.2566	80	0.5832	1666.6	6.9774	90	0.8523	1687.2	6.838
80	0.2908	1668.4	7.3194	90	0.5668	1688.8	7.0392	100	0.8289	1709.6	6.899
90	0.2827	1690.4	7.3809	100	0.5514	1711.1	7.0998	110	0.8067	1732.2	6.9587
100	0.2751	1712.6	7.4411	110	0.5367	1733.8	7.1592	120	0.7858	1754.9	7.0172
110	0.2678	1734.9	7.5002	120	0.5229	1756.2	7.2175	130	0.7659	1777.8	7.0747
ضبط ٠.٢٠ ميفاسكسل (تثبيع ٢٨.٨٠°م)				ضبط ٠.٢٥ ميفاسكسل (تثبيع ٣٠.٢٠°م)				ضبط ٠.٣٠ ميفاسكسل (تثبيع ٣٢.٢٢°م)			
الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة °م
sat.L	663.65	113.76	0.67424	sat.L	656.88	137.35	0.76576	sat.L	651.03	157.56	0.84268
sat.V	1.6817	1439.2	5.8865	sat.V	2.074	1446.1	5.8092	sat.V	2.4825	1451.7	5.7458
-10	1.6148	1460.5	5.9685	-10	2.0386	1455.2	5.8438	0	2.3595	1474.7	5.8319
0	1.5468	1483.8	6.0557	0	1.9496	1479.3	5.934	10	2.2599	1498.9	5.9189
10	1.4855	1506.7	6.138	10	1.8699	1502.9	6.0186	20	2.1705	1522.5	6.0009
20	1.4297	1529.3	6.2164	20	1.7978	1526	6.0987	30	2.0892	1545.8	6.0787
30	1.3784	1551.7	6.2915	30	1.7319	1548.8	6.1752	40	2.0149	1568.7	6.1533
40	1.3312	1574	6.3638	40	1.6715	1571.4	6.2466	50	1.9464	1591.5	6.2249
50	1.2873	1596.2	6.4338	50	1.6156	1593.9	6.3194	60	1.8830	1614.2	6.2941
60	1.2466	1618.5	6.5016	60	1.5637	1616.4	6.3879	70	1.8240	1636.9	6.3612
70	1.2085	1640.8	6.5675	70	1.5153	1638.8	6.4544	80	1.7690	1659.6	6.4284
80	1.1728	1663.1	6.6317	80	1.4700	1661.4	6.5191	90	1.7174	1682.3	6.4898
90	1.1392	1685.6	6.6943	90	1.4276	1683.9	6.5821	100	1.6690	1705.1	6.5518
100	1.1076	1708.1	6.7556	100	1.3877	1706.6	6.6437	110	1.6234	1728	6.6124
110	1.0778	1730.8	6.8156	110	1.3500	1729.4	6.704	120	1.5803	1751	6.6717
120	1.0496	1753.6	6.8744	120	1.3145	1752.3	6.7631	130	1.5396	1774.2	6.7298
130	1.0230	1776.6	6.9321	130	1.2808	1775.4	6.821	140	1.5011	1797.5	6.7868
140	0.9976	1799.7	6.9888	140	1.2489	1798.6	6.8778	150	1.4644	1820.9	6.8429
ضبط ٠.٣٥ ميفاسكسل (تثبيع ٣٨.٨٨°م)				ضبط ٠.٤٠ ميفاسكسل (تثبيع ٤٠.١٩°م)				ضبط ٠.٤٥ ميفاسكسل (تثبيع ٤٢.٢٨°م)			
الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الحرارة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الضغط كجم/كجم	الحرارة °م
sat.L	641.14	191.31	0.96824	sat.L	632.86	219.2	1.0694	sat.L	625.65	243.21	1.1546
sat.V	3.232	1460.2	5.6458	sat.V	3.9948	1466.5	5.5877	sat.V	4.7539	1471.5	5.5034
0	3.2026	1465.2	5.664	10	3.8828	1482.3	5.6241	10	4.7367	1473.5	5.5105
10	3.0582	1490.8	5.7563	20	3.7111	1508.3	5.7143	20	4.5144	1500.8	5.6055
20	2.9304	1515.6	5.8422	30	3.5589	1533.4	5.7983	30	4.3200	1526.9	5.693
30	2.8157	1539.7	5.923	40	3.4221	1557.8	5.8776	40	4.1471	1552.2	5.7749
40	2.7116	1563.3	5.9999	50	3.2978	1581.8	5.953	50	3.9913	1576.8	5.8524
50	2.6164	1586.7	6.0733	60	3.1841	1605.5	6.0252	60	3.8495	1601	5.9262
60	2.5287	1609.9	6.144	70	3.0793	1629	6.0948	70	3.7195	1625	5.997
70	2.4476	1633	6.2123	80	2.9822	1652.4	6.1619	80	3.5998	1648.7	6.0653
80	2.3721	1656	6.2784	90	2.8918	1675.7	6.2271	90	3.4863	1672.4	6.1313
90	2.3016	1679	6.3428	100	2.8074	1699.1	6.2905	100	3.3846	1696	6.1954
100	2.2355	1702.1	6.4054	110	2.7282	1722.4	6.3523	110	3.2877	1719.6	6.2578
110	2.1735	1725.2	6.4686	120	2.6538	1745.8	6.4126	120	3.1967	1743.2	6.3187
120	2.1150	1748.4	6.5284	130	2.5837	1769.3	6.4716	130	3.1112	1766.9	6.3782
130	2.0598	1771.8	6.585	140	2.5174	1792.9	6.5295	140	3.0305	1790.7	6.4364
140	2.0076	1795.2	6.6424	150	2.4547	1816.7	6.5882	150	2.9542	1814.5	6.4935
150	1.9582	1818.8	6.6988	160	2.3952	1840.5	6.642	160	2.8819	1838.5	6.5498

جدول ٦-١ خواص المبرد ٧١٧ (R717) للبخار المصحح [NIST-Refprop8] (مستمر)

