جمهورية العراق

وزارة الإعمـــار والإسكان
والبلديات والاشغال العامة
دائــرة المبانـــي

وزارة التخطـيط
الجهاز المركزي للتقييس والسيطرة النوعية

مـــــدونة التثليـــج

مدونة بناء عراقية

م.ب.ع ٦/٤٠٤

إن هذه المدونة معتمدة رسمياً وملزمة بموجب قانون الجهاز المركزي للتقييس والسيطرة النوعية ومنشورة في جريدة الوقائع العراقية في اصدارها ذي العدد ٤٣٨٤ في٢٠١٥/١٠/١٩وجميع ما تحتويه من اشتراطات ملزمة الاتباع والتطبيق من قبل الجهات الحكومية والقطاع الخاص لجميع المشاريع الانشائية وقطاع التشييد في جمهورية العراق وكل نسخة غير مختومة بختم الوزارة صاحبة حقوق الطبع والنشر والتوزيع تعتبر مزورة.
وزارة الاعمار والاسكان
والبلديات والاشغال العامة

الطبعة الاولى
٢٠١٥م-١٤٣٦هـ

اللجنــة العليــا لمشــروع مـدونــات البنــاء والمواصــفات الفنيـــة لأعمــال البنــاء العراقيــــــــة

طارق الخيكانــــي / وزير الاعمار والاسكان والبلديات والاشغال العامة / رئيــس اللجنـــــــــــــــة

اســتبرق ابـراهيـم الشــوك / وكيـل وزارة الاعــمار والاســـكان والبلديات والاشـــغال العامـــة

د.حميد علي عمران الانباري / عضو هيئة المســتشـــارين / الامانـة العامة لمجلس الـــــــــوزراء

حسين مجيد حسين / مديرعام دائـرة المباني/وزارة الإعمار والإسكان والبلديات والاشغال العامة/مديرالمشروع

ســـعد عبد الوهـــاب عبد القادر / رئيس الجهاز المركزي للتقييس والسيطرة النوعية / رئيس اللجنة الفنيـــة

حـــيدر فاضل عباس / مدير عام التخطيط والمتابـــعة / وزارة الاعمار والاسكان والبلديات والأشغال العامة

خضير عباس داود/ مديرعام دائرة شؤون المحافظات غير المنتظمة في اقليم/ وزارة العلوم والتكنولوجيـــا

لـــواء كريـم العبيـــدي/ وزارة البـيـــئـــة

رعد عبد الجليل عبد الامير/ مدير عــام مركز الدراسات والتصاميم / وزارة الموارد المائيـــــــــــــــة

صــادق محمـود الشمـري / مدير عام شـــركة ابن الرشـــــــــد / أمانة بغــــــــــــــــــداد

جـلال حسيـن حســــــن / م.مدير عام التخطيط والمتابــعة / وزارة الصنـــــــــاعة والمعــــــادن

د. عـــلاء حســـين عـلوان / كـــليـة الهـــــندســة / القســم المدنـــي / جــامعــة بغـــــــداد

فريـــق إعـــداد مـــدونـــة التثـليـــج

الأســـــتاذ الدكتور/ نجدت نشأت عـــــبد الله

الأستاذ المساعد الدكتور/ عبدالهادي نعمه خليفة

الأستاذ المساعد الدكتور/ نجم عـــــبد جاسم

الأستاذ المساعد الدكتور/ عصام محمد علـــــي

فريـــــق تدقيـــق مـــدونـــة التثـليـــج

الدكتــور/ عــدنان عــبد الوهـــــاب القلمجي

الدكتــور/ احــمد قـــــاسم محمـــــد

الدكتــور/ اصبيح وســـــمي مـــــايد

الدكتــور/ عـــــبيد طـلك فـــــاضل

اللجنـــــــــــــــة الفنيـــــــــــــــة للمشـــــــروع

ســــــعد عـــــبد الوهـــــاب عـــبد القادر / رئيس اللجنة

الدكتور المهندس عمـــــاد حمـــزة محمـــد حســـــــين

الدكتور المهندس علي عبـــــد الحسيـــــن مجبـــــــل

الدكتورالمهندس خالـــــد احـــــمـــد جـــــــــــــودي

الدكتورالمهندس رائـــــد رمـــــــــزي العمـــــــــري

الدكتور المهندس ليـــــــث خـــالـــــد كامـــــــــــل

الدكتورالمهندس محمـــــــــــد مصلـــح ســـــلمـــــان

الدكتور المهندس خـــــــــــالد عـــبد الوهـــاب مصطفى

الدكتورالمهندس رائـــــــــد حســـــــن عبـــــــــود

الدكتور المهندس مقـــــداد حـــــيدر الجـــــــــــوادي

الدكتور المهندس منقـــــــــــذ سلـــــــــــــــيم داود

ر.مهندسين أقـدم حســـــين محمـــــــــد عـــــــلي

الخبير المهندس نهـــــــــاد قاســـــــم محمـــــــــــد

ر.مهندسين أقـدم جنـــــان رضـــــــا محمـــــــــــد

اللجنـــــــــــــــة الاداريـــــــــــــــة للمشـــــــــــــــروع

الخبير المهـندس حسين مجيـد حسين / مديـرالمشروع

الدكتور المهندس رائـــــد حســـــــــــــن عبـــــــود

رئيس مهندسيـــن الهـــام ابراهيـــــم عـــــبد الـــــــرزاق

م. أقـــدم حيـــــــدر عـــــــلاوي صـــــــــــالح

م.مهندس حيـــــــــدر ايـــــاد سعـــــــــــــــيد

لجنـــــــــــــــة متابعـــــــــــــــة المدونـــــــــــــــة

الخبير المهنـــدس جبار حمزة لطيـــــف / رئيـــس اللجنـــة

رئيس مهندســـــين أقدم ســـــــــميرة ابـــــــــــراهيم

تقديم

بسم الله الرحمن الرحيم

تستمرُ وزارةُ الاعمارِ والاسكان والبلديات والأشغال العامة على نهجِها ودأبها وسعيها في رفْدِ المكتبةِ الهندسيةِ العراقية بما تحتاجُهُ من مراجعَ تُعينُ المهندسَ في عملهِ، مصمماً أو منفذاً. فبعدَ إصداريتها الأولى من الخمسَ عشرةَ مدونةً من مدوناتِ متطلباتِ الحيّزِ الفضائي في المباني، ومدونةِ السقالاتِ، ومدونةِ التأسيساتِ المائيةِ في المباني، ومدونةِ الإنارةِ الداخليةِ، ومدونةِ التأريضِ و الوقايةِ من الصواعقِ، ومدونةِ المصاعدِ، ومدونةِ التدفئةِ المركزيةِ، ومدونةِ التهويةِ الميكانيكيةِ، ومدونةِ حمايةِ الأبنيةِ من الحريق، ومدونةِ منظوماتِ الكشفِ والإنذارِ بالحريقِ، ومدونةِ العزلِ الحراري، ومدونةِ العزلِ المائي، ومدونةِ الصوتياتِ، ومدونةِ التهويةِ الطبيعيةِ والأصولِ الصحيةِ، ومدونةِ الإنارةِ الطبيعيةِ، وما تلاها من إصدارِ كلٍّ من الطبعةِ الثانيةِ من دليلِ المهندسِ المقيمِ للمشاريعِ الانشائيةِ، و الدليلِ القياسي لتحليلِ الأسعارِ لقطاعِ البناءِ والانشاءاتِ بجزأيهِ (الأعمالِ المدنيةِ وأعمالِ الخِدْماتِ الصحيةِ والكهربائيةِ والميكانيكيةِ)، وكراسِ توصيفِ عناوينَ المهنِ والحِرَفِ والمؤهلاتِ والإنتاجيةِ للعاملين في قطاعِ التشييدِ والبناءِ، تأتي هذهِ المجموعةُ الجديدةُ من مدوناتِ البناءِ لتُقدِّمَ للمهندسِ الحاذقِ ما يجعلُهُ على بيِّنةٍ من دقائق حِرفتهِ التي يجبُ أنْ يُجْهِدَ نفسَهُ في سبيلِ تحقيقِ شرائطِها.

فقدْ عزمتِ الوزارةُ على أنْ تُمضيَ نيَّتَها على ذلكَ ولن تدَّخرَ دونَ ذلك سعياً. فهذهِ الاصداريةُ من المدوناتِ وما تشتملُ عليهِ من مدونةِ النفاياتِ، ومدونةِ السلامةِ العامةِ في تنفيذِ المشاريعِ الإنشائيةِ، ومدونةِ الملاجئ، ومدونةِ التبريدِ، ومدونةِ الإنشاءاتِ الفولاذيةِ، ومدونةِ التثليجِ، ومدونةِ الأسسِ والجدرانِ الساندةِ، والمواصفاتِ الفنيةِ للأعمالِ الصحيةِ، والمواصفاتِ الفنيةِ للأعمالِ الكهربائيةِ، والمواصفاتِ الفنيةِ لأعمالِ تكييفِ الهواءِ ومنظوماتِ التثليجِ، ومدونةِ الأَحمالِ والقوى، ومدونةِ متطلباتِ البناءِ الخاص بذوي الاحتياجاتِ الخاصةِ، ومدونةِ التأسيساتِ الكهربائيةِ، كلّها تُقدِّمُ للمهندسِ أَجودَ ما يُحْكِمُ به عملَهُ. وحيثُ أنَّ بيانَ العملِ بالمدوناتِ قدْ أَلْزمَ الجميعَ بالرجوعِ إليها في جميعِ أمورِها فعلى اللهِ التُكْلانُ في نيْلِ النفعِ الجزيلِ الذي سيتحققُ من العملِ بهذه المدوناتِ. وذلك ليسَ أمراً بعيدَ المرامِ، بلْ يسيرَ المنالِ.

وعلى اللهِ قصْدُ السبيلِ

طارق الخيكاني
وزير الإعمار والإسكان والبلديات والأشغال العامة
رئيس اللجنة العليا
لمشروع المدونات والمواصفات العراقية

مقدمة فريق الإعداد

يعتبر موضوع الطاقة من المواضيع المهمة الذي يشغل بال الجميع باعتباره العنصر الاساسي والفعال في التنمية المستدامة، لذا اصبح من الضروري البحث في كيفية ترشيد الطاقة وتحسين فاعلية اداء المنظومات المستعملة لغرض الحفاظ على المصادر الطبيعية للطاقة. ومن هذا المنطلق حرص فريق الاعداد على تقديم مدونة تهتم بشرح لأنظمة التثليج بما تتلاءم والظروف البيئية العراقية وكيفية تحسين فاعلية استعمال الطاقة في مختلف التطبيقات.

إن وجود المدونات يساهم في ترشيد وتحسين فعالية استعمال الطاقة لما يمثله ذلك من المحافظة على مصادرها الطبيعية. ويحقق العمل على وفق اشتراطات والمواصفات المحلية والاقليمية والعالمية أداءً جيداً لكافة منظومات التثليج المختارة بحسب متطلبات العمل، بالاضافة الى الفائدة الكبيرة التي تشكلها مدونة التثليج كمرجع اساسي للمهندسين المصممين والمدققين لضمان جودة العمل في مجال منظومات التثليج.

تهدف مدونة التثليج الى تهيئة الحد الأدنى من شروط الراحة والصحة والسلامة العامة والأمان عند استعمال اجهزة التثليج في مختلف التطبيقات مع تحقيق ترشيد الطاقة والحفاظ على البيئة، من خلال تنظيم ومراقبة التصميم والتخطيط والتركيب ونوعية المواد المستعملة والتشغيل والفحص والصيانة والأمان لمنظومات التثليج. وتعمل المدونة على تحقيق هذه الاهداف بأكبر قدر من التنسيق والتوافق والتوصيف للأعمال المتعلقة بمجال اعمال منظومات التثليج في المباني من خلال مجموعة من الاجراءات وسياقات العمل التي يجب ان يلتزم بها الجميع (المصمم، والمنفِّذ، والمشغِّل، والمستفيد، والفنيون المسؤولون عن الصيانة والفحص والاختبار ..الخ).

لقد حرص فريق الاعداد على أن تشمل المدونة أسس التصميم وشروط التنفيذ والتخطيط والتركيب واجراءات الفحص والاختبار والصيانة لجميع منظومات التثليج السائدة والمستعملة في المباني السكنية والصناعية والمخازن المبردة والمجمدة وصناعة الادوية وصناعات الاجهزة الالكترونية. كما حرص الفريق على أن تكون جميع الاسس والشروط والاجراءات المذكورة في المدونة متفقة مع القوانين والتشريعات النافذة والمعمول بها حاليا في العراق. كما حرصنا على تحقيق التوافقات مع المدونات العربية النافذة والاستفادة مما ذكر فيها مع المحافظة على خصوصية التطبيق بالنسبة للعراق.

ويسر فريق الاعداد، وهو يضع بين ايدي المختصين هذه المدونة، أن يقدم شكره وتقديره الى اللجنة العليا لمشروع المدونات وإدارة مشروع اعداد وتطوير وتحسين مواصفات وتشريعات ومدونات البناء واللجنة الفنية للمشروع وكافة الجهات التي ساهمت في اظهار هذه المدونة. تأمل اللجنة ان تساهم هذه المدونة في تحسين فعالية استهلاك الطاقة مع ضرورة استمرار تحديث هذه المدونة و يسرها ان تستقبل اي آراء او ملاحظات من شأنها تحسين المدونة مستقبلاً.

ومن الله التوفيق

رئيس لجنة اعداد المدونة

الاستاذ الدكتور/ نجدت نشأت عبدالله

المحتوى

الباب 1 : مدخل عام

1-1 الغاية والمجال	1/1
2-1 التعاريف	2/1
3-1 المصطلحات والمختصرات	8/1
4-1 إستعمالات التثليج	8/1
1/4-1 الأجهزة المنزلية	9/1
2/4-1 تكييف الهواء	10/1
3/4-1 تصنيع الأغذية	10/1
4/4-1 النقل المبرد والمجمد	11/1
5/4-1 الخزن المبرد والمجمد	12/1
6/4-1 العمليات الصناعية	13/1
1/6/4-1 صناعة الأدوية	13/1
2/6/4-1 الصناعات الإنتاجية	14/1
3/6/4-1 الصناعات الألكترونية	15/1
7/4-1 الاستعمالات الاخرى (طبية، بناء، كيميائية،....الخ)	15/1
مراجع الباب 1	17/1

الباب 2: موائع التثليج وإستعمالاتها

1-2 موائع التثليج وخواصها المرغوبة	1/2
2-2 التصنيف والترميز التقليدي	1/2
1/2-2 الهيدروكاربونات المهلجنة	3/2
2/2-2 الهيدروكاربونات الطبيعية	3/2
3/2-2 المركبات اللاعضوية	5/2
4/2-2 الخلائط	6/2
3-2 أزمة طبقة الأوزون	6/2
1/3-2 أهمية طبقة الأوزون البيئية والمناخية والصحية	6/2
2/3-2 تآكل طبقة الأوزون	8/2
3/3-2 المواد المستنفدة للأوزون	10/2
4/3-2 إتفاقية فيينا وبروتوكول مونتريال	11/2
1/4/3-2 اتفاقية فيينا	11/2
2/4/3-2 بروتوكول مونتريال	11/2
3/4/3-2 نشاط العراق في حماية طبقة الأوزون	12/2
4-2 التصنيف الجديد لموائع التثليج	13/2
1/4-2 تقديم	13/2

2-4/1/1 المركبات الكاربونية الفلورية الكلورية CFC 13/2
2-4/1/2 مركبات الهايدروكاربون الفلورية الكلورية HCFC 13/2
2-4/1/3 مركبات الهايدركاربون الفلورية HFC 13/2
2 -4/1/4 الهيدروكاربونات HC 13/2
2-4/1/5 موائع التثليج الطبيعية 14/2
2-4/1/6 الأوليفينات 14/2
2-5 البدائل الصديقة للبيئة 14/2
2-5/1 الإحترار العالمي وموائع التثليج الانتقالية 17/2
2-6 الخواص الفيزيائية والحرارية لموائع التثليج 18/2
2-6/1 جداول ومخططات موائع التثليج شائعة الإستعمال في العراق 19/2
2-7 موائع التثليج الثانوية 19/2
مراجع الباب 2 32/2

الباب 3: تصنيف منظومات التثليج وإستعمالاتها

3-1 مكيف الهواء المنزلي 1/3
3-1/1 مكيف الهواء الجداري (الشباكي) 1/3
3-1/2 مكيف الهواء المنفصل 1/3
3-1/3 مكيفات الهواء المتنقلة 1/3
3-1/4 المضخات الحرارية 2/3
3-2 المنظومات متغيرة تدفق مائع التثليج 2/3
3-2/1 أنوع المنظومات متغيرة تدفق مائع التثليج 3/3
3-2/2 تعاريف 5/3
3-2/3 استعمالات المنظومات متغيرة تدفق مائع التثليج 6/3
3-3 منظومات تكييف الهواء 6/3
3-3/1 مكيفات الهواء المجمعة 6/3
3-3/1/1 مكيفات الهواء المجمعة ذات المكثف المبرد بالهواء 7/3
3-3/1/2 مكيفات الهواء المجمعة ذات المكثف المبرد بالماء 7/3
3-3/2 مكيفات الهواء المركزية 7/3
3-3/2/1مكيفات الهواء المركزية – ذات المكثف المبرد بالهواء 7/3
3-3/2/1/1 مكيفات الهواء المركزية – ذات مبخر التمدد المباشر 8/3
3-3/2/1/2 مكيفات الهواء المركزية – مثلجات الماء 9/3
3-3/2/2 مكيفات الهواء المركزية ذات المكثف المبرد بالماء 10/3
3-3/2/2/1 مكيفات الهواء المركزية ذات ملف التمدد المباشر 10/3
3-3/2/2/2 مكيفات الهواء المركزية – مثلجات الماء 11/3
مراجع الباب 3 13/3

الباب 4: أنواع منظومات التثليج

4-1 المنظومات الانضغاطية 1/4
4-1/1 منظومة التثليج الانضغاطية لضواغط الازاحة الموجبة 1/4
4-1/2 منظومة التثليج الانضغاطية لضواغط الطرد المركزي 6/4

2-4 المنظومات الإمتصاصية 7/4
1/2-4 منظومة التثليج الامتصاصية ذات بروميد الليثيوم- الماء 8/4
2/2-4 منظومة التثليج الامتصاصية ذات الأمونيا- الماء 13/4
3/2-4 الثلاجة الامتصاصية الكترولكس ذات الأمونيا – الماء – الهيدروجين 14/4
3-4 منظومات التثليج الشمسية 16/4
1/3-4 منظومات التثليج الشمسية مع منظومات التثليج الإنضغاطية 16/4
2/3-4 منظومات التثليج الشمسية مع منظومات التثليج الإمتصاصية 16/4
3/3-4 منظومات التثليج الشمسية مع المواد الممتزة لبخار الماء 17/4
4-4 منظومات تثليج أخرى غير تقليدية 20/4
1/4-4 منظومة الهواء للتثليج 20/4
2/4-4 منظومة التثليج بنفث البخار 21/4
3/4-4 منظومة التثليج بأنبوب الدوامة 22/4
4/4-4 منظومة التثليج الكهروحرارية 23/4
مراجع الباب 4 24/4

الباب 5: مكونات منظومات التثليج

1-5 أنواع الضواغط وإستعمالاتها 1/5
1/1-5 ضواغط الازاحة الموجبة 1/5
1/1/1-5 الضواغط الترددية 1/5
2/1/1-5 الضواغط الدورانية 2/5
3/1/1-5 الضواغط اللولبية 3/5
4/1/1-5 الضواغط الحلزونية 4/5
5/1/1-5 ضواغط الطرد المركزي 5/5
2-5 المكثفات 6/5
1/2-5 المكثفات المبردة بالماء 6/5
1/1/2-5 مكثف الإسطوانة والأنابيب 6/5
2/1/2-5 مكثف الإسطوانة والملف 7/5
3/1/2-5 المكثف بأنابيب متحدة المركز 7/5
2/2-5 المكثفات المبردة بالهواء 7/5
3/2-5 المكثفات التبخيرية 8/5
3-5 المبخرات 9/5
1/3-5 مبردات السوائل 10/5
1/1/3-5 الإسطوانة والأنابيب 10/5
2/1/3-5 الإسطوانة والملف 11/5
3/1/3-5 الأنابيب متحدة المركز 11/5
2/3-5 مبردات الهواء 11/5
1/2/3-5 ملفات المائع المثلج 11/5
2/2/3-5 ملفات التمدد المباشر 11/5
4-5 أدوات التمدد 12/5