ضغط ٠.٧ ميغاباسكال (تشبع ٠.١٣.٨٠°م)				ضغط ٠.٨ ميغاباسكال (تشبع ٠.١٧.٨٠°م)				ضغط ٠.٩ ميغاباسكال (تشبع ٠.٢١.٥٢°م)			
الدرجة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الحالة	الانثالي كجول/كجم	الدرجة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الحالة	الانثالي كجول/كجم	الدرجة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الحالة	الانثالي كجول/كجم
sat L	619.21		284.44	sat L	613.35		283.56	sat L	607.95		301.03
sat V	5.5111		1475.4	sat V	6.2678		1478.6	sat V	7.0244		1481.2
20	5.3424		1483.1	20	6.1978		1485	30	6.7254		1506.4
30	5.1004		1520.3	30	5.9016		1513.4	40	6.4189		1534.4
40	4.8875		1548.4	40	5.6444		1540.5	50	6.1501		1561.2
50	4.6974		1571.7	50	5.4167		1568.5	60	5.9106		1587.2
60	4.5254		1598.5	60	5.2123		1591.9	70	5.6946		1612.6
70	4.3688		1620.9	70	5.0288		1616.8	80	5.4978		1637.5
80	4.2245		1645	80	4.8571		1641.3	90	5.3172		1662.2
90	4.0912		1669	90	4.7008		1665.6	100	5.1504		1686.6
100	3.9675		1692.9	100	4.5580		1689.8	110	4.9957		1711
110	3.8520		1718.7	110	4.4213		1713.9	120	4.8514		1735.2
120	3.7439		1740.6	120	4.2954		1737.9	130	4.7163		1759.5
130	3.6424		1764.4	130	4.1774		1762	140	4.5896		1783.8
140	3.5468		1788.4	140	4.0665		1786.1	150	4.4702		1808.1
150	3.4665		1812.4	150	3.9619		1810.2	160	4.3576		1832.5
160	3.3711		1838.5	160	3.8630		1834.5	170	4.2510		1857
170	3.2902		1860.8	170	3.7694		1858.9	180	4.1500		1881.6
ضغط ١.٠ ميغاباسكال (تشبع ٠.٢٤.٩٠°م)				ضغط ١.٢ ميغاباسكال (تشبع ٠.٣٠.٩٤°م)				ضغط ١.٤ ميغاباسكال (تشبع ٠.٣٦.٠٥°م)			
الدرجة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الحالة	الانثالي كجول/كجم	الدرجة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الحالة	الانثالي كجول/كجم	الدرجة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الحالة	الانثالي كجول/كجم
sat L	602.92		317.16	sat L	593.73		346.29	sat L	585.42		372.2
sat V	7.7823		1483.4	sat V	9.3034		1488.6	sat V	10.835		1488.8
40	7.2121		1528.2	40	8.8605		1515.2	40	10.6030		1501.3
50	6.8984		1555.8	50	8.4429		1544.6	50	10.0590		1532.9
60	6.621		1582.4	60	8.0801		1572.8	60	9.5950		1562.5
70	6.3722		1608.3	70	7.7589		1598.6	70	9.1905		1590.7
80	6.1467		1633.7	80	7.4707		1625.9	80	8.8318		1617.9
90	5.9408		1658.7	90	7.2094		1651.6	90	8.5089		1644.4
100	5.7509		1683.4	100	6.9704		1677	100	8.2159		1670.5
110	5.5752		1708	110	6.7503		1702.1	110	7.9477		1696.1
120	5.4118		1732.5	120	6.5465		1727.1	120	7.7004		1721.6
130	5.2592		1757	130	6.3570		1751.9	130	7.4714		1746.8
140	5.1161		1781.4	140	6.1799		1776.7	140	7.2581		1772
150	4.9817		1805.0	150	6.0138		1801.5	150	7.0588		1797.1
160	4.8549		1830.4	160	5.8577		1826.3	160	6.8718		1822.2
170	4.7361		1855	170	5.7105		1851.2	170	6.6959		1847.3
180	4.6216		1879.8	180	5.5713		1876.1	180	6.5299		1872.5
190	4.5139		1904.6	190	5.4395		1901.2	190	6.3730		1897.7
ضغط ١.٦ ميغاباسكال (تشبع ٠.٤١.٠٢°م)				ضغط ١.٨ ميغاباسكال (تشبع ٠.٤٥.٣٦°م)				ضغط ٢.٠ ميغاباسكال (تشبع ٠.٤٩.٣٥°م)			
الدرجة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الحالة	الانثالي كجول/كجم	الدرجة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الحالة	الانثالي كجول/كجم	الدرجة °م	الكثافة كجم/م ^٣	الحالة	الانثالي كجول/كجم
sat L	577.79		395.69	sat L	570.87		417.28	sat L	563.97		437.34
sat V	12.379		1490.2	sat V	13.939		1490.9	sat V	15.515		1491.1
50	11.756		1520.5	50	13.5470		1507.5	50	15.4490		1493.5
60	11.172		1551.9	60	12.8190		1540.8	60	14.5450		1529.2
70	10.671		1581.4	70	12.2065		1571.8	70	13.8000		1561.9
80	10.232		1609.7	80	11.6760		1601.3	80	13.1660		1592.6
90	9.8413		1637.1	90	11.2090		1629.5	90	12.6140		1621.8
100	9.4890		1663.8	100	10.7910		1657	100	12.1240		1650.1
110	9.1684		1690.1	110	10.4140		1683.9	110	11.6850		1677.6
120	8.8744		1718	120	10.0690		1710.3	120	11.2860		1704.6
130	8.6031		1741.7	130	9.7527		1736.5	130	10.9210		1731.2
140	8.3514		1767.2	140	9.4802		1762.4	140	10.5850		1757.5
150	8.1169		1792.7	150	9.1885		1788.2	150	10.2740		1783.8
160	7.8975		1818	160	8.9350		1813.8	160	9.9848		1809.6
170	7.6915		1843.4	170	8.6976		1839.5	170	9.7145		1835.5
180	7.4976		1868.8	180	8.4746		1865.1	180	9.4611		1861.4
190	7.3148		1894.3	190	8.2645		1890.8	190	9.2228		1887.3
200	7.1414		1919.8	200	8.0660		1916.5	200	8.9980		1913.2

جدول ٦-أ- خواص المبرد ٧١٧ (R717) للبخار المحمص [NIST-Refprop8] (النشوي)

ضبط ٢.٠ ميغاباسكال (تشيع ٥٠٠.٠ °م)				ضبط ٢.٠ ميغاباسكال (تشيع ٥٠٠.٠ °م)				ضبط ٢.٠ ميغاباسكال (تشيع ٥٠٠.٠ °م)			
فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كجم/م ^٣	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كجم/م ^٣	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كجم/م ^٣
sat.L	557.61	456.13	1.8459	sat.L	551.53	473.86	1.8609	sat.L	545.69	490.69	1.9486
sat.V	17.111	1490.9	5.0179	sat.V	18.725	1490.3	4.9821	sat.V	20.364	1469.4	4.8484
60	16.361	1517	5.0973	60	18.2820	1504.1	5.0239	60	20.3280	1490.4	4.9515
70	15.461	1551.6	5.1995	70	17.1960	1540.8	5.1324	70	19.0150	1529.5	5.0673
80	14.707	1583.6	5.2915	80	16.3060	1574.3	5.2287	80	17.9630	1564.8	5.1685
90	14.059	1613.9	5.3762	90	15.5480	1605.8	5.3166	90	17.0840	1597.4	5.2598
100	13.490	1643	5.4552	100	14.8910	1636.8	5.398	100	16.3290	1628.4	5.3438
110	12.983	1671.2	5.5298	110	14.3100	1664.7	5.4745	110	15.6670	1658	5.4223
120	12.525	1698.7	5.6008	120	13.7980	1692.8	5.547	120	15.0770	1688.8	5.4964
130	12.109	1725.8	5.6688	130	13.3160	1720.4	5.6163	130	14.5450	1714.9	5.5687
140	11.727	1752.6	5.7343	140	12.8850	1747.6	5.6828	140	14.0620	1742.5	5.6346
150	11.374	1779	5.7976	150	12.4890	1774.4	5.747	150	13.6190	1769.7	5.6998
160	11.047	1805.4	5.8591	160	12.1220	1801	5.8092	160	13.2110	1796.7	5.7627
170	10.742	1831.6	5.9189	170	11.7820	1827.5	5.8697	170	12.8320	1823.5	5.8239
180	10.457	1857.7	5.9772	180	11.4630	1853.9	5.9286	180	12.4800	1850.1	5.8833
190	10.190	1883.8	6.0342	190	11.1650	1880.3	5.9861	190	12.1500	1876.7	5.9413
200	9.9377	1909.9	6.09	200	10.8850	1906.6	6.0423	200	11.8400	1903.3	5.998
210	9.6999	1936.1	6.1447	210	10.6210	1933	6.0975	210	11.5490	1929.8	6.0536
ضبط ٢.٠ ميغاباسكال (تشيع ٥٠٠.٠ °م)				ضبط ٢.٠ ميغاباسكال (تشيع ٥٠٠.٠ °م)				ضبط ٢.٠ ميغاباسكال (تشيع ٥٠٠.٠ °م)			
فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كجم/م ^٣	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كجم/م ^٣	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كجم/م ^٣
sat.L	540.05	506.74	1.9954	sat.L	534.59	522.11	2.0399	sat.L	521.52	558.1	2.1423
sat.V	22.025	1488.1	4.9166	sat.V	23.711	1486.7	4.8863	sat.V	28.045	1482.1	4.8161
70	20.930	1517.7	5.0035	70	22.9570	1505.2	4.9405	80	26.4030	1516.5	4.9146
80	19.690	1554.8	5.1102	80	21.4930	1544.5	5.0534	90	24.7060	1556.5	5.0265
90	18.672	1588.8	5.2053	90	20.3150	1580	5.1526	100	23.3420	1592.8	5.125
100	17.807	1620.8	5.2921	100	19.3290	1613	5.2424	110	22.2020	1628.5	5.2142
110	17.056	1651.3	5.3727	110	18.4790	1644.4	5.3253	120	21.2210	1658.5	5.2967
120	16.392	1680.7	5.4485	120	17.7340	1674.5	5.4029	130	20.3820	1689.2	5.3739
130	15.796	1709.3	5.5205	130	17.0700	1703.7	5.4763	140	19.5980	1719	5.4469
140	15.257	1737.4	5.5892	140	16.4720	1732.2	5.5462	150	18.9090	1748.1	5.5165
150	14.765	1765	5.6553	150	15.9280	1760.3	5.6132	160	18.2840	1776.7	5.5832
160	14.313	1792.3	5.7191	160	15.4290	1787.9	5.6778	170	17.7120	1804.9	5.6476
170	13.895	1819.4	5.7809	170	14.9700	1815.3	5.7403	180	17.1850	1832.8	5.7058
180	13.506	1846.3	5.8409	180	14.5430	1842.5	5.801	190	16.6960	1860.4	5.7702
190	13.144	1873.1	5.8995	190	14.1470	1869.5	5.86	200	16.2410	1888	5.829
200	12.804	1899.9	5.9566	200	13.7760	1896.5	5.9176	210	15.8170	1915.4	5.8864
210	12.485	1926.6	6.0125	210	13.4270	1923.4	5.974	220	15.4180	1942.8	5.9424
220	12.184	1953.4	6.0673	220	13.1000	1950.4	6.0291	230	15.0430	1970.1	5.9973
ضبط ٢.٠ ميغاباسكال (تشيع ٥٠٠.٠ °م)				ضبط ٢.٠ ميغاباسكال (تشيع ٥٠٠.٠ °م)				ضبط ٢.٠ ميغاباسكال (تشيع ٥٠٠.٠ °م)			
فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كجم/م ^٣	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كجم/م ^٣	فتردي	ثلاثي	كحول/كجم	كجم/م ^٣
sat.L	509.11	581.32	2.2348	sat.L	497.13	622.43	2.3198	sat.L	485.45	651.92	2.399
sat.V	32.566	1476.2	4.7518	sat.V	37.302	1469.2	4.6917	sat.V	42.282	1461.2	4.6344
80	32.083	1484.4	4.7752	90	35.1880	1501.6	4.7818	90	41.7450	1468	4.6531
90	29.596	1530.7	4.9044	100	32.5290	1547.2	4.9057	100	37.9340	1521.1	4.7974
100	27.711	1570.9	5.0139	110	30.5030	1587.4	5.0119	110	36.2080	1565.7	4.9156
110	26.192	1607.6	5.1107	120	28.8580	1624.1	5.1066	120	33.0830	1605.5	5.0181
120	24.918	1641.7	5.1988	130	27.4730	1658.5	5.193	130	31.3410	1642.2	5.1102
130	23.822	1674.2	5.2803	140	26.2790	1691.3	5.2733	140	29.8680	1678.7	5.1947
140	22.881	1706.4	5.3567	150	25.2300	1722.8	5.3487	150	28.5810	1709.8	5.2735
150	22.006	1735.7	5.4291	160	24.2950	1753.5	5.4202	160	27.4670	1741.4	5.3477
160	21.237	1765.2	5.4982	170	23.4530	1783.4	5.4885	170	26.4630	1772.3	5.4182
170	20.538	1794.2	5.5644	180	22.6970	1812.8	5.5542	180	25.5580	1802.5	5.4857
180	19.898	1822.9	5.6283	190	21.9860	1841.8	5.6175	190	24.7330	1832.3	5.5506
190	19.308	1851.2	5.6902	200	21.3400	1870.5	5.6788	200	23.9780	1861.6	5.6133
200	18.782	1879.3	5.7502	210	20.7410	1899	5.7384	210	23.2810	1890.7	5.6741
210	18.254	1907.3	5.8086	220	20.1840	1927.3	5.7965	220	22.6350	1919.6	5.7331
220	17.779	1935.1	5.8657	230	19.6630	1955.6	5.8531	230	22.0330	1948.2	5.7907
230	17.334	1962.9	5.9214	240	19.1750	1983.7	5.9085	240	21.4710	1976.7	5.8489