5-4/1 الأنابيب الشعرية 12/5
5-4/2 صمام التمدد الحراري 13/5
5-4/3 صمام التمدد الألكتروني 14/5
5-4/4 صمامات الصفيحة المثقوبة 14/5
5-4/5 الصمام بطوافة 14/5
5-5 ملحقات منظومات التثليج 14/5
5-5/1 صمامات التنفيس 14/5
5-5/2 فواصل زيت خط الدفع 14/5
5-5/3 أوعية تجميع (تراكم) البخار (مجمعات البخار) 15/5
5-5/4 مستقبلات (مستلمات) السائل 15/5
5-5/5 فواصل السائل 15/5
5-5/6 المرشحات والمجففات 16/5
مراجع الباب 5 16/5

الباب 6: حمل التثليج

6-1 حمل التثليج وحمل التبريد 1/6
6-1/1 حمل التثليج 1/6
6-1/2 حمل التبريد 1/6
6-2 مكونات حمل التثليج 2/6
6-2/1 الأحمال الإنتقالية 2/6
6-2/1/1 معاملات إنتقال الحرارة للمخازن المبردة والمجمدة 4/6
6-2/1/1/1 العوازل الرئيسة 4/6
6-2/2 حمل التسرب 9/6
6-2/3 حمل المنتج 14/6
6-2/4 أحمال إضافية 22/6
6-3 حساب الأحمال (جداول العوازل الحرارية) 25/6
6-4 إختيار منظومة التثليج 25/6
مراجع الباب 6 26/6

الباب 7: المخازن المبردة والمجمدة

7-1 حفظ المواد الغذائية 1/7
7-1/1 الطرائق الحديثة لحفظ الأغذية (التجفيف، والتعليب، والتبريد، والتجميد) 2/7
7-2 أنماط الخزن المبرد والمجمد 3/7
7-2/1 الخزن المبرد والمجمد قصير الأجل 3/7
7-2/2 الخزن المبرد والمجمد طويل الأجل 3/7
7-3 خصائص الخزن (ظروف التخزين) 3/7
7-3/1 درجة حرارة الخزن 4/7
7-3/2 الرطوبة النسبية وحركة الهواء 4/7
7-4 متطلبات تخزين خاصة 8/7
7-4/1 الفواكه 8/7

7-4/2 الخضراوات 8/7
7-4/3 اللحوم 9/7
7-5 طرائق التجميد 9/7
7-5/1 التجميد بواسطة الهواء اللافح 10/7
7-5/2 التجميد بواسطة التلامس 11/7
7-5/3 التجميد بالغمر 12/7
7-6 تصميم المخازن المبردة والمجمدة 12/7
7-6/1 الاعتبارات الأولية لإنشاء المخازن المبردة والمجمدة 12/7
7-6/1/1 طرائق وضع العوازل 17/7
7-6/1/2 طرائق إنشاء الجدران والسقوف والأرضيات 19/7
7-6/1/3 طرائق عزل المخازن المبردة والمجمدة 25/7
7-6/1/4 أبواب مخازن التبريد والتجميد 25/7
7-6/2 تحديد حجم المخزن المبرد والمجمد 26/7
7-6/3 أنظمة توزيع الهواء داخل المخزن المبرد والمجمد 28/7
7-6/4 طرائق تنظيم وترتيب المنتجات داخل المخزن المبرد والمجمد 32/7
7-7 منظومات المخازن المبردة والمجمدة 33/7
7-7/1 أنظمة التثليج للمخازن التقليدية 33/7
7-7/2 أنظمة تثليج النقل المبرد والمجمد 34/7
7-8 خصوصيات منظومات التثليج للمخازن 35/7
7-8/1 الضواغط 35/7
7-8/2 المبخرات 36/7
7-8/3 أنابيب إذابة الجليد 39/7
7-8/4 المكثفات التقليدية 39/7
7-8/5 أنابيب مائع التثليج البارد والساخن 39/7
7-8/6 غرفة الآلات 41/7
مراجع الباب 7 42/7

الباب 8: منظومات التثليج متعددة الضغط

8-1 المنظومة التعاقبية الآنية (ذات الضاغط الواحد والمبخر الواحد) 1/8
8-2 منظومة التثليج متعددة الضغط (ذات الضاغط الواحد مع أكثر من مبخر) 3/8
8-3 منظومة التثليج متعددة الانضغاط (ذات أكثر من ضاغط) 5/8
8-4 منظومة التثليج ذات أكثر من ضاغط وأكثر من مبخر 11/8
8-5 منظومات التثليج التعاقبية 12/8
مراجع الباب 8 17/8

الباب 9: أجهزة التحكم التلقائي

9-1 انواع منظومات التحكم التلقائي 1/9
9-1/1 منظومات التحكم تلقائية الفعل 1/9
9-1/2 منظومات التحكم الكهربائية/ الالكترونية 2/9
9-1/3 منظومات التحكم التي تعمل بالهواء المضغوط 2/9

9-1/4 منظومات التحكم الهيدروليكية	3/9
9-2 طرائق التحكم التلقائي	3/9
9-2/1 التحكم ثنائي الموقع	3/9
9-2/2 التحكم التناسبي	5/9
9-2/3 التحكم العائم	5/9
9-2/4 التحكم التضمينى (المستمر)	5/9
9-3 مكونات منظومات التحكم التلقائي	7/9
9-3/1عنصر التحسس (ناقل إشارة)	7/9
9-3/2 المتحكم (منظم التحكم)	7/9
9-3/2/1 منظومة التحكم التناسبى	8/9
9-3/2/2 منظومة التحكم التناسبى والتكاملى	8/9
9-3/2/3 منظومة التحكم التناسبى والتكاملى والتفاضلى	8/9
9-3/3 اداة التحكم النهائي (وحدة التصحيح)	9/9
9-3/4 ملحقات اخرى (لاقط كهرومغناطيسي، مرحل، مؤقت)	10/9
9-4 مقاييس ومفاتيح الحماية التلقائية	11/9
9-4/1 ادوات القيا س	11/9
9-4/1/1 ادوات قياس وضبط درجة الحرارة	11/9
9-4/1/2 ادوات قياس وضبط الرطوبة	12/9
9-4/1/3 ادوات قياس وضبط الضغط وفرق الضغط	13/9
9-4/1/4 ادوات قياس وضبط التدفق	13/9
9-4/2 مفاتيح الحماية	13/9
9-4/2/1 مفتاح الحماية من درجة الحرارة العالية	13/9
9-4/2/2 مفتاح مانع الإنجماد	13/9
9-4/2/3 مفتاح الحماية من الضغط العالي والمنخفض	14/9
9-4/2/4 مفتاح الحماية من الحمل العالي (التيار العالي)	14/9
9-4/2/5 مفتاح مسخن الزيت	14/9
مراجع الباب 9	15/9

الباب 1

مدخل عام (General Introduction)

1-1 الغاية والمجال (Goal and domain)

ان الغاية من اعداد المدونة العراقية للتثليج هي وضع اسس التصميم والتركيب والإختيار والصيانة لمنظومات التثليج المختلفة التي تعمل على تحقيق الحد الأدنى من شروط الراحة والصحة والسلامة العامة والأمان الناتجة من استعمال انواع منظومات التثليج المنزلية والتجارية والصناعية وكذلك إختيار انواع موائع التثليج الصديقة للاوزون والبيئة مع تحقيق ترشيد الطاقة والحفاظ على البيئة من خلال إختيار منظومات التثليج وموائع التثليج المناسبة.

تطبق المدونة في المجالات التالية:-

- منظومات التثليج المنزلية.
- منظومات التثليج التجارية ومن ضمنها مخازن التبريد والتجميد.
- منظومات تكييف هواء وسائط النقل.
- منظومات تكييف الهواء.
- منظومات التثليج للمنظومات الصناعية.

ويتحقق ذلك من خلال مايلي:

1. تصميم وتنفيذ منظومات التثليج المطلوبة وتمكين المهندسين والفنيين من القيام بأعمالهم على الوجه الأكمل بدون اجتهاد أو تأويل.
2. تحديد اسس الإختيار المناسبة لمنظومات التثليج للتطبيقات بمختلف أنواعها آخذين بنظر الاعتبار عوامل الأمان والسلامة العامة واقتصاديات ترشيد الطاقة وكذلك استعمال المواد الصديقة للبيئة وسهولة الصيانة.
3. معرفة خصائص موائع التثليج المناسبة مع الاجهزة المختارة.
4. اعداد مواصفات ومحددات أجزاء منظومة التثليج وملاءمة بعضها البعض.
5. إختيار انواع الضواغط المناسبة للاستعمال المناسب وملاءمة مائع التثليج معه وأجزاء المنظومة الاخرى.
6. كيفية حساب احمال التثليج ومصادرها والعزل الحراري للمخازن المبردة والمجمدة.
7. معرفة انماط الخزن المبرد والمجمد وملاءمة انواع مخازن التبريد والتجميد للاستعمال المطلوب.
8. إختيار منظومة السيطرة المناسبة لمنظومة التثليج المختارة على وفق نوع الاستعمال.
9. اعداد برامج الصيانة لمنظومة التثليج وأجزائها.
10. دراسة النشرات الفنية للشركات المصنعة لمنظومات التثليج ومعرفة كيفية إختيار المنظومات الامثل منها والمناسبة لكل استعمال.

وبذلك يتسنى للعاملين في حقل التثليج سواء كانت مهنتهم التصميم او الصيانة او النصب او التشغيل او التسويق وغير ذلك، يتسنى لهم كسب خلفية علمية تمكنهم من ممارسة المهنة بشكل افضل من خلال

معرفة المحددات لكل جزئية تدخل ضمن نطاق مهنة التثليج باجهزتها وتطبيقاتها المختلفة المتباينة من حيث القدرة والتصميم وتنوع مكوناتها.

2-1 التعاريف (Definitions)

تمثل التعاريف الآتية جزءاً يسيراً من تعاريف اشمل منصوص عليها في مجلدات دليل آشري للأسس (ASHRAE Fundamentals) للستينات والسبعينات من القرن الماضي ثم توقفت تلك الجمعية عن ادراجها في أدلتها. وما يأتي يتعلق بالمصطلحات الجديدة أو غير الشائعة في حقل التثليج اذ أن هناك المئات من التعاريف لمهنة تكييف الهواء والتثليج وديناميك الحرارة وانتقالها.

التعاريف الآتية مدرجة بحسب الحروف الهجائية العربية ذلك لتسهيل متابعتها على القارئ ومن المراجع [1 و2].

- الأوزون (ozone) : مكون غازي للغلاف الجوي يتألف من ثلاث ذرات أوكسجين O_3. ويتكون الأوزون من تفاعلات كيميائية ضوئية بين الأشعة فوق البنفسجية والأوكسجين في طبقة الستراتوسفير.
- اعادة تهيئة (retrofitting) : تعديل منظومة التثليج وجعلها قادرة على العمل مع موائع التثليج البديلة.
- إعادة تأهيل (استعادة) (reclamation) : معالجة موائع التثليج المسترجعة والارتقاء بخصائصها من خلال عمليات الترشيح والتجفيف والتقطير والمعالجة الكيميائية من اجل اعادة خصائصها ومواصفاتها الى مستوى أداء معين. ويتطلب ذلك اجراء تحاليل كيميائية خارج الموقع لمطابقة مواصفات المادة المسترجعة مع مواصفات المنتج المعتمدة.
- الاسترجاع (recovery) : جمع وتخزين موائع التثليج الخاضعة للرقابة بسحبها من الأجهزة والآلات في أثناء الصيانة أو قبل التخلص من الأجهزة المستبدلة. وتخزين هذه الموائع في اسطوانات بدون الحاجة الى فحصها أو اجراء أي معالجة لها.
- اعادة التدوير (recycling) : تقليص وازالة الملوثات في موائع التثليج المستعملة (المسترجعة) وذلك بفصل الزيت عنها وتخليصها من الغازات غير المتكثفة والرطوبة باستعمال المرشحات والمجففات أو المرشحات المجففة وتخليصها من الحموضة والعوالق الصلبة. والهدف من اعادة التدوير هو اعادة استعمال مائع التثليج المسترجع واعادة شحن المنظومة بمائع التثليج نفسه.
- استنفاد طبقة الأوزون (ozone depletion OD) : تدمير كيميائي متسارع لطبقة الاوزون الستراتوسفيرية جراء تواجد مواد ناجمة عن انشطة بشرية.
- إمتصاص (absorption) : عملية إمتصاص بخار مائع التثليج في محلول مكون من المادة الماصة مذاب فيه القليل من مائع التثليج ويسمى بالمحلول المخفف. وتنتج حرارة من هذه العملية.
- استبدال استيعاضي (drop-in replacement) : اجراء لتغيير موائع التثليج الكلورية الفلورية بأخرى صديقة للأوزون بدون القيام بأي تعديلات تصنيعية للمنظومة ولكن ربما يستبدل المجفف.

- العمر في الغلاف الجوي (atmospheric lifetime) : متوسط الزمن الذي يبقى فيه الجزيء سليما بعد اطلاقه الى الجو.
- الأزيوتروب (azeotrope) : خليط متجانس من اثنين أو اكثر من موائع التثليج لا تتغير نسبة تركيبته في حالتي البخار والسائل وتبقى هذه النسبة ثابتة عند تبخره وتكثفه بأي درجة حرارة.
- بروتوكول مونتريال (Montreal protocol) : اعتمد بروتوكول مونتريال الخاص بالمواد المستنفدة للأوزون أواخر عام 1987 بعد اكتشاف ثقب الأوزون فوق القطب الجنوبي أواخر عام 1985. اتفقت الحكومات الموقعة على ضرورة اتخاذ تدابير صارمة للحد من انتاج واستهلاك خمسة من مركبات الكاربون الكلورية الفلورية وهي(CFC – 11, 12, 113, 114, 115) وعدد من الهالونات وهي (2402, 1211, 1301). وقد بني البروتوكول على اساس المراجعة الدورية لجداول التخلص التدريجي استناداً الى تقويمات علمية وتكنولوجية. وجرت عدة تعديلات على البروتوكول لتسريع جداول التخلص التدريجي وذلك في الأعوام 1990 في لندن و1992 في كوبنهاكن و1995 في فيينا و1997 في مونتريال و1999 في بكين و2007 في مونتريال.
- المولد (generator) جزء أساسي من دورة التثليج الامتصاصية يجهز بالحرارة من مصدر خارجي كالبخار أو الماء الحار جداً أو لهب احتراق حيث يتحرر مائع التثليج بخاراً من المحلول المركز الموجود في المواد.
- الغازات الدفيئة (Greenhouse Gases – GHG) : المكونات الغازية للغلاف الجوي، الطبيعية منها والمصنعة، التي تمتص وتشع طيف الأشعة تحت الحمراء الحرارية التي تنبعث من الأرض ومن الجو ومن الغيوم. وتسبب هذه الغازات ظاهرة الاحترار العالمي (الاحتباس الحراري) ومن أبرزها بخار الماء وثنائي أوكسيد الكاربون واوكسيد النايتروجين والميثان والأوزون. ومن الغازات المصنعة أبخرة موائع التثليج الهيدروكاربونية المهلجنة والمواد الأخرى المحتوية على الكلور والبروم.
- الهالوكاربونات (الهيدروكاربونات المهلجنة) (Halo Carbons HC) : المركبات الكيميائية التي تحتوي على ذرات الكاربون وذرة واحدة او اكثر من الهالوجينات الأربع ؛ الكلور والفلور والبروم واليود. وتسمى الهالوكاربونات كاملة الهلجنة اذا احتوت على ذرات الكاربون والهالوجينات فقط وتسمى مهلجنة جزئيا اذا أحتوت على ذرات الهيدروجين كذلك.
- الهيدروكاربونات (Hydro Carbons- HC) : مركبات كيميائية تتكون من ذرة أو اكثر من الكاربون محاطة بذرات هيدروجين فقط.
- الأشعة فوق البنفسجية (ultraviolet radiation - UV) : أشعة شمسية تقع اطوالها الموجية ما بين الضوء المرئي والأشعة السينية. ويشكل النوع UV – B أحد أنواع ثلاثة للأشعة فوق البنفسجية طولها الموجي 280 – 320 nm وهي ضارة للصحة على سطح الأرض ويمتص الأوزون غالبيتها.

- الهيدروكاربونات الفلورية (الهيدروفلوروكاربونات) (Hydro Fluoro Carbons – HFC) : مركبات هيدروكاربونية مهلجنة جزئيا تحتوي على ذرات الهيدروجين والكاربون والفلور فقط. ولاتستنفد طبقة الوزون ولكنها غازات دفيئة مثل باقي الهالوكاربونات.
- التبريد البيني (intercooling): ازالة الحرارة من بخار مائع التثليج بين مراحل الضغط المتعاقبة.
- الحرارة الكامنة (latent heat) : كمية الحرارة اللازمة لتغيير حالة (طور) المادة النقية مع ثبات درجة الحرارة.
- الهالوجينات (halogens) : عائلة من عناصر كيميائية ذات خصائص كيميائية متشابهة تشمل الكلور والفلور والبروم واليود.
- إمتزاز (adsorption): عملية التصاق حزيئات البخار في سطح مادة صلبة ذات مسامية عالية تحولها من بخار الى جزيئات سائلة وينتج من ذلك حرارة تساوي تقريبا حرارة التكثيف.
- برنامج الأمم المتحدة للبيئة (United Nations Environmental Program – UNEP) : وكالة تابعة للأمم المتحدة متخصصة بحماية البيئة، انشأت عام 1972.
- تكييف الهواء (air–conditioning) : عملية معاملة الهواء والسيطرة المتزامنة على درجة حرارته ورطوبته ونقاوته وطريقة توزيعه لتحقيق متطلبات الحيز المكيف. ويشمل ذلك تكييف الهواء لراحة الانسان والتطبيقات الصناعية وغيرها.
- جانب الضغط العالي (high pressure side) : اجزاء منظومة التثليج التي تعمل بالضغط العالي من المنظومة، وتشمل الضاغط والمكثف وما بينهما الى اداة التمدد.
- جانب الضغط الواطئ (low pressure side) : أجزاء منظومة التثليج التي تعمل بالضغط الواطئ، وتشمل أداة التمدد والمبخر وصولاً الى جانب السحب من الضاغط.
- ضاغط (compressor) : جهاز لزيادة ضغط بخار مائع التثليج ميكانيكياً، وهو بعدة انواع بحسب طريقة ضغط البخار، منها الترددي والطارد (النابذ) المركزي والدوار والحلزوني، أو بحسب طريقة ربطه بالمحرك الكهربائي ووعاء احتوائه ومنها المغلق ونصف المفتوح والمفتوح.
- مكثف (condenser) : مبادل حراري يتحقق داخله تكثيف مائع التثليج من بخار الى سائل بطرح الحرارة.
- ضاغط مغلق (hermetic compressor) : تجميعة (تركيبة) من ضاغط ومحركهُ الكهربائي داخل غلاف واحد مغلق غير قابل للتفكيك.
- ضاغط مفتوح (open compressor) : ضاغط يدار بمحور دوار يخترق غلاف (بيت) الضاغط من خلال مانع تسرب.
- وعاء الإمتصاص (absorber): جزء اساسي من دورة التثليج الأمتصاصية يتحقق فيه امتصاص بخار مائع التثليج في المحلول المخفف لانتاج محلول مركز يضخ من وعاء الأمتصاص الى المولد. وتنتج حرارة من عملية الامتصاص تطرح الى ماء تبريد قادم من مصدر خارجي.

- محلول الإمتصاص (absorption solution): محلول مائع التثليج (refrigerant) والمادة الماصة (absorbent) التي لها قابلية امتصاص مائع التثليج. ويسمى المحلول مركزاً اذا كان غنياً بمائع التثليج ويسمى مخففاً اذا كان فقيراً بمائع التثليج. مثل الأمونيا–ماء ومحلول بروميد الليثيوم– ماء.
- وعاء تجميع (تراكم) (accumulator) : وعاء قادر على احتواء مائع التثليج ومتصل بشكل دائم بين مخرج المبخر وجهة السحب من الضاغط لمنع دخول السائل الى الضاغط.
- نظام (منظومة) تعاقبي (cascade system): نظام مكون من دورتي تثليج أو اكثر حيث تطرح احداهما حرارتها مباشرة الى مبخر النظام الآخر.
- مركبات الكاربون الفلورية الكلورية (CFCs) : مركبات هيدروكاربونية مهلجنة تحتوي على ذرات الكاربون والفلور والكلور فقط وهي مركبات مستنفدة للأوزون وغازات دفيئة في آن واحد.
- معامل الأداء (Coefficient of Performance – COP) : قياس لفعالية منظومات التثليج ويساوي نسبة حاصل التثليج (الحرارة التي يمتصها المبخر) الى الشغل المصروف. وفي المضخات الحرارية (heat pumps) يساوي الحرارة المطروحة في المكثف (الحرارة المستفاد منها) الى الشغل المصروف.
- ملف (coil) : أداة تبريد أو تسخين مكونة من أنابيب مستقيمة أو محنية أو انابيب موصلة بطريقة معينة لتكون مبادلا حراريا وقد تكون الأنابيب مزعنفة أو بدون زعانف.
- وحدة تكثيف (condensing unit) : مجموعة تتكون من ضاغط أو اكثر ومكثف ومستقبل السائل (receiver) (عند الحاجة) وملحقات أخرى معتادة منصوبة على قاعدة مشتركة.
- مبرد تذرية بيني (flash inter-cooler): وعاء فصل يقع بين أداة التمدد والمبخر في منظومة التثليج الانضغاطية ويقوم بفصل غاز التذرير (flash gas) الناتج من مرور سائل التثليج عبر أداة التمدد وتمريره عبر المبخر.
- مركبات الهيدروكاربون الكلورية الفلورية (هيدروكلوروفلوروكاربونات) (hydro chloro fluoro carbons – HCFC) : مركبات هيدروكاربونية مهلجنة جزئياً تحتوي على ذرات الهيدروجين والكاربون والكلور والفلور. ولانها تحتوي على الكلور فهي تسهم في استنفاد طبقة الأوزون.
- مستقبل السائل (receiver) : وعاء أسطواني يشكل جزءاً من منظومة التثليج مع انبوبي دخول وخروج. ويستعمل لحفظ مائع التثليج السائل القادم من المكثف وضمان خروج سائل فقط منه الى أداة التمدد.
- مكافيء استنفاد الأوزون (ozone depleting potential – ODP) : مؤشر نسبي يشير الى ما يسببه منتج كيميائي معين من استنفاد الأوزون مقارنة مع استنفاد الأوزون الذي يسببه مائع التثليج R-11. وبالتحديد هو نسبة الاستنفاد الكلي للاوزون من انبعاثات وحدة كتلة واحدة من تلك المادة نسبة الى الاستنفاد الكلي للأوزون من انبعاثات وحدة كتلة واحدة من R-11.
- المواد المستنفدة للأوزون (ozone depleting substance – ODS) : المواد المعروفة باستنفادها لطبقة الأوزون في الغلاف الجوي العلوي، والمواد الخاضعة للرقابة في بروتوكول مونتريال وتعديلاته هي

الكاربونات الكلورية الفلورية (CFC) والهيدروكاربونات الكلورية الفلورية (HCFC) والهالونات وبروميد المثيل ورابع كلوريد الكاربون وكلوروفورم المثيل والهيدروكاربونات البرومية الفلورية والبروموكلوروميثان.

- طبقة الأوزون (ozone layer) : طبقة رقيقة ضمن طبقة الستراتوسفير يكون فيها تركيز الأوزون أعلى ما يمكن. وتمتد طبقة الأوزون من 12 الى 40 كيلومتراً فوق سطح الأرض.
- الكاربونات البرفلورية (البرفلوروكاربونات) (per–fluoro carbons – PFC) : مركبات هالوكاربونية تحتوي على الكاربون وذرات الفلور فقط وتتميز بالاستقرار الكامل وعدم قابلية الاشتعال وذات سمية منخفضة ولاتستنفد طبقة الأوزون ولكن بمكافئ احترار عالمي عال.
- التخلص التدريجي (phase – out) : انهاء جميع أشكال الانتاج واستهلاك المواد الكيميائية الخاضعة للرقابة بموجب بروتوكول مونتريال.
- مائع التثليج (refrigerant) : مائع يستعمل لنقل الحرارة في منظومة التثليج. ويقوم بامتصاص الحرارة عند درجة حرارة وضغط منخفضين ويطرحها عند درجة حرارة وضغط مرتفعين، وعادة ما ينطوي ذلك على تغير حالة المائع بالتبخر والتكثف.
- كاشف مائع التثليج (refrigeration detector) : جهاز استشعار يستشعر تراكيز مسبقة التحديد لبخار مائع التثليج المتواجد في الجو.
- منظومة التثليج (refrigeration system) : تجميعة (تركيبة) لأجزاء مترابطة تشكل مع بعضها دائرة مغلقة تحتوي على مائع التثليج الذي يدور بين أجزائها مكتسباً الحرارة مرةً (تبريد) وطارحها ثانيةً (تدفئة).
- التثليج (refrigeration) : عملية خفض درجة حرارة مادة معينة أو حيز معين الى درجة حرارة مرغوبة متوافقة مع موضع الاستعمال المطلوب.
- ضاغط نصف مغلق (semi–hermetic compressor) : تجميعة (تركيبة) تضم الضاغط ومحركه الكهربائي في غلاف (بيت) واحد. ويحتوي الغلاف على غطاء أو اغطية قابلة للفتح ولايحتوي على محور خارجي أو حلقة منع تسرب.
- مُبّرد مُفرَط (sub-cooler): مبادل حراري منفصل أو جزء من مبادل حراري أكبر هو المكثف اعتياديا يقوم بتبريد سائل التثليج المُكثَف الى درجة حرارة أوطأ من درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط التكثيف.
- سخان فائق (super- heater): مبادل حراري يستعمل اعتيادياً مع المبخرات المطفحة (flooded evaporators) لتسخين البخار الرطب أو المشبع الخارج من المبخر وتحميصة بشكل فائق وهو في طريقه الى الضاغط.

- طن التثليج (ton of refrigeration –TR) : الحرارة اللازمة لاذابة طن أمريكي (2000 باوند) من الجليد بدرجة حرارة 0^oC خلال 24 ساعة. (1TR = 12000 Btu/h = 3.516 kW). أو هو ازالة الحرارة بمعدل 3.516 kW من حيز ما خلال 24 ساعة.
- مادة (مائع تثليج) انتقالية (transitional substance) : مادة كيميائية يسمح بروتوكول مونتريال باستعمالها بديلاً عن المواد المستنفدة للأوزون مرحليا فقط، لكون مكافئ استنفادها للأوزون لا يساوي صفراً.
- دورة التثليج الانضغاطية (vapor compression refrigeration cycle) : دورة تثليج تتألف من ضاغط ومكثف وأداة تمدد ومبخر، حيث يقوم الضاغط فيها بضغط بخار مائع التثليج الذي يكثف في المكثف ثم ينخفض ضغطهُ عبر أداة التمدد لكي يتبخر في المبخر ثم يعود الى الضاغط. وهي دورة التثليج الأكثر استعمالاً في جميع المجالات.
- مثلج ماء (water-chiller) : تجميعة (تركيبة) لمنظومة تثليج متكاملة بجميع أجزائها الميكانيكية والكهربائية وأدوات السيطرة عليها في هيكل واحد، وظيفته الأساسية تبريد الماء الى درجات حرارة بحدود 5^oC الى 7^oC ويستعمل غالبا لأغراض تكييف الهواء.
- زيوتروب (zeotrope) : مائع تثليج يتكون من خليط من مائعي تثليج أو اكثر ذو خصائص تطاير متباينة. وعند تبخر أو تكثف الخليط (زيوتروب) عند ضغط معين تتغير نسب تركيبته من مكوناته في أثناء التبخر والتكثف. وتعطى هذه المجموعة أرقاماً تسلسلية بالأربعمائة (R-4XX) على وفق ISP 817.

1-3 المصطلحات والمختصرات

المصطلح العربي	المصطلح الانكليزي	الاختصار
تكييف الهواء	Air-conditioning	A/C
المعهد الامريكي الوطني للتقييس	American National Standard Institute	ANSI
معهد التثليج الامريكي	American Refrigeration Institute	ARI
الجمعية الامريكية لمهندسي التدفئة والتثليج وتكييف الهواء	American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers	ASHRAE
المركبات الكاربونية الفلورية الكلورية	Chlor Fluoro Carbon	CFC
معامل الأداء	Coefficient of Performance	COP
هيدروكاربون	Hydro Carbon	HC
هيدروكاربونات كلورية فلورية	Hydro Chlor Fluoro Carbon	HCFC
مرشح هواء دقائقي عالي الفعالية	High Efficiency Particulate Air Filter	HEPA Filter
هيدروكاربون فلوري	Hydro Fluoro Carbon	HFC
مكافئ استنفاد الأوزون	Ozone Depleting Potential	ODP
مادة مستنفدة للأوزون	Ozone Depleting Substance	ODS
غاز دفيء	Green House Gas	GHG
احترار عالمي (احتباس حراري)	Global Warming	GW
مكافئ الاحترار العالمي (الاحتباس الحراري)	Global Warming Potential	GWP
مائع تثليج	Refrigerant	R
طن تثليج	Ton of Refrigeration	TR
اشعة فوق بنفسجية	Ultra Violet	UV
برنامج الأمم المتحدة للبيئة	United Nation Environmental Program	UNEP
برنامج الأمم المتحدة للتنمية الصناعية	United Nation Industrial Organization	UNIDO

1-4 استعمالات التثليج (Applications of refrigeration)

إن أول من وضع فكرة التثليج الميكانيكي الطبيب وليم كالن في اسكتلندا عام 1748. وكان أول من وضع تصميم آلة تثليج ميكانيكية وحصل على براءة اختراع الدكتور جون كوري عام 1851 في الولايات المتحدة الأمريكية، وظهرت وسائل التثليج بالضاغط الترددي حوالي عام 1880 وشاع استعمالها في صناعات الثلج وتعليب اللحوم والاسماك كما أصبحت مهنة التثليج معترفا بها عندما اسست أول جمعية في الولايات المتحدة الأمريكية عام 1904 باسم الجمعية الأمريكية لمهندسي التثليج. ومع تطور صناعة

المحركات الكهربائية الصغيرة وظهور موائع التثليج الكاربونية الفلورية الكلورية (CFCs) انتشرت صناعة الأجهزة المنزلية وأجهزة تكييف الهواء وانطلقت صناعة التثليج بشكل متصاعد بعد الحرب العالمية الثانية لتشمل جميع مجالات الحياة الانسانية والاقتصادية والصناعية والتجارية ولتغطي تطبيقات لاحصر لها في شتى ميادين النشاط الأنساني.

1/4-1 الأجهزة المنزلية (Domestic units)

تتسم اجهزة التثليج المنزلي بمحدودية المجال إذ تقتصر على الثلاجات والمجمدات وبرادات الماء ومكيفات الهواء الجدارية وتلك المنفصلة (split air conditioner). وتكون الأجهزة المنزلية صغيرة الحجم وقليلة الاستهلاك للقدرة الكهربائية. إذ قد تستهلك الثلاجات والمجمدات وبرادات الماء ما بين 35 W الى 375 W، في حين تستهلك مكيفات الهواء قدرة كهربائية قد تصل الى 3000 W، في حين ان الوحدات المنفصلة الدولابية (floor standing spilt units) قد يصل استهلاكها القدرة الكهربائية الى 5000W.

هناك الملايين من الأجهزة المنزلية المستعملة في البيوتات في جميع أنحاء العالم. وكانت جميع الثلاجات والمجمدات وبرادات الماء تعمل بموائع التثليج الكاربونية الفلورية الكلورية (CFCs) الى وقت غير بعيد. ولكن بعد ظهور مشكلة تآكل طبقة الأوزون وظهور بروتوكول مونتريال تحولت الصناعة الى موائع تثليج بديلة كان أوسعها انتشارا واستعمالا الهيدروكاربون الفلوري HFC- 134a بديلا عن CFC-12.

يتألف جهاز التثليج المنزلي الحديث من الأجزاء الرئيسة الآتية:

1. بدن الجهاز أو الغلاف.
2. منظومة التثليج وتتألف من الضاغط والمكثف وأداة التمدد والمبخر.
3. الدائرة الكهربائية.

إن بدن الجهاز يعمل كغلاف خارجي وداخلي للمنظومة مع ماتحويه من رفوف ومجارير وغيرها أو شباك دفع وسحب الهواء في مكيفات الهواء. ومن هنا يأتي التباين في تصميم الشركات المختلفة لارضاء حاجات وأذواق المستهلكين. أما منظومة التثليج فعملها الأساس واحد في جميع هذه الأجهزة ولكن يجب الانتباه الى ان الأجهزة الصالحة للعمل في العراق وفي الأجواء الحارة يجب أن تكون مصممة لهذه الأجواء. حيث تتسم بمكثف أكبر أعتياديا لطرح الحرارة في محيط من الهواء الحار وان تكون ملفات الضاغط ذات عازلية أكبر للعمل بأمان بدرجات حرارة أعلى مما هو الحال في المناطق معتدلة المناخ. وتعمل جميع أجهزة التثليج المنزلية بضاغط مغلق ((hermetic compressor [2]. ويكون المكثف في هذه الأجهزة اما مبردا بالحمل الحر أو مبرداً بالهواء وتستعمل المراوح لدفع الهواء عبر المكثف في مكيفات الهواء وفي بعض المجمدات. ويستعمل الأنبوب الشعري أداة للتمدد في جميع هذه الأجهزة. اما المبخر وهو الجزء الذي تحصل فيه عملية التثليج المفيدة وازاحة الحرارة، فيتخذ أشكالا عدة بحسب نوعية الجهاز والغرض منه وطريقة تصميم الشركة الصانعة. وتمتاز الدائرة الكهربائية في الأجهزة المنزلية بالبساطة حيث تتوافر القدرة الكهربائية للضاغط والمراوح إن وجدت، وكذلك نظام السيطرة على عمل الجهاز وهو اعتياديا من النوع تشغيل وايقاف(on- off).

1-4/2 تكييف الهواء (Air conditioning)

يتضمن تكييف الهواء بمعناه الواسع السيطرة على درجة حرارة الهواء ورطوبته ونقاوته وطريقة توزيعه بما يتلاءم مع متطلبات التطبيق المطلوب. ولايستعمل تكييف الهواء لتهيئة ظروف ملائمة لراحة الانسان فقط وإنما أصبح ملازما لكثير من العمليات الصناعية والزراعية بهدف زيادة الانتاج وتحسينه وكذلك حفظه. ويمكن في العموم تقسيم تطبيقات تكييف الهواء الى نوعين، تكييف الهواء لراحة الانسان (comfort air conditioning) وتكييف الهواء للأغراض الصناعية (industrial air conditioning). ومن المنشآت المثالية لتكييف الهواء للراحة المنازل والمدارس والمكاتب ودور العبادة والمجمعات التسويقية والمباني العامة والمستشفيات والمصانع ووسائط نقل المسافرين المختلفة وغير ذلك، وتعمل مبخرات منظومة التثليج في أجهزة تكييف الهواء ضمن مجال صغير من درجات الحرارة يتراوح من 3^oC الى $10\ ^oC$ [3].

تصنف تطبيقات تكييف الهواء التي غايتها الأساس ليس تكييف الهواء لراحة الأنسان بأنها تكييف هواء صناعي. ولكن هذا لايعني أن التطبيقات الصناعية لاتتضمن تكييف هواء للراحة بل العكس من ذلك فقد تشمله مع المقصد الصناعي للتطبيق، وفي الوقت نفسه. ويمتد مجال درجات حرارة المبخر في منظومات التثليج المستعملة لتكييف الهواء الصناعي من درجات حرارة مرتفعة نسبيا كما في تطبيقات المضخات الحرارية ((heat pump إذ قد تصل 38^oC، الى درجات حرارة منخفضة جدا قد تصل $-70\ ^oC$ كما في تكثيف غاز الكلور [3]. ويمكن تلخيص الغاية من تكييف الهواء للأغراض الصناعية بالتطبيقات الآتية:

1. السيطرة على المحتوى الرطوبي للمواد المسترطبة.
2. التحكم بمعدل التفاعلات والتغيرات الكيميائية والبيوكيميائية.
3. الحد من تغير حجم المنتوجات ذات الأبعاد الدقيقة بسبب التمدد والتقلص الحراري.
4. تهيئة الهواء المرشح النظيف والنقي اللازم لسير عمليات تصنيع المنتوجات النوعية المنتقاة وبدون مشاكل.

تتفاوت قدرات (أو سعات) منظومة التثليج لأغراض تكييف الهواء للراحة وتكييف الهواء للأغراض الصناعية من بضعة اطنان تثليج الى مئات وأحيانا آلاف اطنان التثليج وما يقابلها بالكيلو واط. فقد تكون مكيفات هواء مجمعة نمطية ذات قدرات 10 كيلوواط تثليج وأكثر، الى مثلجات ماء أو محاليل ملحية بقدرات تصل الى 700 كيلوواط تثليج وأكثر بالضواغط الترددية، أو الى عدة مئات كيلو واط تثليج أو بضعة آلاف مع الضواغط الطاردة (النابذة) المركزية أو منظومات التثليج الأمتصاصية. وهناك العديد من منظومات التثليج المصنعة خصيصا لغرض صناعي معين.

1-4/3 تصنيع الأغذية (Food manufacturing)

تحتوي الفواكه والخضراوات واللحوم والمنتجات الغذائية على كائنات مجهرية حية وأنزيمات ومواد رغوانية (colloids) اضافة الى الماء. واذا لم تحفظ المواد الغذائية بدرجات حرارة منخفضة فانها تكون عرضة للتلف. وتسبب درجات الحرارة المنخفضة ابطاء عمليات الأكسدة في المواد الغذائية وتقلل من تكاثر البكتريا

في الخلايا والألياف الحية وتقلل من سفط (aspiration) السوائل من هذه المنتجات. وتحد درجات الحرارة الواطئة من فعل الأنزيمات المسببة لتلف المواد الغذائية. وتحافظ الفواكه والخضراوات على نضارتها بدرجات حرارة أعلى بقليل من درجة حرارة انجماد الماء في حين يمكن حفظ اللحوم وبعض المنتجات الغذائية لمدة عام أو أكثر عند درجات حرارة $-20\ ^{o}C$.

بدأ استعمال التثليج ومنظومات التثليج الميكانيكية لحفظ الأطعمة أواخر القرن التاسع عشر وبصورة خاصة لتجميد الأسماك. وتعد طريقة التثليج أو التجميد الطريقة الأقل كلفة لحفظ الأطعمة والأقل استهلاكا للطاقة مقارنة مع طريقة التعليب في الوقت الحاضر[3]. ويستعمل الهواء المثلج لحفظ الفواكه والخضراوات ومنتوجات الألبان واللحوم بأنواعها في مختلف مراحل تحضير هذه المنتوجات ولحين وصولها الى المستهلك. في حين يستعمل الهواء المثلج بدرجات حرارة منخفضة جدا تصل الى $20\ ^{o}C$ – لتجميد المنتجات الغذائية. ويمكن تقسيم أجهزة التجميد (freezing equipment) الى أربعة أنواع تبعاً لطريقة استخلاص الحرارة من المنتوج وكالآتي [3]:

1. التجميد بالهواء اللافح (الصاعق) (air–blast freezing) حيث يدور هواء مثلج حول المنتوج بسرعة عالية لسحب الحرارة منه ثم يعاد تثليجه في مبخر منظومة التثليج.
2. التجميد بالتلامس (contact freezing): حيث يوضع المنتوج المعلب وغير المعلب على أوعية حافظة معدنية مثلجة لسحب الحرارة من المنتوج ويتحقق تثليج الأوعية الحافظة بمائع يدور في منظومة التثليج.
3. التجميد بالتغطيس (immersion freezing): حيث يغطس المنتوج في محلول ملحي (brine) مثلج ويقوم مبخر منظومة التثليج بتثليج المحلول.
4. التجميد الزمهريري (cryogenic freezing): حيث يتعرض المنتوج الى جو بدرجات حرارة أوطأ من $60\ ^{o}C$ – وذلك برش النيتروجين السائل أو ثنائي أوكسيد الكاربون السائل على المنتوج في حجرة التجميد.