ملحق ب: خواص الهواء الرطب

جدول ب-۱ خواص الهواء الرطب عند ضغط جوي ۱۰۱.۳۲۵ كيلوباسكال [ASHRAE 2009]

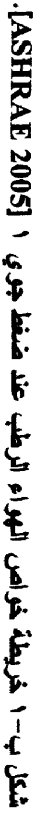
[illegible]

مخازن التبريد

٤٤٤

جدول ب-١ خواص الهواء الرطب عند ضغط جوي ١.٠١٣٢٥ كيلوباسكال [ASHRAE 2009]

درجة الحرارة °م	نسبة الرطوبة حجم ماله هواء W _g	القيم القياسية للهواء الجاف			القيم القياسية للهواء الرطب			القيم القياسية للهواء الرطب		درجة الحرارة °م
		ρ_{da}	ρ_{sa}	ρ_g	ρ_{da}	ρ_{sa}	ρ_g	ρ_{da}	ρ_g	
15	0.010694	0.8159	0.0140	0.8299	15.087	27.028	42.115	0.0538	0.1525	15
16	0.011415	0.8188	0.0150	0.8338	16.093	28.873	44.966	0.0573	0.1624	16
17	0.012181	0.8216	0.0160	0.8377	17.099	30.830	47.929	0.0607	0.1726	17
18	0.012991	0.8245	0.0172	0.8416	18.105	32.906	51.011	0.0642	0.1832	18
19	0.013851	0.8273	0.0184	0.8457	19.111	35.107	54.289	0.0676	0.1942	19
20	0.014761	0.8301	0.0196	0.8498	20.117	37.441	57.558	0.0711	0.2057	20
21	0.015724	0.8330	0.0210	0.8540	21.124	39.914	61.037	0.0745	0.2175	21
22	0.016744	0.8358	0.0224	0.8583	22.130	42.533	64.663	0.0779	0.2298	22
23	0.017823	0.8387	0.0240	0.8626	23.136	45.308	68.444	0.0813	0.2426	23
24	0.018965	0.8415	0.0256	0.8671	24.142	48.245	72.388	0.0847	0.2560	24
25	0.020173	0.8443	0.0273	0.8716	25.148	51.355	76.503	0.0881	0.2698	25
26	0.021451	0.8472	0.0291	0.8763	26.155	54.646	80.801	0.0915	0.2842	26
27	0.022802	0.8500	0.0311	0.8811	27.161	58.128	85.289	0.0949	0.2992	27
28	0.024229	0.8529	0.0331	0.8860	28.167	61.812	89.979	0.0982	0.3148	28
29	0.025738	0.8557	0.0353	0.8910	29.174	65.708	94.882	0.1015	0.3311	29
30	0.027333	0.8585	0.0376	0.8961	30.180	69.829	100.009	0.1048	0.3481	30
31	0.029018	0.8614	0.0400	0.9014	31.187	74.185	105.372	0.1081	0.3658	31
32	0.030797	0.8642	0.0426	0.9069	32.193	78.791	110.985	0.1115	0.3843	32
33	0.032677	0.8671	0.0454	0.9124	33.200	83.660	116.860	0.1147	0.4035	33
34	0.034663	0.8699	0.0483	0.9182	34.207	88.806	123.013	0.1180	0.4236	34
35	0.036760	0.8727	0.0514	0.9241	35.213	94.245	129.458	0.1213	0.4447	35
36	0.038975	0.8756	0.0547	0.9302	36.220	99.993	136.213	0.1246	0.4666	36
37	0.041313	0.8784	0.0581	0.9365	37.227	106.068	143.294	0.1278	0.4895	37
38	0.043783	0.8813	0.0618	0.9430	38.233	112.487	150.720	0.1311	0.5135	38
39	0.046391	0.8841	0.0657	0.9498	39.240	119.270	158.510	0.1343	0.5386	39
40	0.049145	0.8869	0.0698	0.9567	40.247	126.438	166.685	0.1375	0.5649	40
41	0.052053	0.8898	0.0741	0.9639	41.254	134.014	175.268	0.1407	0.5923	41
42	0.055124	0.8926	0.0788	0.9714	42.261	142.021	184.282	0.1439	0.6211	42
43	0.058368	0.8955	0.0837	0.9791	43.268	150.483	193.751	0.1471	0.6512	43
44	0.061795	0.8983	0.0888	0.9871	44.275	159.429	203.704	0.1503	0.6828	44
45	0.065416	0.9011	0.0943	0.9955	45.282	168.887	214.169	0.1535	0.7159	45
46	0.069242	0.9040	0.1002	1.0041	46.289	178.889	225.178	0.1566	0.7507	46
47	0.073286	0.9068	0.1063	1.0131	47.297	189.466	236.763	0.1598	0.7871	47
48	0.077561	0.9096	0.1129	1.0225	48.304	200.656	248.960	0.1629	0.8254	48
49	0.082081	0.9125	0.1198	1.0323	49.311	212.497	261.808	0.1660	0.8655	49
50	0.086863	0.9153	0.1272	1.0425	50.319	225.030	275.349	0.1692	0.9078	50
51	0.091922	0.9182	0.1350	1.0531	51.326	238.300	289.627	0.1723	0.9522	51
52	0.097278	0.9210	0.1433	1.0643	52.334	252.357	304.690	0.1754	0.9989	52
53	0.102949	0.9238	0.1521	1.0759	53.341	267.251	320.592	0.1785	1.0481	53
54	0.108958	0.9267	0.1614	1.0881	54.349	283.041	337.389	0.1816	1.0999	54
55	0.115326	0.9295	0.1714	1.1009	55.356	299.788	355.144	0.1846	1.1545	55
56	0.122080	0.9324	0.1819	1.1143	56.364	317.560	373.924	0.1877	1.2121	56
57	0.129248	0.9352	0.1932	1.1284	57.372	336.431	393.803	0.1908	1.2729	57
58	0.136858	0.9380	0.2051	1.1432	58.380	356.482	414.862	0.1938	1.3371	58
59	0.144945	0.9409	0.2179	1.1587	59.388	377.800	437.188	0.1968	1.4050	59
60	0.153545	0.9437	0.2315	1.1752	60.396	400.484	460.880	0.1999	1.4769	60
61	0.162697	0.9465	0.2460	1.1925	61.404	424.641	486.044	0.2029	1.5530	61
62	0.172446	0.9494	0.2615	1.2108	62.412	450.388	512.799	0.2059	1.6337	62
63	0.182842	0.9522	0.2780	1.2302	63.420	477.856	541.276	0.2089	1.7194	63
64	0.193937	0.9551	0.2957	1.2508	64.428	507.192	571.620	0.2119	1.8105	64
65	0.205794	0.9579	0.3147	1.2726	65.436	538.557	603.993	0.2149	1.9074	65
66	0.218478	0.9607	0.3350	1.2957	66.445	572.131	638.576	0.2179	2.0107	66
67	0.232067	0.9636	0.3568	1.3204	67.453	608.118	675.572	0.2208	2.1209	67
68	0.246645	0.9664	0.3803	1.3467	68.462	646.746	715.208	0.2238	2.2386	68
69	0.262309	0.9692	0.4056	1.3748	69.470	688.271	757.741	0.2268	2.3646	69
70	0.279167	0.9721	0.4328	1.4049	70.479	732.985	803.464	0.2297	2.4997	70
71	0.297343	0.9749	0.4622	1.4372	71.488	781.220	852.707	0.2326	2.6449	71
72	0.316979	0.9778	0.4940	1.4719	72.496	833.353	905.850	0.2356	2.8011	72
73	0.338237	0.9806	0.5287	1.5093	73.505	889.821	963.326	0.2385	2.9697	73
74	0.361304	0.9834	0.5663	1.5497	74.514	951.124	1025.638	0.2414	3.1520	74
75	0.386399	0.9863	0.6072	1.5935	75.523	1017.843	1093.367	0.2443	3.3496	75
76	0.413774	0.9891	0.6520	1.6411	76.532	1090.659	1167.191	0.2472	3.5645	76
77	0.443727	0.9919	0.7010	1.6930	77.542	1170.366	1247.907	0.2501	3.7989	77
78	0.476470	0.9948	0.7540	1.7497	78.551	1257.907	1336.458	0.2529	4.0553	78
79	0.512842	0.9976	0.8145	1.8121	79.560	1354.462	1433.962	0.2558	4.3371	79
80	0.552926	1.0005	0.8805	1.8809	80.569	1461.196	1541.765	0.2587	4.6478	80
81	0.597470	1.0033	0.9539	1.9572	81.579	1579.917	1661.496	0.2615	4.9920	81
82	0.647218	1.0061	1.0360	2.0421	82.589	1712.556	1795.145	0.2644	5.3754	82
83	0.703899	1.0090	1.1283	2.1373	83.598	1861.573	1945.171	0.2672	5.8047	83
84	0.766233	1.0118	1.2328	2.2446	84.608	2030.041	2114.649	0.2701	6.2885	84
85	0.838105	1.0146	1.3519	2.3665	85.618	2221.858	2307.476	0.2729	6.8376	85
86	0.920580	1.0175	1.4887	2.5062	86.628	2442.035	2528.662	0.2757	7.4660	86
87	1.016105	1.0203	1.6473	2.6676	87.638	2697.127	2784.764	0.2786	8.1919	87
88	1.127952	1.0232	1.8332	2.8564	88.648	2995.860	3084.528	0.2813	9.0596	88
89	1.260579	1.0260	2.0539	3.0799	89.658	3350.228	3439.885	0.2841	10.0421	89
90	1.420235	1.0288	2.3198	3.3487	90.668	3776.888	3867.556	0.2869	11.2458	90



جدول ج-١ الخواص التيرموديناميكية للماء عند التسليم [ASHRAE 2009]