ويمكن الرجوع الى المرجع [3] للتعرف على طريقة عمل أجهزة التجميد المذكورة آنفاً وبعض من تفاصيل عمل خطوط التجميد، إذ أن ذلك خارج نطاق أغراض هذا البند.

4/4–1 النقل المبرد والمجمد (Refrigerated and cooled transport)

إن الحاجة الى نقل المواد الغذائية القابلة للتلف من مكان الى آخر ضمن سلسلة انتاجها وتصنيعها وتوزيعها أوجبت وجود وسائل نقل مبردة ومجمدة. وقد اتسع نطاق استعمال النقل المبرد والمجمد مع تقدم مستوى المعيشة للناس والتزايد المطرد للتجارة العالمية للمواد الغذائية الطازجة والمصنعة. ويمكن تقسيم سيارات النقل والشاحنات والحاويات المبردة والمجمدة الى أربعة اصناف [3] :

1. شاحنات وحاويات النقل على الطرق السريعة وسكك الحديد.
2. حاويات النقل البحري.
3. برادات النقل قصير المسافة.

4. برادات وشاحنات التوزيع على منافذ البيع.

كما يمكن تقسيم درجات الحرارة السائدة في التطبيقات المختلفة الى أربعة مجالات كالآتي:

1. 13 ^oC الى 21 ^oC للنقل المكيف.
2. 0 ^oC الى 5 ^oC وهو المجال المتوسط لدرجات الحرارة لنقل المواد الطازجة القابلة للتلف.
3. 2- ^oC الى 0 ^oC للحوم الطازجة.
4. 18 ^oC – وهو المجال الواطئ لدرجات الحرارة لنقل المواد المجمدة.

يتراوح طول حاويات وشاحنات النقل المبرد والمجمد ما بين 6.1 متر الى 13.7 متر في حين يكون عرضها وارتفاعها 2.4 متر. وتمتاز غالبيتها باحتوائها على منظومة التثليج الخاصة بها مع نظام توزيع هواء داخلي بحيث يصل الهواء المبرد أو المثلج الى جميع أرجاء الحاوية مع سبل اعادته الى مروحة المبخر حيث يدار عبر مبخر منظومة التثليج. ويمكن للمنظومة أن تعمل في جميع الأوقات.

وظهرت في العقد الماضي حاويات نقل بسيارات نقل صغيرة ومتوسطة الحمل بمنظومة تثليج تعمل على الكهرباء عند وجودها في المرآب. وتقوم المنظومة بتجميد محلول ملحي داخل حاويات مستطيلة قليلة السمك مثبتة في سقف الحاوية وجوانبها. وتترك المنظومة تعمل ليلا وهي في المرآب ثم تجهز صباحا بالمنتوجات التي تبقى مبردة في أثناء فترة توزيع المنتوج على منافذ البيع. أي إن منظومة التثليج لا تعمل في أثناء انطلاق سيارة النقل والتوزيع.

5/4-1 الخزن المبرد والمجمد (Refrigerated and cooled storage)

تظهر الحاجة الى الخزن المبرد والمجمد في أماكن أنتاج وتصنيع المنتوج وفي المناطق الوسطية للخزن طويل الامد أو للتوزيع وفي أماكن التوزيع النهائية. ويسمى الخزن بالمبرد اذا كانت درجة حرارة المخزن والخزين أعلى من 0 ^oC وهي للحفاظ على المنتوجات الطازجة. ويسمى الخزن بالمجمد اذا كانت درجة حرارة المخزن والخزين أوطأ من 0 ^oC وذلك للحفاظ على المنتوجات من التلف. ومن المعروف أن المواد الغذائية المجمدة يجب أن تحفظ بدرجة حرارة 18 ^oC- ويفضل درجة حرارة ما بين 23 ^oC- الى 29 ^oC- للخزن طويل الامد.

هنالك خمسة تصانيف للخزن المثلج الذي يحافظ على جودة الأطعمة على وفق درجات حرارة الخزن والاستعمال كالآتي:

1. برادات من 2 ^oC- الى 3 ^oC-.
2. برادات من 0 ^oC فما فوق.
3. بيئة مسيطر عليها للخزن طويل الأمد للفواكه والخضراوات.
4. غرف تخزين بدرجات حرارة واطئة من 23 ^oC- الى 29 ^oC- لخزن المنتجات المجمدة العامة.
5. تخزين بدرجة حرارة واطئة من 23 ^oC- الى 29 ^oC- مع قدرة تثليج فائضة لتجميد المنتوجات التي ترد بدرجة حرارة أعلى من 18 ^oC-.

تشكل الرطوبة النسبية محددا ثانيا الى جانب درجة الحرارة في بعض التطبيقات للحفاظ على جودة المنتوج وخاصة مع بعض أنواع الفاكهة. إذ أن الماء يشكل قرابة 90% أو أكثر من معظم الفاكهة وخاصة الأعناب. لذلك لابد من الحفاظ على قيم رطوبة نسبية عالية تصل الى 90% في بعض الحالات لادامة نضارة الفاكهة والحد من عملية التبخير الطبيعي منها. وهذا هو المقصود بالبيئة المسيطر عليها للخزن طويل الامد للفواكه والخضراوات في التصنيف 3. اذ لابد من ادامة رطوبة نسبية عالية مع درجات حرارة واطئة تتناسب مع نوع المخزون من فاكهة أو خضراوات وهي تتفاوت قليلا لكل منتوج.

6/4-1 العمليات الصناعية (Industrial processes)

يعني مصطلح التثليج ازالة حرارة غير مرغوب فيها من جسم معين أو حيز معين أو مادة معينة ونقل تلك الحرارة ثم طرحها في مكان آخر. وازالة الحرارة في أثناء عمليات صناعية أو تصنيع منتوج معين أو للحفاظ على استمرارية خط انتاجي أو في أحد مراحل الانتاج لمادة مصنعة هو أمر شائع ومصاحب لتطبيقات لا حصر لها. فأينما وجدت حرارة فائضة تجد معها عملية تثليج أو تبريد بصورة مباشرة أو غير مباشرة على وفق متطلبات العملية الصناعية.

1/6/4-1 صناعة الأدوية (Pharmaceuticals industry)

تمتاز صناعة الأدوية بدقتها وحدودها الحرجة في كل من التفاعلات الكيميائية ودرجات الحرارة التي تجري بها عمليات أنتاج الأدوية المختلفة ناهيك عن مستوى النظافة والطهارة الفائقة في أثناء عمليات تصنيع الأدوية،الصلب منها كالحبوب والمساحيق والسوائل مثل الاشربة والمصول. وتعد صناعة الأدوية جزءاً من الصناعات الكيميائية الأوسع التي تشمل ابتداءً من مواد عامة مثل الحوامض واللدائن (البلاستيك) الى صناعات متفردة لنوع واحد من المنتوج النادر. وهناك خصوصيات تميز منظومات وأجهزة التثليج لهذه الصناعة عن باقي منظومات وأجهزة التثليج. أولاها أن منظومات التثليج لهذه الصناعة هي منظومات مفردة غير نمطية تصنع خصيصاً للعملية الكيميائية المطلوبة. وثانيها أن الأجهزة التجارية النمطية لا تصلح وغير مقبولة في معظم الأحيان لهذه العمليات الصناعية المتخصصة.

ينبغي على مهندس التثليج المختص عند تصميمه لمنظومة التثليج المطلوبة أن يطلع تماما على حيثيات العملية الكيميائية وأن يناقش تفاصيلها مع المهندسين المختصين. ومن المهم اعداد مخطط انسيابي للعملية الكيميائية من بدايتها الى نهايتها ويكون هذا المخطط بمثابة خارطة طريق لتصميم منظومة التثليج وتوابعها من مبادلات حرارية وأجهزة تبريد هواء ومرشحات وغير ذلك. وعلى مهندس التثليج أن يكون ملماً بالأمور التالية قبل بدئه تصميم المنظومة.

1. تفاصيل العملية أو العمليات والتفاعلات الكيميائية.
2. فلسفة انتاج المنتوج وكمياته وخط الانتاج.
3. الأحمال الحرارية الناتجة ومكامنها.
4. درجات الحرارة المطلوبة في أثناء عملية أو عمليات الانتاج.
5. حدود المرونة في تغيير عملية الانتاج وتطويرها.

6. أخطار التلوث والسمية والانبعاثات الضارة.
7. احتماليات شبوب حريق في أثناء العملية أو مخاطر الانفجار.
8. امكانية حصول التآكل ودور التثليج للحد منه.
9. اعتبارت الصيانة للخط الانتاجي ولمنظومة التثليج.
10. جعل اجهزة التثليج آلية وتلقائية العمل (أوتوماتيكية) ومتوافقة مع العملية الصناعية.
11. امكانية استرجاع الطاقة وترشيدها.

كما ان لكل عملية تصنيع كيميائية ومنها الأدوية خصوصيتها، ويجب أن تدرس جميع المتغيرات مع مهندسي الانتاج ومهندسي المهن الأخرى ذات العلاقة بالعملية وأن تثبت ضمن المخطط الانسيابي قبل تصميم منظومة التثليج المناسبة.

2/6/4-1 الصناعات الإنتاجية (Manufacturing industries)

تمتاز الصناعات الإنتاجية بالقدرات والسعات الكبيرة لمنظومات التثليج حيث تصل الى عدة آلاف من أطنان التثليج بحسب سعة العملية الصناعية. وتأتي الحاجة الى التثليج والى درجات الحرارة الواطئة للتخلص من الحرارة المصاحبة لمعظم عمليات التصنيع والانتاج الصناعي. ويمكن تلخيص احتياجات الصناعات الإنتاجية الى منظومات التثليج في أربعة اشياء، (1) ماء بارد أو مثلج (2) محلول ملحي بارد أو مثلج (3) بيئة مثلجة دون الصفر المئوي بكثير (4) هواء بارد لتبريد المنتوج أو الأجهزة الإنتاجية أو لتكييف الهواء.

يمكن استعمال أجهزة التثليج النمطية كبيرة السعة مع الصناعات الإنتاجية اعتياديا لأجل الاقتصاد في الماء أو المحلول الملحي المثلج أو لأغراض تكييف الهواء لتلك الصناعة. كما يمكن تصميم منظومات تثليج متخصصة لبعض العمليات الإنتاجية وعندئذٍ يتوجب مراعاة مانصت عليه الفقرة السابقة. وان اهم العوامل المؤثرة في إختيار وتصميم منظومات التثليج لأغراض الصناعات الإنتاجية هي:

1. عمل المنظومة طول أيام السنة مع ارتفاع وانخفاض درجات الحرارة الخارجية.
2. احتمال تباين كبير في الحمل ولفترات قصيرة مما يعني ضرورة توافر قدرة التثليج كاملة مع تغير الحمل من 0% الى 100%.
3. السيطرة على التجمد وتكون الجليد في المنظومة مع تطبيقات التشغيل المستمر.
4. تغير قابلية الزيت على الامتزاج بمائع التثليج نتيجة تغير درجات حرارة التشغيل.
5. إختيار وسيط التبريد الذي قد يكون (1) مائع التثليج في ملف تمدد مباشر أو (2) مائع تثليج في مبخر مطفح أم (3) مائع تثليج ثانوي (محلول ملحي أو الكحول أو غليكول(glycol)).
6. فعالية المنظومة ودائميتها (ادامتها).
7. متطلبات ضغوط التشغيل وتشمل إختيار مائع التثليج، ونوع المنظومة مثل منظومة بمرحلة واحدة أو متعددة الضواغط (compound) أو متعاقبة (cascade).

ويقوم مهندس التثليج المصمم بناء على المتطلبات المذكورة آنفاً وأمور أخرى خاصة بتلك الصناعة الإنتاجية، بإختيار أكثر الأجزاء والأجهزة ملاءمة التي قد تكون تجارية نمطية أو قد تصمم خصيصا لذلك التطبيق.

1-4/6/3 الصناعات الألكترونية (Electronic industries)

عند ظهور الدوائر الكهربائية المتكاملة أو المدمجة ((integrated circuit وصناعة أشباه الموصلات واتساع نطاق تطبيقها وانتاجها ظهرت معها ضرورة اتقان جودتها ودوام عملها ودقة صناعتها مع وجود تنافس شديد بين الشركات الصانعة. وهنا ظهرت الحاجة الى تصميم أجزاء هذه الدوائر في بيئة مكيفة شديدة النقاوة. ويقال أن نقاوة الهواء المطلوبة لمختبرات انتاج هذه الدوائر أكثر من نقاوة هواء صالات العمليات بمرات عديدة. اضافة الى ذلك هناك سيطرة شديدة على رطوبة الهواء لحماية الأجزاء الدقيقة من هذه الدوائر وسطوح التوصيلات من التأكسد أو التلف اذا ما تعرضت الى رطوبة عالية.

يتبين من ذلك أن الحاجة في هذه الصناعة هي أجهزة تكييف هواء متخصصة. وهذا يعني أن منظومة التثليج التي تلبي حاجة نظام تكييف الهواء تكون مصممة لذلك الغرض. وتتحقق السيطرة على رطوبة الهواء بواسطة ملف التبريد وازالة الرطوبة. أما التحكم في نقاوة الهواء فيتحقق عادة باستعمال مرشحات خاصة تسمى مرشحات هواء دقائقي عالية الفعالية(High efficiency particulate air – HEPA- filters) لضمان بيئة مكيفة بالمواصفات المطلوبة.

1-4/7 الاستعمالات الأخرى (Other applications)

ان استعمالات التثليج تكاد لاتحصى، فحيثما كانت هناك حاجة لازالة الحرارة أو تبريد أو تثليج شيء ما نشأت الحاجة الى التثليج. ومنها استعمالات ترفيهية مثل حلبات التزلج على الجليد وصالات لعب الهوكي على الثلج، واستعمالات طبية مثل حفظ المصول والدم والأنسجة بدرجات حرارة منخفضة جدا، واستعمال التثليج في معاملة المعادن بدرجات حرارة واطئة، وإستعمالات لازالة الحرارة الناتجة من التفاعلات الكيميائية والحرارة الناتجة من تصلب الخرسانة وخاصة في الهياكل الخرسانية الكتلية مثل الأسس والأعمدة الكبيرة وأبدان السدود، واستعمالات لتهيئة أجواء خاصة في غرف ومنشآت اختبار معينة وهكذا. وسنذكر البعض منها هنا.

تتفاوت إستعمالات التثليج في المجال الطبي في مناح متعددة. فهناك الاستعمالات المعلومة لخزن بلازما الدم ومصل الدم والأنسجة الحية والبنسلين وغير ذلك. وتستعمل لهذه الأغراض مجمدات صغيرة تنصب داخل المختبرات وتكون إما بمنظومة ذات مرحلة واحدة أو منظومة تثليج تعاقبية (cascade) بحسب درجة حرارة التطبيق. وتستعمل المجمدات بمنظومة تثليج تعاقبية لدرجات حرارة من ^{o}C 40- الى^{o}C 80-، وهناك إستعمالات في ما يسمى هايبوثرميا (hypothermia) وهو خفض درجة حرارة الجسم بطرائق صناعية للأغراض العلاجية. ويعرف الهايبوثرميا حالياً بأنه خفض درجة حرارة الأحياء ذات الدم الحار بصورة مقصودة أوطأ من درجة حرارتها الطبيعية. وتقسم هذه الظاهرة الى ثلاثة مستويات : الخفيفة (^{o}C 37 الى ^{o}C 28) والمتوسطة (^{o}C 28 الى ^{o}C 20) والعميقة (^{o}C 20 الى ^{o}C 0). وهناك مستويان آخران هما التبريد

المفرط (دون الصفر المئوي بدون تكون الجليد) ومستوى التجميد (دون الصفر المئوي مع تكون الجليد). وتعد هذه إستعمالات خاصة جداً يستعمل فيها الماء المبرد والمثلج بواسطة منظومات تثليج مصممة لهذا الغرض. هناك أيضاً تطبيق خاص جدا يسمى الجراحة الزمهريرية (cryogenic surgery) حيث تجمد منطقة صغيرة من الجسم لازالة الأورام منها بدون الحاجة الى تخدير. ويمكن للقارئ الرجوع الى مراجع متخصصة لمزيد من المعلومات [4،5].

يعد تبريد الكتل الخرسانية الكبيرة جدا عند صبها وخاصةً في السدود تطبيقاً هندسياً رائعاً للتثليج. وتبرد الكتلة الخرسانية لسببين رئيسين هما ازالة حرارة التصلب التي تطرحها الخرسانة والثاني لتعجيل حصول التقلص الحجمي للكتلة الكبيرة في أثناء الانشاء وبالخصوص عند مفاصل التمدد أو عند صب الخرسانة بوجود هياكل وسطية سابقة. وقد استعمل ماء النهر أو السد لأول مرة لهذا الغرض وبدرجات حرارة بحدود 21 ^{o}C وتدويره داخل ملفات مطمورة في جسم الخرسانة المصبوبة. ثم استعمل الماء المثلج لهذا الغرض بدرجات حرارة بحدود 12 ^{o}C وذلك بخلط الثلج مع الماء وتدويره في الملفات. ثم جاء دور منظومات التثليج الميكانيكية بقدرات 1000 kW وأكثر مع استعمال ماء مثلج بدرجة حرارة 7°C يدور في الملفات المدفونة. ويستعمل اعتياديا ما مقداره 150 ملفا أو اكثر بحسب الحاجة ذات أنابيب بقطر 25 mm وفي منظومات مغلقة لدوران الماء المثلج.

هناك إستعمالات لاحصر لها لمنظومات التثليج في الصناعات الكيميائية. وما نصت علية الفقرة 1-4/6/2 عن الصناعات الإنتاجية يسري على الصناعات الكيميائية فيما يخص منظومة التثليج. ولكن الصناعات الكيميائية تمتاز بأنها تستعمل موائع تثليج أكثر تنوعا من غيرها من الصناعات. فاضافة الى استعمال الهيدروكاربونات المهلجنة (halogenated hydrocarbons) تستعمل المركبات الهيدروكاربونية مثل الميثان والايثان والبروبان والبروبلين والأثيلين وكذلك تستعمل الأمونيا. إن كل هذه المركبات شائعة الاستعمال على نطاق واسع في هذه الصناعة. كما تسود درجات الحرارة الواطئة التي قد تصل الى 50- ^{o}C في هذه الصناعة باستعمال المركبات الهيدروكاروبونية موائع للتثليج. كما ينتشر استعمال التثليج غير المباشر في هذه الصناعة باستعمال المحاليل الملحية والغليكولات (glycols) وغيرها. ومن المعتاد أن تجد منظومة تثليج مركزية في مصنع الكيميائيات مع امتدادات أنابيب ومبادلات حرارية في أرجاء المصنع وحيثما كانت هناك حاجة وبصورة أكثر مما هو عليه الحال في صناعات الأغذية أو الصناعات الإنتاجية.

مراجع الباب 1

[1] د.الجودي، خالد احمد،" ***مبادئ هندسة تكييف الهواء والتثليج***"، جامعة البصرة، الطبعة الثانية، 1996.

[2] UNEP, "***Good Practices in Refrigeration Training Manual***", Dec. 1994.

[3] ASHRAE, "***1986 ASHRAE Handbook : Refrigeration System and Applications***", S.I. Ed., ASHRAE, Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A. 1986.

[4] Smith, A.U.,"***Biological Effects of Freezing and Super-cooling***", Edward Arnold, London,1961.

[5] Virtue, R.W., "***Hypothermic Anesthesia***", Thomas, Spring Field, IL,1955.

الباب 2

موائع التثليج واستعمالاتها (Refrigerants and their Applications)

2-1 موائع التثليج وخواصها المرغوبة (Refrigerants and desired properties)

يعرف مائع التثليج (refrigerant) أنه مائع في دورة التثليج يقوم بامتصاص الحرارة من حيز معين عند درجة حرارة واطئة ثم يطرح هذه الحرارة الى حيز آخر عند درجة حرارة أعلى [1]. وليس هناك ما يمكن تسميته مائع تثليج مثالياً، إذ لا يستطيع مائع واحد تغطية كافة مجالات الاستعمال [2]. إنما هناك أنواع من موائع التثليج لكل منها محاسنه ومساوئه وما يتلاءم منها مع إستعمال معين اكثر من غيره. ويختار مائع التثليج الذي تتوافر فيه أكثر المحاسن مع الإستعمال المطلوب وأدنى قدر من المساوئ مقارنة مع موائع التثليج الأخرى. ومن الخواص المرغوبة والضرورية التي يفضل أن تتوافر في مائع التثليج التالية [5,4,3] :

1. درجة حرارة غليان واطئة.
2. درجة حرارة حرجة مرتفعة.
3. حرارة كامنة للتبخر عالية.
4. حرارة نوعية واطئة للسائل.
5. حجم نوعي واطئ للبخار.
6. غير مسبب لصدأ المعادن.
7. غير قابل للاشتعال والانفجار.
8. غير سام.
9. قليل الكلفة
10. سهل التحول الى سائل بضغط ودرجة حرارة معتدلين.
12. قابل للاكتشاف عند التسرب سواء برائحته أو باحدى طرائق كشف التسرب.
13. يختلط جيداً مع زيت تزييت الضاغط.

هناك خواص أخرى، كهربائية وذات علاقة بالصوت واخرى كيميائية يمكن الرجوع اليها في المرجع[1] وأما ما ذكر آنفاً فيمثل أهم الخواص. ومنذ الثمانينات من القرن الماضي أعطيت الخواص البيئية لموائع التثليج أهمية استثنائية خاصة بما يتعلق بقابليتها على استنفاد الأوزون.

2-2 التصنيف والترميز التقليدي (Traditional coding and classifications)

هناك أكثر من تصنيف لموائع التثليج تأريخياً. فمنهم من يقسمها الى موائع تثليج أساسية (primary) واخرى ثانوية (secondary). فالأساسية هي موائع التثليج العاملة في دورة التثليج في حين أن الثانوية هي الموائع التي يبردها أو يثلجها مائع التثليج الأساسي ومن ثم تستعمل لأغراض التبريد[4]. وهناك تصنيف آخر يقسمها الى قسمين بحسب طريقة اشتقاقها صناعيا. فالصنف الأول هو موائع التثليج المصنعة (synthetic) وهي مشتقات الهيدروكاربونات بمعظمها، والثاني هو موائع التثليج غير المصنعة أو الطبيعية

مثل الهيدروكاربونات وثنائي أوكسيد الكاربون والأمونيا والماء والهواء وغيرها. وهناك تقسيم آخر أكثر شيوعاً تصنف فيه موائع التثليج الى أربعة أصناف هي:

1. الهيدروكاربونات المهلجنة (halogenated hydrocarbons).
2. الهيدروكاربونات الطبيعية (natural hydrocarbons).
3. موائع التثليج اللاعضوية (inorganic refrigerants).
4. الخلائط (azeotropes and zeotropes).

ويضم هذا التصنيف جميع موائع التثليج التقليدية والحديثة وموائع التثليج البديلة. ولكل من هذه الموائع تركيبته الكيميائية بعدد ذرات معين من الكاربون والهيدروجين والهالوجينات وغير ذلك. وبدلاً من تسمية كل مركب باسمه الكيميائي، والذي هو معقد نوعاً ما، وضعت جمعية ASHRAE والمعهد الوطني الأمريكي للتقييس (ANSI) نظاما رقميا لجميع موائع التثليج. يبدأ هذا النظام بالحرف R الذي هو مختصر كلمة Refrigerant متبوعا بثلاثة ارقام كالتالي [6]:

$$R\ (m-1)\ (n+1)\ (p) \qquad (1/2\text{-}2)$$

حيث تشتق أرقام m و n و p من معادلة المائع الكيميائية وهو إعتياديا هيدوكاربون مشبع أو مهلجن، كالآتي:

$$CmHnClqFp \qquad (2/2\text{-}2)$$

وكذلك

$$N + p + q = 2m + 2 \qquad (3/2\text{-}2)$$

حيث تشير الرموز الى:

m = عدد ذرات الكاربون

n = عدد ذرات الهيدروجين

p = عدد ذرات الفلور

q = عدد ذات الكلور

فمثلا $C_2Cl_2F_4$ يكون رقم المائع فيه:

$$R(2 - 1)(0 + 1)(4) = R - 114$$

كذلك $CHClF_2$ يكون رقم المائع فيه:

$$R(1 - 1)(1 + 1)(2) = R - 022 = R - 22$$

وباختصار يأخذ الميثان CH_4 ومشتقاته المهلجنة رقمين فقط ويأخذ الأيثان C_2H_6 ومشتقاته المهلجنة ثلاثة أرقام تبدأ كلها بالرقم 1 أي بمئة واحدة فقط (لأن عدد ذات الكاربون اثنتان فقط) مثل R-111 و R-113 وهكذا. وعند وجود ذرة أو اكثر من البروم Br يكتب الرمز B مع عدد ذراته بعد رقم المائع مثل R-13B1 و R-114B2.

تأخذ مجموعة البروبان مجموعة ارقام المئتين ومجموعة البيوتان مجموعة أرقام الستمائة والخلائط الزيوتروبية (zeotrpes) تأخذ مجوعة أرقام الأربعمائة والخلائط الازيوتروبية مجموعة أرقام الخمسمائة. أما المركبات أو موائع التثليج اللاعضوية فتأخذ مجموعة أرقام السبعمائة متبوعة بالوزن الجزيئي للمركب مثل الماء H_2O

الذي يكون رمزه R-718 والأمونيا NH_3 يكون رمزه R-717 وهكذا. وتأخذ المركبات العضوية غير المشبعة أرقاما تبدأ بالألف متبوعاً بثلاثة أرقام على وفق نظام الترقيم الموصوف آنفا مثل الاثيلين C_2H_4 الذي يأخذ الرقم R-1150. ويبين الجدولان (2−1/2) و(2−2/2) آخر ما اصدرته جمعية آشريASHRAE لموائع التثليج الهيدروكاربونية وللخلائط [5].

2−1/2 الهيدروكاربونات المهلجنة (Halogenated hydrocarbons)

الهيدروكاربونات المهلجنة موائع تثليج مصنعة من مركبي الميثان (CH_4) والايثان (C_2H_6) وذلك باستبدال بعض ذرات الهيدروجين أو جميعها بعدد ذرات مماثل من واحد أو أكثر من الهالوجينات كالكلور والفلور والبروم. ولا يستعمل الهالوجين الرابع وهو اليود. وتغير ذرات الهيدروجين غالبا بذرات الكلور والفلور ونادرا ما تحل ذرات البروم محلها. وتسمى الهيدروكاربونات المهلجنة بالهالوكاربونات (halocarbons) اختصاراً.

تأخذ مشتقات الميثان رقمين بعد حرف R ابتداءً بمائع التثليج R-11 وانتهاء بالميثان R-50 على وفق نظام الترقيم في الفصل 2−2. وتأخذ مشتقات الايثان ثلاثة ارقام تبدأ كلها بالرقم 1 أي مئة واحدة ابتداء من R-113 وانتهاءً بالايثان R-170. الهالوكاربونات هي أكثر موائع التثليج انتاجاً واستعمالاً في مواقع لاحصر لها صغيرة ومتوسطة وكبيرة جداً.

2−2/2 الهيدروكاربونات الطبيعية (Natural hydrocarbons)

تستعمل الهيدروكاربونات الطبيعية غالباً في المنظومات الصناعية والتجارية الكبيرة. وهي ذات خواص فيزيائية وحرارية جيدة ولكنها قابلة للاشتعال والانفجار. وتستعمل بصورة خاصة في منظومات التثليج ذات درجة الحرارة الواطئة مثل ^{o}C 50- فما دون. وأكثرها استعمالاً الايثان والميثان والبروبان والبيوتان. وقد قل استعمالها في النصف الثاني من القرن الماضي لتوافر الهالوكاربونات الأمينة غير القابلة للاشتعال. ولكن هناك عودة لها حالياً بسبب الأضرار البيئية مثل الاحترار العالمي واستنفاد الأوزون.

الجدول 2-1/2: موائع التثليج الهيدروكاربونية [1].

رقم المائع	الأسم الكيميائي	الصيغة الكيميائية	الوزن الجزيئي	درجة الغليان الطبيعية °C	مجموعة الأمان
Methane Series					
11	Trichlorofluoromethane	CCl_3F	137.4	24	A1
12	Dichlorodifluoromethane	CCl_2F_2	120.9	-30	A1
12B1	Bromochlorodifluoromethane	$CBrClF_2$	165.4	-4	
13	Chlorotrifluoromethane	$CClF_3$	104.5	-81	A1
14	Tetrafluoromethane (carbon tetrafluoride)	CF_4	88.0	-128	A1
21	Dichlorofluoromethane	$CHCl_2F$	102.9	9	B1
22	Chlorodifluoromethane	$CHClF_2$	86.5		A1
23	Trifluoromethane	CHF_3	70.0	-82	A1
30	Dichloromethane (methylene chloride)	CH_2Cl_2	84.9	40	B2
31	Chlorofluoromethane	CH_2ClF	68.5	-9	
32	Difluoromethane (methylene fluoride)	CH_2F_2	52.0	-52	A2
40	Chloromethane (methyl chloride)	CH_3Cl	50.4	-24	B2
41	Fluoromethane (methyl fluoride)	CH_3F	34.0	-78	
50	Methane	CH_4	16.0	-161	A3
Ethane Series					
113	1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoroethane	CCl_2FCClF_2	187.4	48	A1
114	1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoroethane	$CClF_2CClF_2$	170.9	4	A1
115	Chloropentafluoroethane	$CClF_2CF_3$	154.5	-39	A1
116	Hexafluoroethane	CF_3CF_3	138.0	-78	A1
123	2,2-dichloro-1,1,1-trifluoroethane	$CHCl_2CF_3$	153.0	27	B1
124	2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoroethane	$CHClFCF_3$	136.5	-12	A1
125	Pentafluoroethane	CHF_2CF_3	120.0	-79	A1
134a	1,1,1,2-tetrafluoroethane	CH_2FCF_3	102.0	-26	A1
141b	1,1-dichloro-1-fluoroethane	CH_3CCl_2F	117.0	32	
142b	1-chloro-1,1-difluoroethane	CH_3CClF_2	100.5	-10	A2
143a	1,1,1-trifluoroethane	CH_3CF_3	84.0	-47	A2
152a	1,1-difluoroethane	CH_3CHF_2	66.0	-25	A2
170	Ethane	CH_3CH_3	30.0	-89	A3
Ethers					
E170	Dimethyl ether	CH_3OCH_3	46.0	-25	A3
Propane Series					
218	Octafluoropropane	$CF_3CF_2CF_3$	188.0	-37	A1
236fa	1,1,1,3,3,3-hexafluoropropane	$CF_3CH_2CF_3$	152.0	-1	A1
245fa	1,1,1,3,3-pentafluoropropane	$CF_3CH_2CHF_2$	134.0	15	B1
290	Propane	$CH_3CH_2CH_3$	44.0	-42	A3
Cyclic Organic Compounds					
C318	Octafluorocyclobutane	$-(CF_2)_4-$	200.0	-6	A1
Miscellaneous Organic Compounds					
Hydrocarbons					
600	Butane	$CH_3CH_2CH_2CH_3$	58.1	0	A3
600a	Isobutane	$CH(CH_3)_2CH_3$	58.1	-12	A3
601	Pentane	$CH_3(CH_2)_3CH_3$	72.15	36.1	A3
601a	Isopentane	$(CH_3)_2CHCH_2CH_3$	72.15	27.8	A3
Oxygen Compounds					
610	Ethyl ether	$CH_3CH_2OCH_2CH_3$	74.1	35	
611	Methyl formate	$HCOOCH_3$	60.0	32	B2
Sulfur Compounds					
620	(Reserved for future assignment)				
Nitrogen Compounds					
630	Methyl amine	CH_3NH_2	31.1	-7	
631	Ethyl amine	$CH_3CH_2(NH_2)$	45.1	17	
Inorganic Compounds					
702	Hydrogen	H_2	2.0	-253	A3
704	Helium	He	4.0	-269	A1
717	Ammonia	NH_3	17.0	-33	B2
718	Water	H_2O	18.0	100	A1
720	Neon	Ne	20.2	-246	A1
728	Nitrogen	N_2	28.1	-196	A1
732	Oxygen	O_2	32.0	-183	
740	Argon	Ar	39.9	-186	A1
744	Carbon dioxide	CO_2	44.0	-78[c]	A1
744A	Nitrous oxide	N_2O	44.0	-90	
764	Sulfur dioxide	SO_2	64.1	-10	B1
Unsaturated Organic Compounds					
1150	Ethene (ethylene)	$CH_2=CH_2$	28.1	-104	A3
1270	Propene (propylene)	$CH_3CH=CH_2$	42.1	-48	A3

للتعرف على الرموز A1 الى A3 والرموز B1 الى B3 يرجى مراجعة الفصل 2-6.

الجدول 2–2/2: موائع التثليج المخلوطة (الازيوتروب والزيوتروب).

رقم المائع	البنية (نسبة كتلية)	السماحية في البنية	درجة حرارة الزيوتروبك °C	الوزن لجزيئي	درجة الغليان الطبيعية °C	مجموعة الأمان
Zeotropes						
400	R-12/114 يجب ان توصف					A1
401A	R-22/152a/124 (53.0/13.0/34.0)	(±2/+0.5,–1.5/±1)				A1
401B	R-22/152a/124 (61.0/11.0/28.0)	(±2/+0.5,–1.5/±1)				A1
401C	R-22/152a/124 (33.0/15.0/52.0)	(±2/+0.5,–1.5/±1)				A1
402A	R-125/290/22 (60.0/2.0/38.0)	(±2/+0.1,–1/±2)				A1
402B	R-125/290/22 (38.0/2.0/60.0)	(±2/±0.1,–1/±2)				A1
403A	R-290/22/218 (5.0/75.0/20.0)	(+0.2,–2/±2/±2)				A1
403B	R-290/22/218 (5.0/56.0/39.0)	(+0.2,–2/±2/±2)				A1
404A	R-125/143a/134a (44.0/52.0/4.0)	(±2/±1/±2)				A1
405A	R-22/152a/142b/C318 (45.0/7.0/5.5/42.5)	(±2/±1/±1/±2)				
406A	R-22/600a/142b (55.0/4.0/41.0)	(±2/±1/±1)				A2
407A	R-32/125/134a (20.0/40.0/40.0)	(±2/±2/±2)				A1
407B	R-32/125/134a (10.0/70.0/20.0)	(±2/±2/±2)				A1
407C	R-32/125/134a (23.0/25.0/52.0)	(±2/±2/±2)				A1
407D	R-32/125/134a (15.0/15.0/70.0)	(±2/±2/±2)				A1
407E	R-32/125/134a (25.0/15.0/60.0)	(±2,±2,±2)				A1
408A	R-125-143a-22 (7.0/46.0/47.0)	(±2/±1/±2)				A1
409A	R-22/124/142b (60.0/25.0/15.0)	(±2/±2/±1)				A1
409B	R-22/124/142b (65.0/25.0/10.0)	(±2/±2/±1)				A1
410A	R-32/125 (50.0/50.0)	(+0.5,–1.5/+1.5,–0.5)				A1
410B	R-32/125 (45.0/55.0)	(±1/±1)				A1
411A	R-1270/22/152a (1.5/87.5/11.0)	(+0,–1/+2,–0/+0,–1)				A2
411B	R-1270/22/152a (3.0/94.0/3.0)	(+0,–1/+2,–0/+0,–1)				A2
412A	R-22/218/142b (70.0/5.0/25.0)	(±2/±1/±1)				A2
413A	R-218/134a/600a (9.0/88.0/3.0)	(±1/±2/±0,–1)				A2
414A	R-22/124/600a/142b (51.0/28.5/4.0/16.5)	(±2/±2/±0.5/±0.5,–1)				A1
414B	R-22/124/600a/142b (50.0/39.0/1.5/9.5)	(±2/±2/±0.5/±0.5,–1)				A1
415A	R-22/152a (82.0/18.0)	(±1/±1)				A2
415B	R-22/152a (25.0/75.0)	(±1/±1)				A2
416A	R-134a/124/600 (59.0/39.5/1.5)	(+0.5,–1/+1,–0.5/+1,–0.2)				A1
417A	R-125/134a/600 (46.6/50.0/3.4)	(±1/±1/±0.1,–0.4)				A1
418A	R-290/22/152a (1.5/96.0/2.5)	(±0.5/±1/±0.5				A2
419A	R-125/134a/E170 (77.0/19.0/4.0)	(±1/±1/±1)				A2
420A	R-134a/142b (88.0/12.0)	(±1,–0,+0,–1)				A1
421A	R-125/134a (58.0/42.0)	(±1/ ±1)				A1
421B	R125/134a (85.0/15.0)	(±1/±1)				A1
422A	R-125/134a/600a (85.1/11.5/3.4)	(±1/ ±1/+0.1,–0.4)				A1
422B	R-125/134a/600a (55.0/42.0/3.0)	(±1/ ±1/+0.1,–0.5)				A1
422C	R-125/134a/600a (82.0/15.0/3.0)	(±1/ ±1/+0.1,–0.5)				A1
423A	R-134a/227ea (52.5/47.5)	(±1/±1)				A1
424A	R-125/134a/600a/600/601a (50.5/47.0/0.9/1.0/0.6)	(±1/ ±1/+0.1,–0.2/+0.1, –0.2/+0.1,–0.2)				A1
425A	R-32/134a/227ea (18.5/69.5/12.0)	(±0.5/±0.5/±0.5)				A1
426A	R-125/134a/600a/601a (5.1/93.0/1.3/0.6)	(±1/ ±1/+0.1,–0.2/+0.1,–0.2)				A1
427A	R-32/125/143a/134a (15.0/25.0/10.0/50.0)	(±2/ ±2/±2/ ±2)				A1
428A	R-125/143a/290/600a (77.5/20.0/0.6/1.9)	(±1/ ±1/+0.1, –0.2/+0.1,–0.2)				A1
Azeotropes						
500	R-12/152a (73.8/26.2)		0	99.3	–33	A1
501	R-22/12 (75.0/25.0)[c]		–41	93.1	–41	A1
502	R-22/115 (48.8/51.2)		19	112.0	–45	A1
503	R-23/13 (40.1/59.9)		88	87.5	–88	
504	R-32/115 (48.2/51.8)		17	79.2	–57	
505	R-12/31 (78.0/22.0)[c]		115	103.5	–30	
506	R-31/114 (55.1/44.9)		18	93.7	–12	
507A	R-125/143a (50.0/50.0)		–40	98.9	–46.7	A1
508A	R-23/116 (39.0/61.0)		–86	100.1	–86	A1
508B	R-23/116 (46.0/54.0)		–45.6	95.4	–88.3	A1
509A	R-22/218 (44.0/56.0)		0	124.0	–47	A1

للتعرف على الرموز A1 الى A3 والرموز B1 الى B3 يرجى مراجعة الفصل 2–6.

3/2–2 المركبات اللاعضوية (Inorganic compounds)

إن موائع التثليج اللاعضوية هي مركبات طبيعية لاتحتوي في تركيبها الكيميائي على الكاربون مثل الماء والهواء والأمونيا وثنائي اوكسيد الكاربون وغيرها كما في الجدول (2–1/2). وكانت موائع التثليج هذه شائعة الاستعمال في التطبيقات الصناعية الأولى مطلع القرن العشرين ولكن بعد صناعة الهالوكاربونات في الثلاثينات من القرن الماضي قل استعمالها بصورة كبيرة. ولكن بسبب أزمة استنفاد طبقة الأوزون والاحترار العالمي حصل توجه عام للعودة الى هذه المركبات ومن أبرزها الأمونيا وثنائي أوكسيد الكاربون.