درجة الحرارة °C t	ضغط التشبع kPa P _{sat}	المجموع الفيزيائي			الانصهار			التبخير		
		سائل kg/m ³ ρ _f	غاز kg/m ³ ρ _g	حرارة kJ/kg h _{fg}	سائل kg/m ³ ρ _f	غاز kg/m ³ ρ _g	حرارة kJ/kg h _{fg}	سائل kg/m ³ ρ _f	غاز kg/m ³ ρ _g	حرارة kJ/kg h _{fg}
-60	0.00108	90971.58	90971.58	-446.12	2836.27	2390.14	-1.6842	13.3064	11.6222	-60
-59	0.00124	79885.31	79885.31	-444.46	2836.45	2391.99	-1.6764	13.2452	11.5687	-59
-58	0.00141	70235.77	70235.77	-442.79	2836.63	2393.85	-1.6687	13.1845	11.5158	-58
-57	0.00161	61826.23	61826.24	-441.11	2836.81	2395.70	-1.6609	13.1243	11.4634	-57
-56	0.00184	54488.28	54488.28	-439.42	2836.97	2397.55	-1.6531	13.0646	11.4115	-56
-55	0.00209	48077.54	48077.54	-437.73	2837.13	2399.40	-1.6453	13.0054	11.3601	-55
-54	0.00238	42470.11	42470.11	-436.03	2837.28	2401.25	-1.6375	12.9468	11.3092	-54
-53	0.00271	37559.49	37559.50	-434.32	2837.42	2403.10	-1.6298	12.8886	11.2589	-53
-52	0.00307	33254.07	33254.07	-432.61	2837.56	2404.95	-1.6220	12.8310	11.2090	-52
-51	0.00348	29474.87	29474.87	-430.88	2837.69	2406.81	-1.6142	12.7738	11.1596	-51
-50	0.00394	26153.80	26153.80	-429.16	2837.81	2408.66	-1.6065	12.7171	11.1106	-50
-49	0.00445	23232.04	23232.04	-427.42	2837.93	2410.51	-1.5987	12.6609	11.0622	-49
-48	0.00503	20658.70	20658.70	-425.68	2838.04	2412.36	-1.5909	12.6051	11.0142	-48
-47	0.00568	18389.75	18389.75	-423.93	2838.14	2414.21	-1.5832	12.5498	10.9666	-47
-46	0.00640	16387.03	16387.03	-422.17	2838.23	2416.06	-1.5754	12.4950	10.9196	-46
-45	0.00720	14617.39	14617.39	-420.40	2838.32	2417.91	-1.5677	12.4406	10.8729	-45
-44	0.00810	13052.07	13052.07	-418.63	2838.39	2419.76	-1.5599	12.3867	10.8267	-44
-43	0.00910	11666.02	11666.02	-416.85	2838.47	2421.62	-1.5522	12.3331	10.7810	-43
-42	0.01022	10437.46	10437.46	-415.06	2838.53	2423.47	-1.5444	12.2801	10.7356	-42
-41	0.01146	9347.38	9347.38	-413.27	2838.59	2425.32	-1.5367	12.2274	10.6907	-41
-40	0.01284	8379.20	8379.20	-411.47	2838.64	2427.17	-1.5289	12.1752	10.6462	-40
-39	0.01437	7518.44	7518.44	-409.66	2838.68	2429.02	-1.5212	12.1234	10.6022	-39
-38	0.01607	6752.43	6752.43	-407.85	2838.72	2430.87	-1.5135	12.0720	10.5585	-38
-37	0.01795	6070.08	6070.08	-406.02	2838.74	2432.72	-1.5057	12.0210	10.5152	-37
-36	0.02004	5461.68	5461.68	-404.19	2838.76	2434.57	-1.4980	11.9704	10.4724	-36
-35	0.02234	4918.69	4918.69	-402.36	2838.78	2436.42	-1.4903	11.9202	10.4299	-35
-34	0.02489	4433.64	4433.64	-400.51	2838.78	2438.27	-1.4825	11.8703	10.3878	-34
-33	0.02771	3999.95	3999.95	-398.66	2838.78	2440.12	-1.4748	11.8209	10.3461	-33
-32	0.03081	3611.82	3611.82	-396.80	2838.77	2441.97	-1.4671	11.7718	10.3047	-32
-31	0.03423	3264.15	3264.15	-394.94	2838.75	2443.82	-1.4594	11.7231	10.2638	-31
-30	0.03801	2952.46	2952.46	-393.06	2838.73	2445.67	-1.4516	11.6748	10.2232	-30
-29	0.04215	2672.77	2672.77	-391.18	2838.70	2447.51	-1.4439	11.6269	10.1830	-29
-28	0.04672	2421.58	2421.58	-389.29	2838.66	2449.36	-1.4362	11.5793	10.1431	-28
-27	0.05173	2195.80	2195.80	-387.40	2838.61	2451.21	-1.4285	11.5321	10.1036	-27
-26	0.05724	1992.68	1992.68	-385.50	2838.56	2453.06	-1.4208	11.4852	10.0644	-26
-25	0.06327	1809.79	1809.79	-383.59	2838.49	2454.91	-1.4131	11.4386	10.0256	-25
-24	0.06989	1644.99	1644.99	-381.67	2838.42	2456.75	-1.4054	11.3925	9.9871	-24
-23	0.07714	1496.36	1496.36	-379.75	2838.35	2458.60	-1.3977	11.3466	9.9489	-23
-22	0.08508	1362.21	1362.21	-377.81	2838.26	2460.45	-1.3899	11.3011	9.9111	-22
-21	0.09376	1241.03	1241.03	-375.88	2838.17	2462.29	-1.3822	11.2559	9.8736	-21
-20	0.10324	1131.49	1131.49	-373.93	2838.07	2464.14	-1.3745	11.2110	9.8365	-20
-19	0.11360	1032.38	1032.38	-371.98	2837.96	2465.98	-1.3668	11.1665	9.7996	-19
-18	0.12490	942.64	942.65	-370.01	2837.84	2467.83	-1.3591	11.1223	9.7631	-18
-17	0.13722	861.34	861.34	-368.05	2837.72	2469.67	-1.3514	11.0784	9.7269	-17
-16	0.15065	787.61	787.61	-366.07	2837.59	2471.51	-1.3437	11.0348	9.6910	-16
-15	0.16527	720.70	720.70	-364.09	2837.45	2473.36	-1.3360	10.9915	9.6554	-15
-14	0.18119	659.94	659.94	-362.10	2837.30	2475.20	-1.3284	10.9485	9.6201	-14
-13	0.19849	604.72	604.73	-360.10	2837.14	2477.04	-1.3207	10.9058	9.5851	-13
-12	0.21729	554.51	554.51	-358.10	2836.98	2478.88	-1.3130	10.8634	9.5504	-12
-11	0.23771	508.81	508.81	-356.08	2836.80	2480.72	-1.3053	10.8213	9.5160	-11
-10	0.25987	467.19	467.19	-354.06	2836.62	2482.56	-1.2976	10.7795	9.4819	-10
-9	0.28391	429.25	429.26	-352.04	2836.44	2484.40	-1.2899	10.7380	9.4481	-9
-8	0.30995	394.66	394.66	-350.00	2836.24	2486.23	-1.2822	10.6967	9.4145	-8
-7	0.33817	363.09	363.09	-347.96	2836.03	2488.07	-1.2745	10.6558	9.3812	-7
-6	0.36871	334.26	334.26	-345.91	2835.82	2489.91	-1.2668	10.6151	9.3482	-6
-5	0.40174	307.92	307.92	-343.86	2835.60	2491.74	-1.2592	10.5747	9.3155	-5
-4	0.43745	283.83	283.83	-341.79	2835.37	2493.57	-1.2515	10.5345	9.2830	-4
-3	0.47604	261.78	261.78	-339.72	2835.13	2495.41	-1.2438	10.4946	9.2508	-3
-2	0.51770	241.60	241.60	-337.64	2834.88	2497.24	-1.2361	10.4550	9.2189	-2
1	0.56266	223.10	223.11	-335.56	2834.63	2499.07	-1.2284	10.4157	9.1872	-1
0	0.61115	206.15	206.15	-333.47	2834.36	2500.90	-1.2208	10.3766	9.1558	0

جدول ج-١ الخواص الثيرموديناميكية للماء عند التشبع [ASHRAE 2009] تابع.