2-2/4 الخلائط (Mixtures)

خلائط موائع التثليج نوعان. الأول هو الأقدم ويسمى الأزيوتروب (azerotrope) وهو خليط متجانس من اثنين أو اكثر من موائع التثليج ذات درجات حرارة غليان مختلفة وبحيث لاتتغير نسبة الخلائط عند تبخره أو تكثفه تحت ضغط ثابت. أي ان الخليط لايتجزأ لمكوناته عند التبخر والتكثف وإنما يتبخر ويتكثف كمادة واحدة. ويرمز لخلائط الأيزوتروب بالأرقام R-500 فما فوق. أما النوع الثاني، وفيه غالبية الخلائط الجديدة البديلة لموائع التثليج المسببة لاستنفاد الأوزون أو الاحترار العالمي، فهو الزيوتروب (zeotrope) وهو مزيج يتألف من اثنين أو اكثر من مواد مختلفة التطاير (volatile) التي يتباين تركيبها (نسب الخلط) عند تبخرها (غليانها) أو تكثفها (تسييلها) عند ضغط معين. ويرمز لخلائط الزيوتروب بالأرقام R-400 فما فوق، ومكونات خليط أي زيوتروب هي موائع تثليج أصلاً. والزيوتروب البديل لا يحتوي عادةً على ذرات كلور في مكوناته. يبين الجدول (2-2/2) هذه الخلائط وبعض خواصها على وفق أحدث ما نشرته جمعية آشري.

2-3 أزمة طبقة الأوزون (Crisis of ozone layer)

تم رصد نقصان كمية الأوزون فوق القطب الجنوبي للكرة الأرضية بداية ربيع 1980 من خلال البحث والرصد في القطب الجنوبي. وأصبحت هذه الظاهرة معروفة في الأوساط العلمية وعند عامة الناس بعد ما قام ثلاثة علماء بريطانيين بنشر نتائج قياساتهم ومسوحهم للأوزون في منطقة القطب الجنوبي عام 1985. ثم أكدت قياسات الأقمار الصناعية حدوث انحلال في أوزون طبقة الستراتوسفير. وجاء مصطلح ثقب الأوزون ((Ozone hole نتيجة صور الأقمار الصناعية لطبقة الأوزون فوق منطقة القطب الجنوبي[7].

2-3/1 أهمية طبقة الأوزون البيئية والمناخية والصحية
(Environmental, climatic and healthy importance of ozone layer)

الأوزون غاز طبيعي موجود في الجو. وتتركب جزيئة الأوزون من اتحاد ثلاث ذرات من الأوكسجين، ويمثل بالصيغة الكيميائية O_3. ويتواجد الأوزون في منطقتين من الغلاف الجوي أولاهما طبقة التروبوسفير (troposphere) القريبة من سطح الأرض حيث يتواجد بنسبة بحدود 10%، في حين يتواجد بنسبة 90% الباقية في طبقة الستراتوسفير (stratosphere) التي تدعى بطبقة الأوزون (ozone layer) [7]. ويتراوح ارتفاع طبقة التروبوسفير من الأرض الى 11 كيلومتراً أو اكثر فوق سطح الأرض أما طبقة الستراتوسفير فارتفاعها يتراوح بين 11 الى 48 كيلومتراً فوق سطح الأرض. أما نسبة الأوزون في الهواء فهي بحدود 20 الى 100 جزيئة أوزون في البليون جزيئة هواء في طبقة التروبوسفير وترتفع الى 12000 جزيئة مقابل بليون جزيئة هواء في طبقة الستراتوسفير[8] .

يقوم الأوزون في طبقة الستراتوسفير بامتصاص الأشعة فوق البنفسجية الضارة بالصحة العامة والبيئة ويسمى بالأوزون المفيد (good ozone). أما أوزون طبقة التروبوسفير فيعد ملوثا للهواء ومؤذيا للصحة والبيئة. ويعد أوزون طبقة الستراتوسفير الدرع الواقي ضد الأشعة فوق البنفسجية الضارة بالحياة والبيئة.

تقسم الأشعة فوق البنفسجية (ultraviolet rays)، التي يرمز لها UV، الى ثلاثة أصناف بحسب أطوالها الموجية وطاقتها وهي UV-A وUV-B وUV-C. ويقوم الأوزون بامتصاص الجزء الأكبر من الأشعة فوق

البنفسجية من الصنف UV-B ويمتص بشكل تام الصنف UV-C. اما الأشعة من الصنف UV-A فلا يمتصها لأن أطوالها الموجية عالية وطاقتها التأينية واطئة. ويبين الجدول(2−1/3) خصائص هذه الأصناف الثلاثة[9].

إن تعرض الانسان والكائنات الحية الأخرى الى زيادة من الأشعة فوق البنفسجية ضار جدا بالانسان والحيوان والنبات لأنها حارقة. ويؤدي التعرض الطويل لها الى حرقة الشمس (sun burn) واسمرار الجلد، وتكرار اسمرار الجلد يؤدي الى شيخوخة الجلد المبكرة وفي الحالات الأسوأ الى سرطان الجلد بسبب اشعاع UV-A وUV-B. ويسبب اشعاع UV-B اعتام عدسة العين (تضبب العدسة). أما المشاكل الصحية الجلدية فلا تظهر إلا بعد عدة سنين. كما ان الأشعة UV-B تؤدي الى ضعف المناعة بغض النظر عن لون جلد الأنسان. كما تؤدي زيادة اشعاع UV-B الى قلة المحاصيل الزراعية والأذى للغابات. وقد تؤثر في الحياة البحرية بتسببها في الأذى للكائنات البحرية الحية الدقيقة من منظومة الطعام البحري، مما قد يؤدي الى تناقص الأسماك. كما ثبت انها تسبب تدهور خواص مواد البناء والأصباغ ومواد التغليف والمواد البلاستيكية ومواد كثيرة أخرى لا تحصى[9].

يمثل الأوزون القريب من سطح الأرض وفي طبقة التروبوسفير ملوثا مقلقا للبيئة والمناخ. إذ انه مكون للضباب الدخاني الضوئي الكيميائي (photo chemical smog) وكذلك المطر الحامضي. وترتفع نسبة غاز الاوزون في هذه الطبقة نتيجة فعاليات الانسان الصناعية. لذا فان العمل على تقليل الملوثات الكيميائية على سطح الأرض والحد من حرق الوقود الأحفوري سيؤدي الى تقليل المتحرر من أكاسيد النيتروجين NO_X وأكاسيد الكبريت SO_X، كما إن تناقص كمية المركبات العضوية المتطايرة يؤدي الى قلة كمية الاوزون المتكون بالقرب من سطح الأرض ومن ثم الحد من التلوث البيئي والامطار الحامضية [7].

الجدول 2-1/3: خصائص اصناف الأشعة فوق البنفسجية [9].

الصنف	طول الموجة (نانوميتر)	التفاعلات داخل الستراتوسفير ومعه	التأثير على البشر والنباتات وغيرها
UV-A	315/320 - 400	لا يمتص بقدر مؤثر من طبقة الأوزون الستراتوسفيرية	يحرق الجلد بنسبة 10-15% وله صلة محتملة بحدوث سرطان الجلد. مسؤول عن اسمرار الجلد وشيخوخته.
UV-B	280-315/320	يمتص من قبل الأوزون في الستراتوسفير. ويمتص الأوزون اشعاع UV بدون ان تقل كميته وتكون المحصلة النهائية هي تحول الاشعاع فوق البنفسجي الى حرارة	يحرق الجلد بنسبة 85-90% مؤديا الى أورام سرطانية حميدة وخبيثة ويرتبط كذلك بمرض الماء الأبيض. وله تأثيرات على نمو النباتات والحياة البحرية. الاشعاع القوي منه يقتل الأحياء المجهرية في الماء والتي هي مصدر الغذاء الرئيس للأسماك.
UV-C	200-280	يمتص بصورة كبيرة من قبل جزيئات الأوكسجين ليشترك في تكوين الأوزون	لا يعتقد أن له تاثيراً كبيراً والسبب الرئيس هو امتصاص معظم المتواجد منه في الارتفاعات العليا.

2-3/2 تآكل طبقة الاوزون (Ozone depletion)

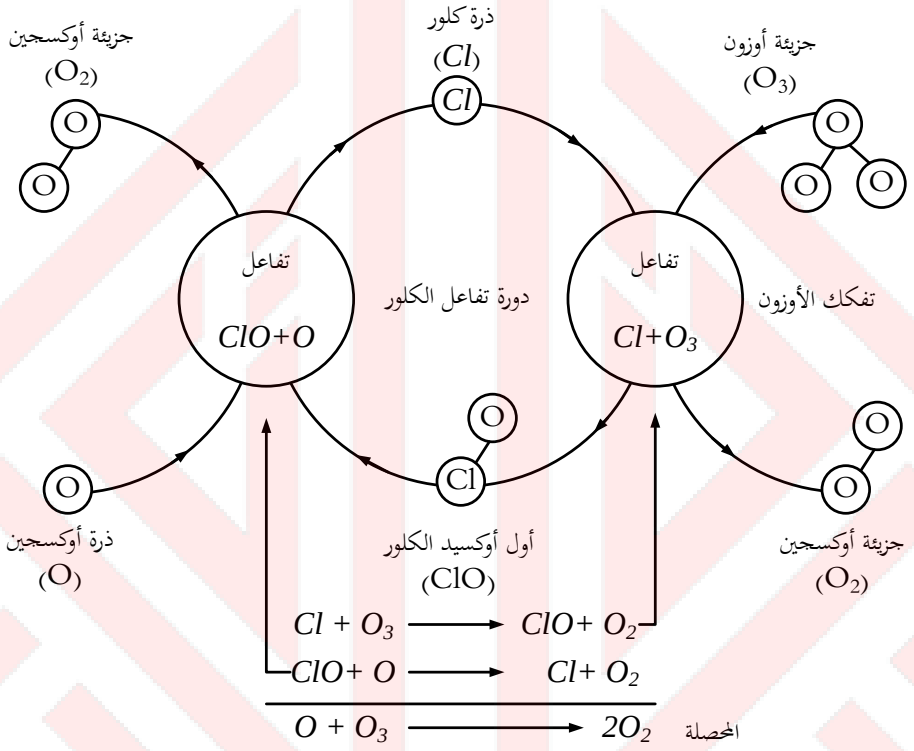
هناك اجماع عالمي يؤيد النظرية القائلة ان المواد الكيميائية المصنعة المحتوية على الكلور والبروم والمنبعثة الى الجو هي المسؤولة عن تآكل واستنفاد الأوزون في طبقة الستراتوسفير[9]. ويتحقق ذلك بأن تتفكك جزيئة الأوزون الثلاثية الى جزيئة أوكسجين اعتيادية وذرة أوكسجين حرة نتيجة سلسلة تفاعلات كيميائية ضوئية مع الكلور أو البروم أو أكاسيدهما في طبقة الستراتوسفير [7].

عند انبعاث مواد مصنعة تحتوي على الكلور أو البروم فانها تجد طريقها اولا الى طبقة التروبوسفير بفضل الرياح والتقلبات المناخية. وفي هذه الطبقة اما أن يسقط قسم منها مع الأمطار والثلوج الى الأرض أو ان يصعد بعضها بفعل تيارات الهواء الحار الصاعد الى طبقة الستراتوسفير. وبفعل الأشعة فوق البنفسجية ستنطلق ذرات حرة من الكلور أو البروم من مركباتها الأصلية. ثم تحصل سلسلة التفاعلات الكيميائية الضوئية بين هذه الذرات وأكاسيدها مع الأوزون مما يسبب تفكك الأوزون. وبامكان هذه الذرات الحرة ان تكرر سلسلة تفاعلاتها عدداً كبيراً من المرات مع الأوزون، ليحصل تفككه أسرع بكثير من عملية تكونه مما يؤدي الى استنفاده كمحصلة نهائية. كما ان عمر البقاء (life time) لذرات الكلور والبروم في طبقة الستراتوسفير يمتد الى عشرات السنين مسببا تآكلاً مستمرا لطبقة الأوزون ما دامت هذه الذرات موجودة. ويعود جزء كبير من هذه الذرات الى الأرض مرة ثانية مع الأمطار والثلوج.

يبين الشكل (2–1/3) ما يسمى بالدورة الأولى من تفكك الأوزون، حيث تكون المحصلة النهائية لتفاعل الأوزون مع ذرة الكلور هي تحول جزيئة أوزون مع ذرة اوكسجين الى جزيئتي أوكسجين اثنتين، أي:

$$O + O_3 \rightarrow 2O_2 \qquad (1/3\text{-}2)$$

ولايتكون الأوكسجين الذري (O) إلّا بوجود الأشعة فوق البنفسجية. وتكون شدة هذه الأشعة أعلى في المناطق الاستوائية والمتوسطة.



الشكل 2–1/3: دورة تفكك الأوزون الأولى [7].

هناك دورتان أخريان لأكاسيد الكلور والبروم تسببان تفكك الأوزون عند توافر أشعة الشمس في طبقة الستراتوسفير ولكنه لايحدث بكميات محسوسة [7]. ويبين الشكل(2–2/3) هاتين الدورتين اللتين تحصلان في المناطق القطبية غالباً أواخر الشتاء وبداية الربيع القطبي ومع إرتفاع درجة الحرارة عند عودة الشمس للشروق.

الدورة الثالثة

$$ClO + BrO \rightarrow Cl + Br + O_2$$
$$ClO + BrO \rightarrow BrCl + O_2$$
$$BrCl + \text{ضوء الشمس} \rightarrow Cl + Br$$
$$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$$
$$Br + O_3 \rightarrow BrO + O_2$$

المحصلة $2O_3 \rightarrow 3O_2$

Or

الدورة الثانية

$$ClO + ClO \rightarrow (ClO)_2$$
$$(ClO)_2 + \text{ضوء الشمس} \rightarrow ClOO + Cl$$
$$ClOO \rightarrow Cl + O_2$$
$$2(Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2)$$

المحصلة $2O_3 \rightarrow 3O_2$

الشكل 2–2/3: دورات تفكك الأوزون القطبية 2 و3 [7].

2-3/3 المواد المستنفدة للأوزون (Ozone Depleting Substance)

هناك الملايين من اجهزة التبريد والتثليج التي تستعمل الهيدروكاربونات المهلجنة في دوراتها الميكانيكية. وعند حصول عطل ما، أو تسرب من هذه الأجهزة تنطلق هذه المركبات الى الجو وهي تحتوي على ذرة كلور أو اكثر في تركيبها الكيميائي. وبالرجوع الى الجدول (2-1/2) يمكن معرفة عدد موائع التثليج التي تحتوي على هالوجين الكلور. اضافة الى موائع التثليج هناك ما يسمى الهالونات (halons) وهي مركبات تستعمل لاطفاء الحرائق الشديدة، كما في المركبات العسكرية والطائرات وغير ذلك، وهي تحتوي على الكلور. وهناك رباعي كلوريد الكاربون (CCl_4) الذي يستعمل مذيبا في المختبرات الكيميائية، وهناك بروميد الليثيوم (methyl bromide) الذي يستعمل في تعفير التربة وبعض المحاصيل الزراعية. وهناك البخاخات الطبية (aerosols) التي تحتوي على موائع هيدروكاربونية مهلجنة مضغوطة لدفع الدواء من البخاخ وبالخصوص R-11. كما تستعمل الهيدروكاربونات المهلجنة مثل R-11 في تصنيع الرغويات العازلة. وكل هذه المواد وغيرها عند انطلاقها الى الجو يصعد جزء منها بالتدريج الى طبقة الستراتوسفير حيث تتحرر ذرات الكلور والبروم التي تسبب تفكك جزيئات الأوزون وتآكل طبقة الأوزون بالتدريج.

تسمى جميع المواد المذكورة آنفاً وهي الأصناف الخمسة الرئيسة (موائع التثليج، والهالونات، وبروميد المثيل، والبخاخات الطبية، والرغويات)، الباعثة للكلور والبروم المواد المستنفدة للأوزون (ozone depleting substances – ODS's) وتصنف هذه المواد بحسب شدة أذاها لطبقة الأوزون على وفق متغير يسمى مكافئ استنفاد الأوزون (ozone depleting potential - ODP) وهو مؤشر للمقدار الذي يسببه منتج كيميائي في استنفاد الأوزون. وقد اعطيت قيمة مرجعية بالرقم 1 لقدرة مائعي التثليج R-11 وR-12 على استنفاد الأوزون. فمثلا اذا كانت قيمة ODP لأحد المنتجات 0.5 فان وزنا معينا من هذا المنتج متطايراً في الجو سيسبب تلف نصف الكمية من الأوزون التي يتلفها الوزن نفسه من R-11. ويحسب ODP من نماذج رياضية تأخذ بالحسبان تأثيرات متعددة مثل استقرار تركيبة المنتج ومعدل الانتشار وكمية الذرات التي تستنفدها جزيئة واحدة وتأثير الأشعاع فوق البنفسجي والاشعاعات الأخرى على الجزيئات [9]. ويبين الجدول(2-2/3) قيم مكافئ استنفاد الأوزون ODP لأكثر موائع التثليج استعمالا اضافة الى مكافئ الاحترار العالمي (global warming potential - GWP) لهذه الموائع[5]. وقد أعطيت قيمة مرجعية مقدارها 1 لمكافئ الاحترار العالمي لغاز ثنائي أوكسيد الكاربون لتقاس قابلية بقية الغازات نسبة اليه وعلى وفق ما تسببه في إحترار (إحتباس حراري) وفيما اذا كانت تعتبر غازات دفيئة (Greenhouse gases – GHG) تساهم في حصول ظاهرة الاحترار العالمي (global warming GW) او الاحتباس الحراري.

الجدول 2-2/3: مكافئ استنفاد الأوزون ومكافئ الاحترار العالمي لموائع التثليج[1].

الخواص البينية لمانع التثليج			
مانع التثليج	عمر البقاء في الجو (Atmospheric Lifetime, year)	مكافئ استنفاد الاوزون (ODP)	مكافئ الاحترار العالمي (GWP_{100})
R-ll	45	1	4750
R-12	100	1	10 900
R-13	640	1	14 400
R-22	12	0.055	1810
R-23	270	0	14 800
R-32	4.9	0	675
R-113	85	0.8	6130
R-114	300	1	10 000
R-115	1700	0.6	7370
R-116	10 000	0	12 200
R-123	1.3	0.02	77
R-124	5.8	0.022	609
R-125	29	0	3500
R-134a	14	0	1430
R-141b	9.3	0.11	725
R-142b	17.9	0.065	2310
R-143a	52	0	4470
R-152a	1.4	0	124
R-218	2600	0	8830
R-227ea	34.2	0	3220
R-236fa	240	0	9810
R-245ca	6.2	0	693
R-245fa	7.6	0	1030
R-C318	3200	0	10 300
R-744	Variable	0	1
R-290	0.41	0	~20
R-600	0.018	0	~20
R-600a	0.019	0	~20
R-601a	0.01	0	~20
R-717	0.01	0	1<
R-1270	0.001	0	~20

2-3/4 اتفاقية فيينا وبروتوكول مونتريال (Vienna convention and Montreal protocol)

لقد كانت إتفاقية فينا أول معاهدة ذات طابع دولي لحماية طبقة الاوزون من التآكل. وتبعها بعد سنتين بروتوكول مونتريال ليضع ضوابط الآليات التي تقيد انتاج واستعمال المواد المستنفدة للأوزون.

2-3/4/1 اتفاقية فيينا (Vienna convention)

في مارس (آذار) عام 1985 عقد أول مؤتمر يهدف الى حماية طبقة الأوزون في مدينة فيينا عاصمة جمهورية النمسا. ووقع على وثيقة المؤتمر عشرون دولة ألزمت أنفسها باجراءات لحماية طبقة الأوزون من تأثيرات النشاط الصناعي للإنسان وبالخصوص الحد من انبعاثات المواد المستنفدة للأوزون. وقد مهدت هذه الاتفاقية الطريق الى بروتوكولات مستقبلية ومنهجية محددة للتعديلات ولفض النزاعات التي قد تنشأ جراء تخفيض الانبعاثات في الدول الموقعة على الاتفاقية وغيرها من الدول.

2-3/4/2 بروتوكول مونتريال (Montreal protocol)

توصلت الدول الموقعة على اتفاقية فيينا الى اتفاق حول الاجراءات المحددة الواجب اتخاذها بخصوص المواد المستنفدة للأوزون وتم توقيع بروتوكول مونتريال في سبتمبر (أيلول) عام 1987. وفي ظل هذا البروتوكول اتخذت الخطوة الأساسية الأولى لحماية طبقة الأوزون، حيث تم تحديد تقليل انتاج واستهلاك بعض المواد الكاربونية الفلورية الكلورية CFC's بنسبة 50% في العام 1999. وتوالى انضمام دول العالم الى هذا البروتوكول بحيث أصبح مجموعها 195 دولة عام 2009.