درجة الحرارة		الانثاليبي لجول/كجم			الانثاليبي لجول/كجم			الانثاليبي لجول/كجم			الانثاليبي لجول/كجم			الانثاليبي لجول/كجم		
°C	t	°C	t	°C	t	°C	t	°C	t	°C	t	°C	t	°C	t	
°C	t	°C	t	°C	t	°C	t	°C	t	°C	t	°C	t	°C	t	
0	0.6112	0.001000	206.139	206.140	-0.04	2500.93	2500.89	-0.0002	9.1559	9.1558	0					
1	0.6571	0.001000	192.444	192.445	4.18	2498.55	2502.73	0.0153	9.1138	9.1291	1					
2	0.7060	0.001000	179.763	179.764	8.39	2496.17	2504.57	0.0306	9.0721	9.1027	2					
3	0.7581	0.001000	168.013	168.014	12.60	2493.80	2506.40	0.0459	9.0306	9.0763	3					
4	0.8135	0.001000	157.120	157.121	16.81	2491.42	2508.24	0.0611	8.9895	9.0506	4					
5	0.8726	0.001000	147.016	147.017	21.02	2489.05	2510.07	0.0763	8.9486	9.0249	5					
6	0.9354	0.001000	137.637	137.638	25.22	2486.68	2511.91	0.0913	8.9081	9.0994	6					
7	1.0021	0.001000	128.927	128.928	29.43	2484.31	2513.74	0.1064	8.8678	9.9742	7					
8	1.0730	0.001000	120.833	120.834	33.63	2481.94	2515.57	0.1213	8.8278	8.9492	8					
9	1.1483	0.001000	113.308	113.309	37.82	2479.58	2517.40	0.1362	8.7882	8.9244	9					
10	1.2282	0.001000	106.308	106.309	42.02	2477.21	2519.23	0.1511	8.7488	8.8998	10					
11	1.3129	0.001000	99.792	99.793	46.22	2474.84	2521.06	0.1659	8.7096	8.8755	11					
12	1.4028	0.001001	93.723	93.724	50.41	2472.48	2522.89	0.1806	8.6708	8.8514	12					
13	1.4981	0.001001	88.069	88.070	54.60	2470.11	2524.71	0.1953	8.6322	8.8275	13					
14	1.5989	0.001001	82.797	82.798	58.79	2467.75	2526.54	0.2099	8.5939	8.8038	14					
15	1.7057	0.001001	77.880	77.881	62.98	2465.38	2528.36	0.2245	8.5559	8.7804	15					
16	1.8188	0.001001	73.290	73.291	67.17	2463.01	2530.19	0.2390	8.5181	8.7571	16					
17	1.9383	0.001001	69.005	69.006	71.36	2460.65	2532.01	0.2534	8.4806	8.7341	17					
18	2.0647	0.001001	65.002	65.003	75.55	2458.28	2533.83	0.2678	8.4434	8.7112	18					
19	2.1982	0.001002	61.260	61.261	79.73	2455.92	2535.65	0.2822	8.4064	8.6886	19					
20	2.3392	0.001002	57.760	57.761	83.92	2453.55	2537.47	0.2965	8.3696	8.6661	20					
21	2.4881	0.001002	54.486	54.487	88.10	2451.18	2539.29	0.3108	8.3331	8.6439	21					
22	2.6452	0.001002	51.421	51.422	92.29	2448.81	2541.10	0.3250	8.2969	8.6218	22					
23	2.8109	0.001003	48.551	48.552	96.47	2446.45	2542.92	0.3391	8.2609	8.6000	23					
24	2.9856	0.001003	45.862	45.863	100.66	2444.08	2544.73	0.3532	8.2251	8.5783	24					
25	3.1697	0.001003	43.340	43.341	104.84	2441.71	2546.54	0.3673	8.1895	8.5568	25					
26	3.3637	0.001003	40.976	40.977	109.02	2439.33	2548.35	0.3813	8.1542	8.5355	26					
27	3.5679	0.001004	38.757	38.758	113.20	2436.96	2550.16	0.3952	8.1192	8.5144	27					
28	3.7828	0.001004	36.674	36.675	117.38	2434.59	2551.97	0.4091	8.0843	8.4934	28					
29	4.0089	0.001004	34.718	34.719	121.56	2432.21	2553.78	0.4230	8.0497	8.4727	29					
30	4.2467	0.001004	32.881	32.882	125.75	2429.84	2555.58	0.4368	8.0153	8.4521	30					
31	4.4966	0.001005	31.153	31.154	129.93	2427.46	2557.39	0.4506	7.9812	8.4317	31					
32	4.7592	0.001005	29.528	29.529	134.11	2425.08	2559.19	0.4643	7.9472	8.4115	32					
33	5.0351	0.001005	28.000	28.001	138.29	2422.70	2560.99	0.4780	7.9135	8.3914	33					
34	5.3247	0.001006	26.561	26.562	142.47	2420.32	2562.79	0.4916	7.8800	8.3715	34					
35	5.6286	0.001006	25.207	25.208	146.64	2417.94	2564.58	0.5052	7.8467	8.3518	35					
36	5.9475	0.001006	23.931	23.932	150.82	2415.56	2566.38	0.5187	7.8136	8.3323	36					
37	6.2818	0.001007	22.728	22.729	155.00	2413.17	2568.17	0.5322	7.7807	8.3129	37					
38	6.6324	0.001007	21.594	21.595	159.18	2410.78	2569.96	0.5457	7.7480	8.2936	38					
39	6.9997	0.001007	20.525	20.526	163.36	2408.39	2571.75	0.5591	7.7155	8.2746	39					
40	7.3844	0.001008	19.516	19.517	167.54	2406.00	2573.54	0.5724	7.6832	8.2557	40					
41	7.7873	0.001008	18.564	18.565	171.72	2403.61	2575.33	0.5858	7.6512	8.2369	41					
42	8.2090	0.001009	17.665	17.666	175.90	2401.21	2577.11	0.5990	7.6193	8.2183	42					
43	8.6503	0.001009	16.815	16.816	180.08	2398.82	2578.89	0.6123	7.5876	8.1999	43					
44	9.1118	0.001009	16.012	16.013	184.26	2396.42	2580.67	0.6255	7.5561	8.1816	44					
45	9.5944	0.001010	15.252	15.253	188.44	2394.02	2582.45	0.6386	7.5248	8.1634	45					
46	10.0988	0.001010	14.534	14.535	192.62	2391.61	2584.23	0.6517	7.4937	8.1454	46					
47	10.6259	0.001011	13.855	13.856	196.80	2389.21	2586.00	0.6648	7.4628	8.1276	47					
48	11.1764	0.001011	13.212	13.213	200.98	2386.80	2587.77	0.6778	7.4320	8.1099	48					
49	11.7512	0.001012	12.603	12.604	205.16	2384.39	2589.54	0.6908	7.4015	8.0923	49					
50	12.3513	0.001012	12.027	12.028	209.34	2381.97	2591.31	0.7038	7.3711	8.0749	50					
51	12.9774	0.001013	11.481	11.482	213.52	2379.56	2593.08	0.7167	7.3409	8.0576	51					
52	13.6305	0.001013	10.963	10.964	217.70	2377.14	2594.84	0.7296	7.3109	8.0405	52					
53	14.3116	0.001014	10.472	10.473	221.88	2374.72	2596.60	0.7424	7.2811	8.0235	53					
54	15.0215	0.001014	10.006	10.007	226.06	2372.30	2598.35	0.7552	7.2514	8.0066	54					
55	15.7614	0.001015	9.5639	9.5640	230.24	2369.87	2600.11	0.7680	7.2219	7.9899	55					
56	16.5322	0.001015	9.1444	9.1454	234.42	2367.44	2601.86	0.7807	7.1926	7.9733	56					
57	17.3350	0.001016	8.7461	8.7471	238.61	2365.01	2603.61	0.7934	7.1634	7.9568	57					
58	18.1708	0.001016	8.3678	8.3688	242.79	2362.57	2605.36	0.8060	7.1344	7.9405	58					
59	19.0407	0.001017	8.0083	8.0093	246.97	2360.13	2607.10	0.8186	7.1056	7.9243	59					
60	19.9458	0.001017	7.6666	7.6677	251.15	2357.69	2608.85	0.8312	7.0770	7.9082	60					
61	20.8873	0.001018	7.3418	7.3428	255.34	2355.24	2610.58	0.8438	7.0485	7.8922	61					
62	21.8664	0.001018	7.0328	7.0338	259.52	2352.80	2612.32	0.8563	7.0201	7.8764	62					
63	22.8842	0.001019	6.7399	6.7399	263.71	2350.35	2614.05	0.8687	6.9919	7.8607	63					
64	23.9421	0.001019	6.4591	6.4601	267.89	2347.89	2615.78	0.8811	6.9639	7.8451	64					
65	25.0411	0.001020	6.1928	6.1938	272.08	2345.43	2617.51	0.8935	6.9361	7.8296	65					
66	26.1827	0.001020	5.9392	5.9402	276.27	2342.97	2619.23	0.9059	6.9083	7.8142	66					
67	27.3680	0.001021	5.6976	5.6986	280.45	2340.50	2620.96	0.9182	6.8808	7.7990	67					
68	28.5986	0.001022	5.4674	5.4684	284.64	2338.03	2622.67	0.9305	6.8534	7.7839	68					
69	29.8756	0.001022	5.2479	5.2490	288.83	2335.56	2624.39	0.9428	6.8261	7.7689	69					

جدول ج-١ الخواص التيرموديناميكية للماء عند التشبع [ASHRAE 2009] انتهى.