وقد ظهرت تعديلات عديدة متوالية لهذا البروتوكول مع اتساع نطاق تطبيقه وظهور تحديات جديدة. ولايزال العمل جارياً في هذا البروتوكول، حيث يجتمع ممثلو الدول الأعضاء دوريا كل عام لمراجعة ومتابعة تنفيذ

التزامات الدول بفقراته ولاقرار التوصيات والتعديلات الضرورية. وقد تم انشاء مايسمى الصندوق متعدد الأطراف (multilateral fund) الذي يمول من الدول الصناعية بصورة أساس، ويقدم الدعم المادي لمشاريع الدول المنضوية في البروتوكول لتمكينها من الالتزام ببنود البروتوكول، وذلك بتحديد استهلاك المواد المستنفدة للأوزون وتحويل الصناعات الى بدائل صديقة للأوزون ونقل التكنولوجيا المتعلقة بالبدائل صديقة الاوزون.

2-3/4/3 نشاط العراق في حماية طبقة الأوزون (Iraq activity to protect ozone layer)

انضم العراق الى بروتوكول مونتريال واصبح طرفاً فيه في أيلول عام 2008 وكان تسلسله الدولة 193. ومنذ ذلك الحين قامت وزارة البيئة العراقية بانشاء وحدة الأوزون الوطنية ووحدة ادارة المشاريع التي تعنى بمتابعة وتنفيذ المشاريع الخاصة بالأوزون تحت رعاية منظمتي برنامج الأمم المتحدة للبيئة UNEP ومؤسسة التنمية الصناعية للامم المتحدة UNIDO. وقد شكلت العديد من اللجان ضمت عدد كبير من ممثلي الوزارات ذات العلاقة حيث قامت هذه اللجان بمسح وطني شامل للمواد المستنفده للأوزون بجميع اصنافها ووضع الخطة الوطنية لازالة هذه المواد والاستعانة بالخبرات الوطنية والدولية لتحقيق هدف إلتزام العراق بخطة التخلص التدريجي من المواد المستفدة للاوزون.

شمل نشاط العراق في هذا المجال ومن خلال وزارة البيئة اعداد مسودة تشريع للسيطرة على استعمال وتداول المواد المستنفدة للوزون واعداد تفاصيل تحديثات مناهج المؤسسات التعليمية (فني ومهني وأكاديمي) فيما يخص المواد المستنفدة للأوزون وبدائلها وتكنولوجيا ادخالها في حقل العمل واستعمالها نظريا وتطبيقيا، ووضع برامج طويلة الأمد لتدريب الملاكات الفنية في مشاغل تصليح أجهزة التثليج في العراق على المواد البديلة وتقنيات الحفاظ على البيئة ومنع طرح موائع التثليج الى الجو. وهنالك نشاط استثماري في تحويل الصناعات الرغوية الى استعمال بدائل صديقة للأوزون في عمليات تصنيع الرغويات. اضافة الى خطة لتأسيس ثلاثة مراكز لاسترجاع وتدوير واعادة تأهيل موائع التثليج المستنفدة للأوزون وتأسيس عشرة مراكز تدريبية في عموم العراق مع تجهيزها بالأجهزة والامكانيات المادية لتنفيذ برنامج تدريب لجميع فنيي مشاغل تصليح أجهزة التثليج وعلى مدى سنتين أو اكثر مع حوافز تشجيعية وشهادات تأهيلية للمتدربين.

كما قامت وزارة البيئة بجرد الهالونات وبروميد المثيل ورابع كلوريد الكاربون ومعرفة المخزون منها في جميع المؤسسات ذات العلاقة. وتهدف جميع هذه الأنشطة الى أن يلتزم العراق بفقرات بروتوكول مونتريال التي تخصه كدولة نامية ومنع استعمال المواد المستنفدة للأوزون ونشر ثقافة المواد والتقنيات البديلة على مستوى الاستعمال العام والصناعي والزراعي والاستيرادي ونشاطات تصليح أجهزة التثليج.

2-4 التصنيف الجديد لموائع التثليج (The new classification of refrigerants)

2-4/1 تقديم (Introduction)

يضم قطاع التثليج باختلاف تطبيقاته الجزء الأعظم من المواد المستنفدة للاوزون متمثلة بموائع التثليج الحاوية على الكلور. وتعد اطلاقات هذه الموائع الى الجو نتيجة التسربات في أجهزة التثليج واعمال الصيانة أحد المسببات الرئيسة في تصاعد الكلور الى طبقة الستراتوسفير مسببة تآكل طبقة الأوزون. وللتفريق بين موائع التثليج المستنفدة للاوزون وموائع التثليج الصديقة للأوزون استعملت التركيبة الكيميائية لعوائل موائع التثليج لتسميتها بدلا من حرف R الذي يطلق على جميع تلك الموائع. وستسمى هذه المركبات الكيميائية بالتسميات المعتمدة في نشريات منظمات الأمم المتحدة مثل برنامج الأمم المتحدة للبيئة UNEP مع ذكر التسميات الشائعة.

2-4/1/1 المركبات الكاربونية الفلورية الكلورية (الكلوروفلوروكاربون)

(Chloro Flouro Carbon – CFC–)

وهي مركبات هيدروكاربونية مهلجنة كليا تحتوي على ذرات الكاربون والفلور والكلور فقط، كما يدل اسمها عليها. وهي مواد مستنفدة للأوزون (ODS) وغازات دفيئة في آن واحد. من أبرز موائع التثليج هذه CFC-11 وCFC-12 وCFC-113 وCFC-114 وCFC-115 التي اشترط بروتوكول مونتريال بتعديلاته قيام الدول المنضوية فيه بالتخلص التدريجي منها بحلول عام 2000 ووقف انتاجها صناعيا عالميا عام 2010 [9].

2-4/1/2 مركبات الهيدروكاربون الفلورية الكلورية (الهيدروفلوروكلوروكاربون)

(Hydro Flouro Chloro Carbon – HCFC–)

وهي مركبات هيدروكاربونية مهلجنة جزئيا وتحتوي على ذرات الهيدروجين والكاربون والفلور والكلور فقط. ولأن هذه المركبات تحتوي على ذرات الكلور فهي تسهم في استنفاد الأوزون وهي أيضا ضمن الغازات الدفيئة. ومن ابرز موائع التثليج هذه HCFC-22. لم تكن هذه الموائع خاضعة للازالة في بروتوكول مونتريال الأصلي، ولكن ظهرت تعديلات بعد عام 2000 للتخلص التدريجي من HCFC-22 بحلول عام 2030.

2-4/1/3 مركبات الهيدروكاربون الفلورية (الهيدروفلوروكاربون) (Hydro Flouro Carbon – HFC–)

وهي مركبات هيدروكاربونية مهلجنة تحتوي على ذرات الهيدروجين والكاربون والفلور فقط. ولأن موائع التثليج هذه لا تحتوي على الكلور أو البروم أو اليود فهي لا تستنفد طبقة الاوزون. ولكنها كغيرها من الهيدروكاربونات المهلجنة غازات دفيئة قوية. ومن أبررزها HFC-23 وHFC-134a وHFC-152a. وموائع التثليج هذه كغيرها خاضعة للازالة التدريجية في بروتوكول مونتريال وتستعمل لتركيب موائع التثليج الزيوتروبية البديلة بنسب خلط مختلفة.

2-4/1/4 الهيدروكاربونات (Hydro Carbons- HC–)

وهي مركبات طبيعية (غير مصنعة) تتألف من ذرة كاربون واحدة او اكثر محاطة بذرات الهيدروجين التي يتناسب عددها مع عدد ذرات الكاربون. ومن ابرزها الميثان HC-50 والايثان HC-170 والبروبان HC-290 والبيوتان HC-600. لأنَّ هذه المركبات صديقة للبيئة وليست دفيئة فهناك عودة لاستعمالها والتوسع في

تطبيقاتها. اذ كانت قد تركت في النصف الثاني من القرن العشرين وقل استعمالها بسبب قابليتها للاشتعال والانفجار ووجود هيدروكاربونات أخرى أكثر أماناً وأفضل ملاءمة.

2-4/1/5 موائع التثليج الطبيعية (Natural refrigerants)

وهي مركبات موجودة في الطبيعة وغير مصنعة لأغراض جعلها موائع للتثليج. وجميعها بأرقام تسلسل 7XX وابرزها الماء R-718 والهواء R-727 والأمونيا R-717 وثنائي أوكسيد الكاربون R-744. وهناك عودة لاستعمال موائع التثليج هذه لكونها غير ضارة بيئيا ولا تستنفد الأوزون ولكن ثنائي أوكسيد الكاربون غاز دفيء وهو المرجع المكافئ للاحترار العالمي.

2-4/1/6 الأوليفينات (Olefins)

وهي مركبات هيدروكاربونية أثيلينية غير مشبعة تحتوي على زوج او اكثر من ذرات الكاربون ذات الرابطة المزدوجة. والنوع الأكثر شيوعا في حقل التثليج هو الأوليفين الأحادي (mono olefin) ومعادلته الكيميائية C_nH_{2n} حيث n عدد الأوليفنات في أثناء عملية تكرير النفط الى البنزين. واكثر الأوليفينات استعمالا هو الأثيلين (ethylene) والبروبلين (propylene) والبيوتلين (butylene) [10]. ويظهر الأثيلين برقم R-1150 والبروبلين برقم R-1270 أسفل الجدول (2-1/2). الأوليفينات نادرة الاستعمال في صناعة التثليج ولكن لأنها لاتحتوي على الكلور هناك توجه لايجاد استعمالات لها أو في خلائط موائع تثليج بديلة. وظهر في الآونة الأخيرة النوعان R-1234yf و R-1234 ze كمائعي تثليج قابلين للاستعمال في منظومات تكييف هواء وسائط النقل. ومن غير المحتمل أن يلاقيا رواجاً في استعمالات اخرى لسنين عديدة [9]. وتمتاز الاوليفينات أن مكافئ استنفاد الأوزون لها يساوي صفراً.

2-5 البدائل الصديقة للبيئة (Environmental friendly alternatives)

تطلب بروتوكول مونتريال الوقف التدريجي لاستعمال موائع التثليج من النوعين CFC و HCFC. ولذلك دأبت صناعة التثليج وتكييف الهواء مع شركات الصناعات الكيميائية خلال العقود الثلاثة الماضية على ايجاد موائع التثليج البديلة الصديقة للأوزون والبيئة وكذلك توطين التكنولوجيا المصاحبة لعمليات الاستبدال. وكانت النتائج الاولى انتاج خلائط مع مائع التثليج HCFC-22 ومن ثم خلائط بين موائع التثليج من النوع HFC الخالية تماماً من الكلور. وكان البديل R-134a أكثرها استعمالاً كبديل لمائع التثليج CFC-12 واسع الاستعمال. ثم ظهرت الخلائط الزيوتروبية R-404 و R-410 بداية الأمر ثم اتسعت أنواعها كما مبين في الجدول (2-2/2). ومن الضروري جداً أن يكون مكافئ استنفاد الأوزون ODP للبدائل واطئاً جدا وكذلك مكافئ الاحترار العالمي GWP, ولكن الاثنين لا يجتمعان هكذا لمعظم البدائل.

يمكن تقسيم موائع التثليج البديلة الى ثلاثة انواع [8].

1- مائع تثليج استيعاضي (drop in): وهو المائع البديل الذي يمكن استعماله في منظومات قائمة بدون الحاجة الى تغيير أجزاء في المنظومة أو الكثير من الأعمال. ولكن قد يحتاج الاستيعاض الى تبديل المرشح المجفف في المنظومة.

2- مائع تثليج اعادة تهيئة (retrofit): وهو المائع البديل الذي يمكن استعماله في منظومات قائمة بعد اجراء تغييرات معينة، مثل استبدال الزيت بنوع جديد وتغيير سرعة دوران الضاغط.

3- مائع تثليج غير قابل لاعادة التهيئة (non-retrofittable): وهي موائع التثليج التي لا يمكن استعمالها في منظومات قائمة حتى لو أجريت تعديلات كبيرة على المنظومة. وذلك بسبب إختلاف ضغوط التكثيف والتبخر بين المائع الأصل والبديل وإحتمال عدم التوافق مع المعادن المكونة للمنظومة ومشاكل اخرى محتملة.

لا تزال عملية إختبار واختيار موائع التثليج البديلة الصديقة للأوزون والبيئة جارية. وليس هناك إجماع عالمي على أي منها الأفضل لموائع التثليج من النوع CFC، سوى R-134a بديلا لمائع التثليج CFC-12. ولكن مائع التثليج R-134a ذو مكافئ احترار عالمي مرتفع. لذا فهو في طريقه الى الاستبدال كذلك ويمكن تسميته في الوقت الحاضر كمائع تثليج انتقالي. يبين الجدول (2-1/5) البدائل الكثيرة الممكنة لموائع التثليج من النوعين CFC وHCFC سواءً الانتقالي منها (transitional) أو الأطول امداً (longer term) أو البدائل المستعملة في المنظومات الجديدة (new system). كما يبين الجدول (2-2/5) أن معظم الخلائط من سلسلة أربعمائة وخمسمائة ذات مكافئ احترار عالمي عالٍ وهذا غير ملائم للبيئة وظاهرة الاحترار العالمي. لذا تستمر الجهود البحثية والصناعية لايجاد موائع تثليج صديقة للأوزون في وقت واحد وهذا هو سبب التوجه الى الهيدروكاربونات HC وموائع التثليج الطبيعية من سلسلة سبعمائة.

الجدول 2-1/5: البدائل الانتقالية والدائمة لموائع التثليج.

موائع تثليج حديثة	مائع تثليج اعادة تهيئة/ مائع تثليج استيعاضي		منظومات تقليدية	الاستعمال
	طويلة الأمد	انتقالية		
R134a, R600a*	R426A, R430A, R435A, R436A*, R436B*, R437A	R401A, R401C, R405A, R406A, R414A, R414B, R415B	R12	التثليج المنزلي
R600a*, R134a, R423A, R435A, R436A*, R436B*, R510A	R426A, R429A (HT), R430A, R435A, R436A*, R436B*, R437A (LT)	R401A, R401C, R405A, R406A, R409A (HT), R414A, R414B, R415B, R416A (HT), R420A (HT)	R12	عارضة مواد غذائية مستقلة تستعمل للبيع بالتجزئة
R290*, R404A, R407A/B/D/E, R421A, R421B, R427A, R433A/B/C, R507A, R744	R290*, R417A, R419A (HT), R422B, R422D, R424A, R431A, R438A	R408A (HT), R411A, R411B, R412A, R415A, R418A	R22, R502	
R404A, R407A/B/D/E, R421A, R421B, R427A, R433A/B/C, R507A, R744	R417A, R419A (HT), R422B, R422D, R424A, R431A, R438A	R408A (HT), R411A, R411B, R412A, R415A, R418A	R502	وحدة تكثيف
R404A, R407A/B/D/E, R421A, R421B, R427A, R433A/B/C, R507A, R744, Indirect systems (using R290*, R1270*, R717*)	R417A, R419A (HT), R422B, R422D, R424A, R431A, R438A	R408A (HT), R411A, R411B, R412A, R415A, R418A	R22 R502	منظومات كبيرة تستعمل في الاسواق لمركزية

تتمة الجدول 2-1/5

الاستعمال	منظومات تقليدية	مائع تثليج اعادة تهيئة/ مائع تثليج استيعاضي		موائع تثليج حديثة
		انتقالية	طويلة الأمد	
مخازن مبردة	R502 R22 R717	R408A (HT), R411A, R411B, R412A, R415A, R418A	R417A, R419A (HT), R422B, R422D, R424A, R431A, R438A	R404A, R407A/B/D/E, R421A, R421B, R427A, R433A/B/C, R507A, R744, Indirect systems (using R290*, R1270*), R717*
التثليج في العمليات الصناعية	R22 R502 R717 R290/ R1270	R408A (HT), R411A, R411B, R412A, R415A, R418A	R417A, R419A (HT), R422B, R422D, R424A, R431A, R438A	R404A, R407A/B/D/E, R421A, R421B, R427A, R433A/B/C, R507A, R744, Indirect systems (using R290*, R1270*), R717*
النقل المثلج	R12	R401A, R401C, R405A, R406A, R409A (HT), R414A, R414B, R415B, R416A (HT), R420A (HT)	R426A, R429A (HT), R430A, R435A, R436A*, R436B*, R437A (LT)	R134a, R423A, R435A, R436A*, R436B*, R510A
	R502, R22	R408A (HT), R411A, R411B, R412A, R415A, R418A	R290*,R417A, R419A (HT), R422B, R422D, R424A, R431A, R438A	R404A, R407A/B/D/E, R421A, R421B, R427A, R433A/B/C, R507A, R744, R290*, R1270*
منظومات تكييف منفصلة أو مركزية	R22	R408A, R411A, R411B, R412A, R415A, R418A	R290*,R417A, R419A, R422B, R422D, R424A, R431A, R438A	R407A/C/D/E, R421A, R427A, R433A/B/C, R290*, R1270*, R410A
منظومات تكييف شباك او المكيفات المحموله	R22	R408A, R411A, R411B, R412A, R415A, R418A	R290*,R417A, R419A, R422B, R422D, R424A, R431A, R438	R407A/C/D/E, R421A, R427A, R433A/B/C, R290*, R1270*, R410A
مضخات حرارية	R22	R408A, R411A, R411B, R412A, R415A, R418A	R290*,R417A, R419A, R422B, R422D, R424A, R431A, R438A	R407A/C/D/E, R421A, R427A, R433A/B/C, R744, R290*, R1270*, R410A
مثلجات ماء	R11 R123	None	None	R236ea, R236fa, R245fa
	R12	R401A, R401C, R405A, R406A, R409A, R414A, R414B, R415B, R416A, R420A	R426A, R429A, R430A, R435A	R134a, R423A, R435A
	R22	R408A, R411A, R411B, R412A, R415A, R418A	R290*,R417A, R419A, R422B, R422D, R424A, R431A, R438A	R407A/C/D/E, R421A, R427A, R433A/B/C, R744, R290*, R1270*, R410A
R407A/C/D/E, R421A, R427A, R433A/B/C, R744, R290*, R1270*, R410A	R12	R401A, R401C, R405A, R406A, R409A, R414A, R414B, R415B, R416A, R420A	R426A, R429A, R430A, R435A, R436A*, R436B	R134a, R744

*مائع قابل للاشتعال

الجدول 2-5/2: مكافئ الاحترار العالمي لخلائط الزيوتروب والازيوتروب.

مكافيء الاحترار العالمي(GWP_{100}*)	مكافيء استنفاد الاوزون(ODP*)	رقم مائع التثليج	مكافيء الاحترار العالمي(GWP_{100}*)	مكافيء استنفاد الاوزون(ODP*)	رقم مائع التثليج
550	0.013	415B	1200	0.033	401A
1100	0.008	416A	1300	0.036	401B
2300	0.000	417A	930	0.027	401C
1700	0.048	418A	2800	0.019	402A
3000	0	419A	2400	0.030	402B
1500	0.008	420A	3100	0.038	403A
2600	0	421A	4500	0.028	403B
3200	0	421B	3900	0	404A
3100	0	422A	5300	0.026	405A
2500	0	422B	1900	0.056	406A
3100	0	422C	2100	0	407A
2700	0	422D	2800	0	407B
2300	0	423A	1800	0	407C
2400	0	424A	1600	0	407D
1500	0	425A	1600	0	407E
1500	0	426A	3200	0.024	408A
2100	0	427A	1600	0.046	409A
3600	0	428A	1600	0.045	409B
8100	0.738	500	2100	0	410A
4700	0.250	502	1600	0.044	411A
15 000	0.599	503	1700	0.047	411B
4000	0	507A	2300	0.053	412A
13 000	0	508A	2100	0	413A
13 000	0	508B	1500	0.043	414A
5700	0.022	509A	1400	0.039	414B
			1500	0.028	415A

* قيم مكافيء استنفاد الاوزون ومكافيء الاحترار العامي من المرجع Calm and Hourahan (2007) وتم حسابهما اعتمادا على معدل الكتلة لكل مادة على انفراد.