درجة الحرارة		التشبع عند معدل بخار			التشبع عند معدل بخار			التشبع عند معدل بخار			التشبع عند معدل بخار			درجة الحرارة	
°C	t	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	°C	t	
°C	t	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	الضغط	°C	t	
70	31.2006	0.001023	5.0387	5.0397	293.02	2333.08	2626.10	0.9550	6.7990	7.7540	70	70			
71	32.3750	0.001023	4.8302	4.8402	297.21	2330.60	2627.81	0.9672	6.7720	7.7392	71	71			
72	34.0001	0.001024	4.6488	4.6498	301.40	2328.11	2629.51	0.9793	6.7452	7.7245	72	72			
73	35.4775	0.001025	4.4671	4.4681	305.59	2325.62	2631.21	0.9915	6.7185	7.7100	73	73			
74	37.0088	0.001025	4.2937	4.2947	309.78	2323.13	2632.91	1.0035	6.6920	7.6955	74	74			
75	38.5954	0.001026	4.1281	4.1291	313.97	2320.63	2634.60	1.0156	6.6656	7.6812	75	75			
76	40.2389	0.001026	3.9699	3.9709	318.17	2318.13	2636.29	1.0276	6.6393	7.6669	76	76			
77	41.9409	0.001027	3.8188	3.8198	322.36	2315.62	2637.98	1.0396	6.6132	7.6528	77	77			
78	43.7031	0.001028	3.6754	3.6764	326.56	2313.11	2639.66	1.0516	6.5872	7.6388	78	78			
79	45.5271	0.001028	3.5363	3.5373	330.75	2310.59	2641.34	1.0635	6.5613	7.6248	79	79			
80	47.4147	0.001029	3.4042	3.4053	334.95	2308.07	2643.01	1.0754	6.5356	7.6110	80	80			
81	49.3676	0.001030	3.2780	3.2790	339.15	2305.54	2644.68	1.0873	6.5100	7.5973	81	81			
82	51.3875	0.001030	3.1572	3.1582	343.34	2303.01	2646.35	1.0991	6.4846	7.5837	82	82			
83	53.4762	0.001031	3.0415	3.0425	347.54	2300.47	2648.01	1.1109	6.4592	7.5701	83	83			
84	55.6355	0.001032	2.9309	2.9319	351.74	2297.93	2649.67	1.1227	6.4340	7.5567	84	84			
85	57.8675	0.001032	2.8249	2.8259	355.95	2295.38	2651.33	1.1344	6.4090	7.5434	85	85			
86	60.1738	0.001033	2.7234	2.7244	360.15	2292.83	2652.98	1.1461	6.3840	7.5301	86	86			
87	62.5565	0.001034	2.6262	2.6272	364.35	2290.27	2654.62	1.1578	6.3592	7.5170	87	87			
88	65.0174	0.001035	2.5330	2.5341	368.56	2287.70	2656.26	1.1694	6.3345	7.5039	88	88			
89	67.5587	0.001035	2.4437	2.4448	372.76	2285.14	2657.90	1.1811	6.3099	7.4909	89	89			
90	70.1824	0.001036	2.3581	2.3591	376.97	2282.57	2659.53	1.1927	6.2854	7.4781	90	90			
91	72.8904	0.001037	2.2760	2.2771	381.18	2279.98	2661.16	1.2042	6.2611	7.4653	91	91			
92	75.6849	0.001037	2.1973	2.1983	385.38	2277.38	2662.78	1.2157	6.2368	7.4526	92	92			
93	78.5681	0.001038	2.1217	2.1228	389.59	2274.78	2664.39	1.2273	6.2127	7.4400	93	93			
94	81.5420	0.001039	2.0492	2.0502	393.81	2272.17	2666.01	1.2387	6.1887	7.4275	94	94			
95	84.6089	0.001040	1.9796	1.9806	398.02	2269.56	2667.61	1.2502	6.1648	7.4150	95	95			
96	87.7711	0.001040	1.9128	1.9138	402.23	2266.94	2669.22	1.2616	6.1411	7.4027	96	96			
97	91.0308	0.001041	1.8486	1.8497	406.45	2264.31	2670.81	1.2730	6.1174	7.3904	97	97			
98	94.3902	0.001042	1.7870	1.7880	410.66	2261.67	2672.40	1.2844	6.0938	7.3782	98	98			
99	97.8518	0.001043	1.7277	1.7288	414.88	2259.01	2673.99	1.2957	6.0704	7.3661	99	99			
100	101.4180	0.001043	1.6708	1.6719	419.10	2256.47	2675.57	1.3070	6.0471	7.3541	100	100			
101	105.0910	0.001044	1.6161	1.6171	423.32	2253.83	2677.15	1.3183	6.0238	7.3421	101	101			
102	108.8735	0.001045	1.5635	1.5645	427.54	2251.18	2678.72	1.3296	6.0007	7.3303	102	102			
103	112.7678	0.001046	1.5129	1.5140	431.76	2248.52	2680.28	1.3408	5.9777	7.3185	103	103			
104	116.7765	0.001047	1.4642	1.4653	435.99	2245.85	2681.84	1.3520	5.9548	7.3068	104	104			
105	120.9021	0.001047	1.4174	1.4185	440.21	2243.17	2683.39	1.3632	5.9320	7.2951	105	105			
106	125.1472	0.001048	1.3724	1.3734	444.44	2240.50	2684.94	1.3743	5.9092	7.2836	106	106			
107	129.5145	0.001049	1.3290	1.3301	448.67	2237.81	2686.48	1.3854	5.8866	7.2721	107	107			
108	134.0065	0.001050	1.2873	1.2883	452.90	2235.12	2688.02	1.3965	5.8641	7.2607	108	108			
109	138.6261	0.001051	1.2471	1.2481	457.13	2232.41	2689.55	1.4076	5.8417	7.2493	109	109			
110	143.3760	0.001052	1.2083	1.2094	461.36	2229.70	2691.07	1.4187	5.8194	7.2380	110	110			
111	148.2588	0.001052	1.1710	1.1721	465.60	2226.99	2692.58	1.4297	5.7972	7.2268	111	111			
112	153.2775	0.001053	1.1351	1.1362	469.83	2224.26	2694.09	1.4407	5.7750	7.2157	112	112			
113	158.4348	0.001054	1.1005	1.1015	474.07	2221.53	2695.60	1.4517	5.7530	7.2047	113	113			
114	163.7337	0.001055	1.0671	1.0681	478.31	2218.78	2697.09	1.4626	5.7310	7.1937	114	114			
115	169.1770	0.001056	1.0349	1.0359	482.55	2216.03	2698.58	1.4735	5.7092	7.1827	115	115			
116	174.7678	0.001057	1.0038	1.0049	486.80	2213.27	2700.07	1.4844	5.6874	7.1719	116	116			
117	180.5090	0.001058	0.9739	0.9750	491.04	2210.51	2701.55	1.4953	5.6658	7.1611	117	117			
118	186.4036	0.001059	0.9450	0.9461	495.29	2207.73	2703.02	1.5062	5.6442	7.1504	118	118			
119	192.4547	0.001059	0.9171	0.9182	499.53	2204.94	2704.48	1.5170	5.6227	7.1397	119	119			
120	198.6654	0.001060	0.8902	0.8913	503.78	2202.15	2705.93	1.5278	5.6013	7.1291	120	120			
121	205.0410	0.001061	0.8643	0.8654	508.02	2199.35	2707.38	1.5385	5.5800	7.1185	121	121			
122	211.5782	0.001062	0.8392	0.8403	512.26	2196.53	2708.82	1.5494	5.5587	7.1081	122	122			
123	218.2816	0.001063	0.8146	0.8157	516.50	2193.69	2710.25	1.5603	5.5375	7.0977	123	123			
124	225.1676	0.001064	0.7914	0.7925	520.74	2190.83	2711.69	1.5712	5.5165	7.0873	124	124			
125	232.2497	0.001065	0.7694	0.7705	525.00	2187.95	2713.12	1.5821	5.4956	7.0769	125	125			
126	239.4597	0.001066	0.7486	0.7497	529.26	2185.05	2714.54	1.5930	5.4748	7.0665	126	126			
127	246.8013	0.001067	0.7289	0.7300	533.53	2182.13	2715.95	1.6039	5.4541	7.0561	127	127			
128	254.2813	0.001068	0.7103	0.7114	537.81	2179.19	2717.36	1.6148	5.4334	7.0456	128	128			
129	261.9054	0.001069	0.6928	0.6939	542.10	2176.23	2718.76	1.6257	5.4128	7.0351	129	129			
130	270.5996	0.001070	0.6764	0.6775	546.39	2173.25	2720.15	1.6366	5.3921	7.0246	130	130			
131	279.4700	0.001071	0.6610	0.6621	550.69	2170.25	2721.53	1.6475	5.3715	7.0141	131	131			
132	288.5226	0.001072	0.6466	0.6477	554.99	2167.23	2722.91	1.6584	5.3510	7.0036	132	132			
133	297.7634	0.001073	0.6332	0.6343	559.29	2164.19	2724.28	1.6693	5.3305	6.9931	133	133			
134	307.1989	0.001074	0.6207	0.6218	563.59	2161.13	2725.64	1.6802	5.3100	6.9826	134	134			
135	316.8347	0.001075	0.6091	0.6102	567.89	2158.05	2726.99	1.6911	5.2895	6.9721	135	135			
136	322.4175	0.001076	0.6000	0.6011	572.05	2155.00	2728.34	1.7020	5.2690	6.9616	136	136			
137	328.0513	0.001077	0.5923	0.5934	576.21	2152.00	2729.68	1.7129	5.2485	6.9511	137	137			
138	334.5081	0.001078	0.5853	0.5864	580.26	2149.00	2731.01	1.7238	5.2280	6.9406	138	138			
139	341.5010	0.001079	0.5788	0.5799	584.21	2146.00	2732.34	1.7347	5.2075	6.9301	139	139			
140	348.5010	0.001080	0.5728	0.5739	588.06	2143.00	2733.66	1.7456	5.1870	6.9196	140	140			
141	355.5010	0.001081	0.5673	0.5684	591.81	2140.00	2734.98	1.7565	5.1665	6.9091	141	141			
142	362.4271	0.001082	0.5623	0.5634	595.46	2137.00	2736.29	1.7674	5.1460	6.8986	142	142			
143	369.2816	0.001083	0.5578	0.5589	599.01	2134.00	2737.59	1.7783	5.1255	6.8881	143	143			
144	376.0676	0.001084	0.5538	0.5549	602.46	2131.00	2738.89	1.7892	5.1050	6.8776	144	144			
145	382.7881	0.001085	0.5503	0.5514	605.81	2128.00	2740.18	1.7999	5.0845	6.8671	145	145			
146	389.4371	0.001086	0.5473	0.5484	609.06	2125.00	2741.46	1.8108	5.0640	6.8566	146	146			
147	396.0176	0.001087	0.5448	0.5459	612.21	2122.00	2742.74	1.8217	5.0435	6.8461	147	147			
148	402.5236	0.001088	0.5428	0.5439	615.26	2119.00	2743.99	1.8							

رقم برانتل	الانتشارية الحرارية $\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s) <i>Pr</i>	الموصلية الحرارية $k \cdot 10^3$ (W/m·K)	اللزوجة الكينماتيكية $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	اللزوجة الديناميكية $\mu \cdot 10^7$ (Ns/m ²)	لحرارة نوعية C_p (kJ/kg·K)	جدول د-١ الخواص الفيزيائية للهواء الجاف عند الضغط الجوي.	
						كثافة ρ (kg/m ³)	درجة الحرارة T (K)
100	0.786	2.54	2.00	71.1	1.032	3.5562	100
150	0.758	5.84	4.426	103.4	1.012	2.3364	150
200	0.737	10.3	7.590	132.5	1.007	1.7458	200
250	0.720	15.9	11.44	159.6	1.006	1.3947	250
300	0.707	22.5	15.89	184.6	1.007	1.1614	300
350	0.700	29.9	20.92	208.2	1.009	0.9950	350
400	0.690	38.3	26.41	230.1	1.014	0.8711	400
450	0.686	47.2	32.39	250.7	1.021	0.7740	450
500	0.684	56.7	38.79	270.1	1.030	0.6964	500
550	0.683	66.7	45.57	288.4	1.040	0.6329	550
600	0.685	76.9	52.69	305.8	1.051	0.5804	600
650	0.690	87.3	60.21	322.5	1.063	0.5356	650
700	0.695	98.0	68.10	338.8	1.075	0.4975	700
750	0.702	109	76.37	354.6	1.087	0.4643	750
800	0.709	120	84.93	369.8	1.099	0.4354	800
850	0.716	131	93.80	384.3	1.110	0.4097	850
900	0.720	143	102.9	398.1	1.121	0.3868	900
950	0.723	155	112.2	411.3	1.131	0.3666	950
1000	0.726	168	121.9	424.4	1.141	0.3482	1000
1100	0.728	195	141.8	449.0	1.159	0.3166	1100
1200	0.728	224	162.9	473.0	1.175	0.2902	1200
1300	0.719	238	185.1	496.0	1.189	0.2679	1300
1400	0.703	303	213	530	1.207	0.2488	1400
1500	0.685	350	240	557	1.230	0.2322	1500
1600	0.688	390	268	584	1.248	0.2177	1600
1700	0.685	435	298	611	1.267	0.2049	1700
1800	0.683	482	329	637	1.286	0.1935	1800
1900	0.677	534	362	663	1.307	0.1833	1900
2000	0.672	589	396	689	1.337	0.1741	2000
2100	0.667	646	431	715	1.372	0.1658	2100
2200	0.655	714	468	740	1.417	0.1582	2200
2300	0.647	783	506	766	1.478	0.1513	2300
2400	0.630	869	547	792	1.558	0.1448	2400
2500	0.613	960	589	818	1.665	0.1389	2500
3000	0.536	1570	841	955	2.726	0.1135	3000

جدول ١- معاملات التحويل للوحدات

البعد	اضرب	في	للحصول على
١- الطول	متر	٣,٢٨٠.٨	قدم
	اننش	٢,٥٤	سم
	ميل	١,٦٠٩٣	كم
	قدم	١٢	اننش
٢- المساحة	م ^٢	١٠,٧٦٤	قدم ^٢
	م ^٢	١٥٥.٠	اننش ^٢
٣- الحجم	م ^٣	١,٠٠٠	لتر
	م ^٣	٣٥,٣١٥	قدم ^٣
	م ^٣	٢٦٤,١٧	جالون أمريكي
	جالون أمريكي	٣,٧٨٥٤	لتر
٤- الكتلة	كجم	٢,٢٠٤٦٢	باوند ك
	طن	١,٠٠٠	كجم
	طن انجليزي (قصير)	٢,٠٠٠	باوند ك
٥- السرعة	م/ث	٣,٢٨٠.٨	قدم/ث
	ميل/ساعة	١,٦٠٩	كم/ساعة
٦- الكثافة و الحجم النوعي	كجم/م ^٣	٠,٠٦٢٤٢٨	باوند ك/قدم ^٣
	جم/سم ^٣	١,٠٠٠	كجم/م ^٣
	م ^٣ /كجم	١٦,٠٢	قدم ^٣ /باوند ك
٧- معدل السريان، معدل التدفق الحجمي	كيلوجرام/ث	٢,٢٠٤٦	باوند ك/ث
	جالون/دقيقة	٠,٠٣٦١	لتر/ث
	لتر/ث	٢,١١٩	قدم ^٣ /دقيقة
٨- درجة الحرارة	$T(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C}) * 1.8 + 32$	$T(^{\circ}\text{F})$
	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T(^{\circ}\text{C}) * 1.8$	$\Delta T(^{\circ}\text{F})$
	$T(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$	$T(\text{K})$
	$T(^{\circ}\text{F})$	$T(^{\circ}\text{F}) + 460$	$T(\text{R})$

البعد	اضرب	في	للحصول على
٩- القوة	نيوتن	٠,٢٢٤٨١	باوند_ق
١٠- الضغط	باسكال	$10 \times 1,040.4$	باوند_ق/انش ^٢
	بار	١٠٠	كيلو باسكال
	ضغط جوي	١٠١,٣٢٥	كيلو باسكال
	ضغط جوي	١٤,٦٩٦	باوند_ق/انش ^٢
	مم زئبق	٠,١٣٣٣	كيلو باسكال
	انش زئبق	٣,٣٨٧	كيلو باسكال
	انش ماء	٠,٢٤٨٨٤	كيلو باسكال
١١- الحرارة النوعية	كيلو جول/(كجم.م°)	٠,٢٣٨٨٥	وحدة حرارية بريطانية/(باوند_ك.ف°)
١٢- الشغل، الحرارة، القدرة	كيلو جول	٠,٩٤٧٨٢	وحدة حرارية بريطانية
	وحدة حرارية بريطانية	٧٧٨,١٧	باوند_ق.قدم
	كيلو جول/كجم	٠,٤٣٠	وحدة حرارية بريطانية/باوند_ك
	وات	٣,٤١٢١٤	وحدة حرارية بريطانية/ساعة
	حصان	٥٥٠	باوند_ق.قدم/ث
	حصان	٠,٧٤٥٧	كيلو وات
١٣- الموصلية الحرارية	وحدة حرارية بريطانية/(ساعة.قدم.فهرنهايت)	١,٧٣٠٣	وات/(متر.م°)
١٤- معامل انتقال الحرارة	وحدة حرارية بريطانية/(ساعة.قدم ^٢ .فهرنهايت)	٥,٦٧٧	وات/(متر ^٢ .م°)
١٥- اللزوجة	بويس (Poise)	١	جرام/(سم.ث)
	بويس (Poise)	٢٤١,٩	باوند/(قدم.ساعة)
	بويس (Poise)	٠,٠٦٧١٩٥٥	باوند/(قدم.ث)
	باسكال.ث	١٠	بويس



مصباح جامعة الملك عبدالعزيز