2-5/1 الاحترار العالمي وموائع التثليج الإنتقالية (Global warming and alternative refrigerant)

شاع استعمال موائع التثليج HCFC وخلائط CFC مع HCFC كبديل لموائع التثليج الخمسة التالية: CFC-11, 12, 113, 114, 115 وكذلك HFC-134a بديلا جيدا للمائع CFC-12. ولكن بمراجعة الجدولين (2-2/3) و(2-2/5) نجد ان مكافيء الاحترار العالمي (Global Warming Potential – GWP) لهذه البدائل ذو قيم عالية تساعد على تزايد ظاهرة الاحترار العالمي لأنها غازات دفيئة. وهنالك مساعٍ حالية لوقف استعمال مائع التثليج HFC-134a بسبب مكافئه العالي للاحترار والعودة بدلاً منه الى الأزوبيوتان HC-600a في الثلاجات والمجمدات وما شابه. لذلك تسمى موائع التثليج هذه، التي ظهرت في عقدي الثمانينات والتسعينات من القرن العشرين أنها موائع تثليج انتقالية.

يعرف مكافيء الاحترار العالمي GWP أنه دليل يقارن التأثير المناخي لأي انبعاث لغاز دفيء نسبة الى الانبعاثات الصادرة عن كمية مماثلة من ثنائي أوكسيد الكاربون. وتحدد قيمة الاحترار العالمي نسبة التأثير الاشعاعي المتكامل زمنيا والناشئ عن انبعاث نبضة قدرها 1 كغم من مادة معينة نسبة الى ما ينبعث من 1 كيلوغرام من ثنائي أوكسيد الكاربون على امتداد افق زمني ثابت [9]. ويختلف الأفق الزمني من مصدر علمي الى آخر فمنهم من يأخذه عشرين سنة وآخرون مئة سنة والبعض خمسمائة سنة. ذلك لأن العمر الزمني (Lifetime) بغاز ثنائي أوكسيد الكاربون أكثر من 200 سنة وهكذا فإن مقارنة غاز ذي عمر زمني قصير بثنائي أوكسيد الكاربون ولأفق زمني قصير ستضخم تأثير ذلك الغاز نسبة الى ثنائي أوكسيد الكاربون والعكس صحيح للأفق الزمني الطويل. وتبين المقارنة في الجدول (2-3/5) القيم المتباينة لمكافئ الاحترار العالمي بحسب طريقة حسابه في المراجع العلمية المختلفة [8].

الجدول 2-3/5: مكافئ الاحترار العالمي لمدد زمنية مختلفة.

مكافيء الاحترار العالمي	CO_2	CH_4	CFC-11	CFC-12	HCFC-22	HFC-134a
20 سنة	1	63	4500	7100	4100	3200
100 سنة	1	21	3500	5300	1500	1200
500 سنة	1	9	1500	4500	510	420

أما ظاهرة الاحترار العالمي فهي ظاهرة تحصل مع الغازات الدفيئة في الجو مثلما تحصل مع الهواء داخل البيوت الزجاجية. حيث يسمح الزجاج في البيوت الزجاجية بدخول اشعة الشمس ولكنه يمنع الاشعاع طويل الموجة الحراري من الخروج وبذلك يدفأ البيت الزجاجي. وتسمى الغازات في جو الأرض التي تؤدي فعلاً مماثلاً لذلك بالغازات الدفيئة (Green House Gases – GHG). وهذه الغازات ليست النيتروجين أو الأوكسجين وإنما الغازات ضئيلة الوجود في الهواء مثل بخار الماء وثنائي أوكسيد الكاربون والأوزون. ومن الغازات المصنعة ذات الطبيعة الدفيئة الميثان CH_4 وأوكسيد النيتروجين N_2O والهيدروكاربونات المهلجنة وأهمها موائع CFC [8].

2-6 الخواص الفيزيائية والحرارية لموائع التثليج (Thermo physical properties of refrigerants)

احتوى الفصل 2-1 على الخواص المرغوبة لموائع التثليج وكان من ضمنها خصائص فيزيائية وحرارية. وهناك تداخل في بعض الخواص حيث يمكن تسميتها فيزيائية وحرارية. ولنقل أن الخواص الفيزيائية المرغوبة في مائع التثليج هي درجة حرارة غليان واطئة لكي يحصل فعل التثليج مع درجة حرارة حرجة مرتفعة لكي يمكن تكثيف بخاره بضغوط معتدلة، وحرارة نوعية واطئة للسائل لتقليل تذريره عند خفض الضغط فجأة في أداة التمدد وهكذا.

أما الخصائص الحرارية المهمة لمائع التثليج فهي حرارة كامنة للتبخر عالية لامتصاص أكبر قدر من الحرارة لوحدة الكتلة. وحجم نوعي واطئ للبخار لتصغير حجم الضخ في مكابس الضاغط أو في الضواغط الأخرى، ومعامل انتقال حرارة عالٍ لزيادة انتقال الحرارة بين مائع التثليج وأنابيب المبخر والمكثف.

وهناك خواص أخرى مرغوبة مثل لزوجة واطئة وموصلية كهربائية قليلة ودرجة انجماد واطئة جدا ولو كان له لون لكان أفضل اذ عند حصول تسرب، سيمكن رؤية موقع التسرب، وليس له القابلية لامتصاص بخار الماء أو غيره من الأبخرة.

هناك خصائص فيزيائية أخرى تشمل قابلية مائع التثليج على الاشتعال والانفجار وعلى السمية للبشر. وتسمى هذه بخصائص الأمان. ويرمز الى السمية بالحرف A الذي يعني قليل السمية وB ويعني أكثر سمية. أما قابلية الاشتعال والانفجار او الاتقاد (flammability) فيرمز لها بالأرقام. فالرقم 1 يعني انعدام انتشار اللهب والرقم 2 اتقادية واطئة والرقم 3 يعني اتقادية عالية. واستنادا الى ذلك تصنف موائع التثليج بواحد من ستة أصناف أمان تبعا لسميتها واتقادها وذلك بالحرف A أو B متبوعا بواحد من الأرقام الثلاثة. ويستند هذا التصنيف الى مواصفات أمان عالمية ووطنية متعددة ويبين الجدول (2-1/6) هذه التصانيف الستة[9] وهي تصانيف أمان على وفق المواصفة ISO 817 و EN 378 ومواصفة آشريASHRAE المرقمة 34. يمكن ملاحظة هذه التصانيف لموائع التثليج في الجدولين (2-1/2) و(2-2/2).

الجدول 2-1/6: تصنيف موائع التثليج بحسب خصائص الأمان.

قابلية المائع على الإشتعال	سمية عالية	سمية واطئة
اتقادية عالية	B3	A3
اتقادية واطئة	B2	A2
انعدام انتشار اللهب	B1	A1

2-1/6 جداول ومخططات موائع التثليج شائعة الاستعمال في العراق

(Tables and charts of refrigerants commonly used in Iraq)

تدرج الخواص الحرارية لمائع التثليج المشبع سواء كان سائلا أم بخارا في جداول مماثلة لجداول بخار الماء المشبع. اذ تدرج الخواص نسبة الى تسلسل متدرج لدرجات الحرارة (وما يقابله من ضغط التشبع) أو تدرج للضغط (وما يقابله من درجات حرارة التشبع). وتدرج هذه الجداول قيم حجم التشبع للسائل والبخار والمحتوى الحراري (انثالبي enthalpy) للسائل المشبع والبخار المشبع وكذلك الاختلاج (انتروبي entropy) للسائل المشبع والبخار المشبع. وهذه هي أهم الخواص، وهناك خواص أخرى مدرجة.

بالرجوع الى المرجع [5] يمكن ايجاد جميع موائع التثليج المعروفة. وهو المرجع المعتمد الرئيس لهذه الجداول والمخططات عالميا. ونكتفي هنا باعطاء جداول ومخططات موائع التثليج شائعة الاستعمال في العراق وهي HCFC-22 و HFC-134a وزيوتروب R-404A و R-407C و R-410A.

أما المخططات الخاصة بموائع التثليج فتسمى مخططات الضغط – المحتوى الحراري (pressure – enthalpy) أو مخططات موليير (Mollier chart). وقد أختيرت هاتان الخاصيتان في دورة التثليج الانضغاطية لكون الضغط سهل القياس وهناك عمليتان ثابتتا الضغط في دورة التثليج الانضغاطية هما التكثيف والتبخر مع العلم ان عملية تمدد سائل مائع التثليج عبر أداة التمدد تحصل بمحتوى حراري ثابت. ويحتوي المخطط على منحنيات درجات الحرارة والانتروبي والحجم النوعي. وبمعرفة أي خاصيتين من هذه الخواص، وخاصة درجة الحرارة والضغط، يمكن تعيين الحالة لدورة التثليج على المخطط وتحليل أدائها ومعرفة خصوصيات عملها ومكامن الخلل ان وجد.

تعطي الجداول (2-2/6) الى (2-6/6) خواص موائع التثليج الخمسة المذكورة آنفاً. والأشكال (2-1/6) الى (2-5/6) تبين مخططات الضغط–المحتوى الحراري لموائع التثليج نفسها. ويمكن الرجوع الى المرجع [5] للاستزادة.

2-7 موائع التثليج الثانوية (Secondary refrigerants)

يجري انتقال الحرارة في العديد من إستعمالات التثليج الى وسيط تبريد ثانوي سائل (secondary coolant). ويبرد هذا السائل بمائع التثليج. ويقوم وسيط التبريد الثانوي بامتصاص الحرارة من الحيز المثلج بدون تغير في حالته من سائل الى بخار وتسمى هذه السوائل بأكثر من تسمية، منها موائع انتقال الحرارة (heat transfer fluids) ومحاليل ملحية (brines)وموائع ثليج ثانوية (secondary refrigerants) [5]. واهم هذه الموائع واكثرها استعمالاً محلولا كلوريد الصوديوم (NaCl) وكلوريد الكالسيوم ($CaCl_2$) في الماء

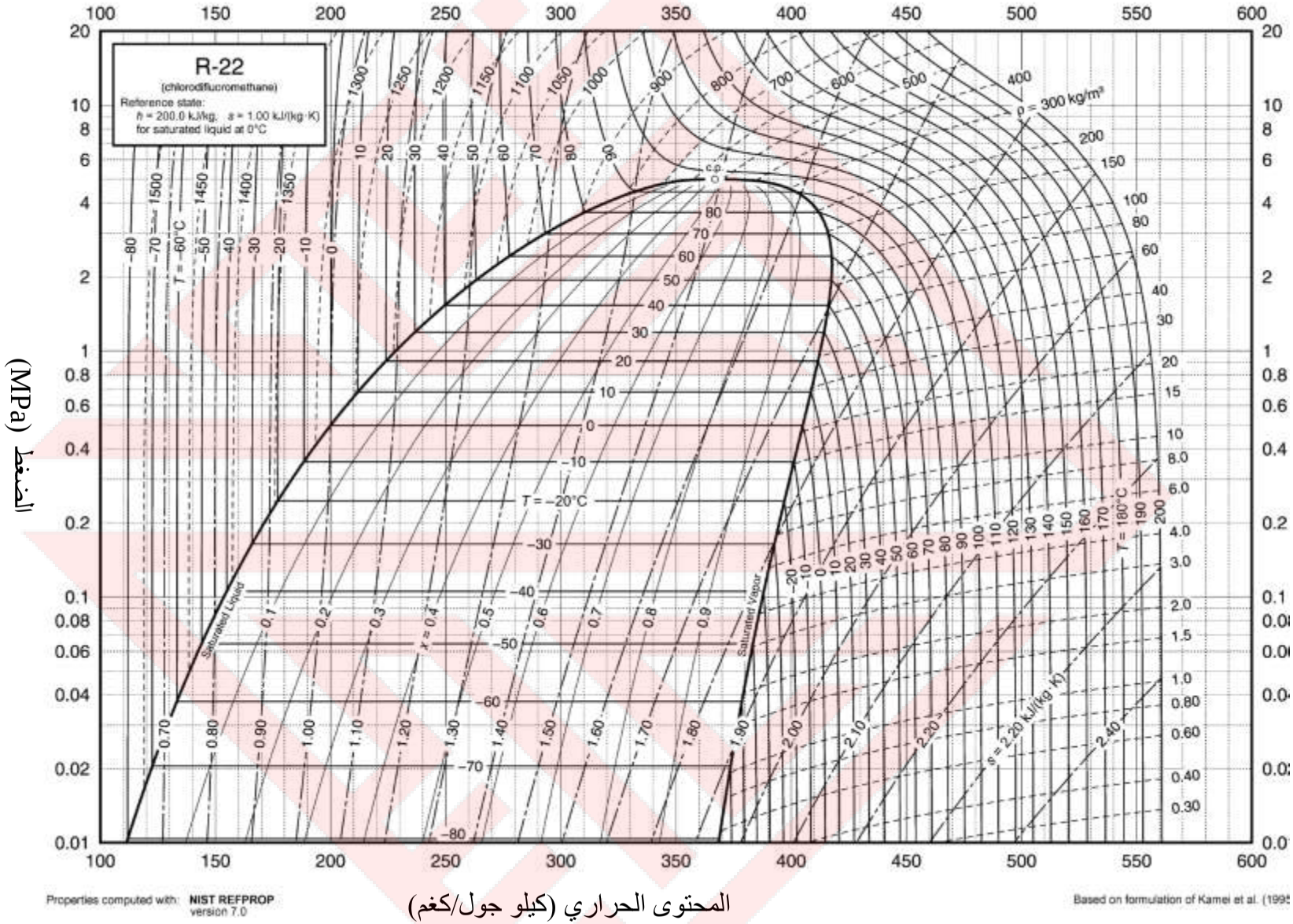
وكذلك الغليكولات (glycols) وأهمها غليكول الأثلين وغليكول البروبلين. وهناك غيرها قليلة الاستعمال عالمياً وغير مستعملة في العراق لهذا الغرض مثل الكحول الأثيلي وفورمات البوتاسيوم (potasium formate).

يبين الجدول (2-1/7) [4] الاستعمالات المختلفة لموائع التثليج الثانوية وأي هذه الموائع أكثر استعمالا فيها. وهناك جداول ومخططات لبعض من الخواص الفيزيائية لهذه الموائع في المرجع [5] يمكن الرجوع اليها لمعلومات اضافية عند الحاجة. ويبين الجدولان (2-2/7) و(2-3/7) خواص محلولي كلوريد الكالسيوم وكلوريد الصوديوم على وفق تراكيزهما في الماء.ومن اهم هذه الخواص درجة حرارة التبلور مع التراكيز المختلفة وهي معلومة مهمة جدا عند الاستعمال خاصة في معامل صناعة الثلج.

الجدول 2-6/2: خواص التشبع لمائع التثليج HCFC-22 [1].

Temp.,* °C	Pressure, MPa	Density, kg/m³ Liquid	Volume, m³/kg Vapor	Enthalpy, kJ/kg Liquid	Enthalpy, kJ/kg Vapor	Entropy, kJ/(kg·K) Liquid	Entropy, kJ/(kg·K) Vapor	Specific Heat c_p, kJ/(kg·K) Liquid	Specific Heat c_p, kJ/(kg·K) Vapor	c_p/c_v Vapor	Velocity of Sound, m/s Liquid	Velocity of Sound, m/s Vapor	Viscosity, μPa·s Liquid	Viscosity, μPa·s Vapor	Thermal Cond., mW/(m·K) Liquid	Thermal Cond., mW/(m·K) Vapor	Surface Tension, mN/m	Temp.,* °C
−100	0.00201	1571.3	8.26600	90.71	358.97	0.5050	2.0543	1.061	0.497	1.243	1127	143.6	845.8	7.25	143.1	4.46	28.12	−100
−90	0.00481	1544.9	3.64480	101.32	363.85	0.5646	1.9980	1.061	0.512	1.237	1080	147.0	699.4	7.67	137.8	4.84	26.36	−90
−80	0.01037	1518.2	1.77820	111.94	368.77	0.6210	1.9508	1.062	0.528	1.233	1033	150.3	591.0	8.09	132.6	5.25	24.63	−80
−70	0.02047	1491.2	0.94342	122.58	373.70	0.6747	1.9108	1.065	0.545	1.231	986	153.3	507.6	8.52	127.6	5.68	22.92	−70
−60	0.03750	1463.7	0.53680	133.27	378.59	0.7260	1.8770	1.071	0.564	1.230	940	156.0	441.4	8.94	122.6	6.12	21.24	−60
−50	0.06453	1435.6	0.32385	144.03	383.42	0.7752	1.8480	1.079	0.585	1.232	893	158.3	387.5	9.36	117.8	6.59	19.58	−50
−48	0.07145	1429.9	0.29453	146.19	384.37	0.7849	1.8428	1.081	0.589	1.233	884	158.7	377.8	9.45	116.9	6.69	19.25	−48
−46	0.07894	1424.2	0.26837	148.36	385.32	0.7944	1.8376	1.083	0.594	1.234	875	159.1	368.6	9.53	115.9	6.79	18.92	−46
−44	0.08705	1418.4	0.24498	150.53	386.26	0.8039	1.8327	1.086	0.599	1.235	865	159.5	359.6	9.62	115.0	6.89	18.59	−44
−42	0.09580	1412.6	0.22402	152.70	387.20	0.8134	1.8278	1.088	0.603	1.236	856	159.9	351.0	9.70	114.0	6.99	18.27	−42
−40.81[b]	0.10132	1409.2	0.21260	154.00	387.75	0.8189	1.8250	1.090	0.606	1.236	851	160.1	346.0	9.75	113.5	7.05	18.08	−40.81
−40	0.10523	1406.8	0.20521	154.89	388.13	0.8227	1.8231	1.091	0.608	1.237	847	160.3	342.6	9.79	113.1	7.09	17.94	−40
−38	0.11538	1401.0	0.18829	157.07	389.06	0.8320	1.8186	1.093	0.613	1.238	838	160.6	334.5	9.87	112.2	7.19	17.62	−38
−36	0.12628	1395.1	0.17304	159.27	389.97	0.8413	1.8141	1.096	0.619	1.239	828	160.9	326.7	9.96	111.2	7.29	17.30	−36
−34	0.13797	1389.1	0.15927	161.47	390.89	0.8505	1.8098	1.099	0.624	1.241	819	161.2	319.1	10.04	110.3	7.40	16.98	−34
−32	0.15050	1383.2	0.14682	163.67	391.79	0.8596	1.8056	1.102	0.629	1.242	810	161.5	311.7	10.12	109.4	7.51	16.66	−32
−30	0.16389	1377.2	0.13553	165.88	392.69	0.8687	1.8015	1.105	0.635	1.244	800	161.8	304.6	10.21	108.5	7.61	16.34	−30
−28	0.17819	1371.1	0.12528	168.10	393.58	0.8778	1.7975	1.108	0.641	1.246	791	162.0	297.7	10.29	107.5	7.72	16.02	−28
−26	0.19344	1365.0	0.11597	170.33	394.47	0.8868	1.7937	1.112	0.646	1.248	782	162.3	291.0	10.38	106.6	7.83	15.70	−26
−24	0.20968	1358.9	0.10749	172.56	395.34	0.8957	1.7899	1.115	0.653	1.250	772	162.5	284.4	10.46	105.7	7.94	15.39	−24
−22	0.22696	1352.7	0.09975	174.80	396.21	0.9046	1.7862	1.119	0.659	1.253	763	162.7	278.1	10.55	104.8	8.06	15.07	−22
−20	0.24531	1346.5	0.09268	177.04	397.06	0.9135	1.7826	1.123	0.665	1.255	754	162.8	271.9	10.63	103.9	8.17	14.76	−20
−18	0.26479	1340.3	0.08621	179.30	397.91	0.9223	1.7791	1.127	0.672	1.258	744	163.0	265.9	10.72	103.0	8.29	14.45	−18
−16	0.28543	1334.0	0.08029	181.56	398.75	0.9311	1.7757	1.131	0.678	1.261	735	163.1	260.1	10.80	102.1	8.40	14.14	−16
−14	0.30728	1327.6	0.07485	183.83	399.57	0.9398	1.7723	1.135	0.685	1.264	726	163.2	254.4	10.89	101.1	8.52	13.83	−14
−12	0.33038	1321.2	0.06986	186.11	400.39	0.9485	1.7690	1.139	0.692	1.267	716	163.3	248.8	10.98	100.2	8.65	13.52	−12
−10	0.35479	1314.7	0.06527	188.40	401.20	0.9572	1.7658	1.144	0.699	1.270	707	163.3	243.4	11.06	99.3	8.77	13.21	−10
−8	0.38054	1308.2	0.06103	190.70	401.99	0.9658	1.7627	1.149	0.707	1.274	697	163.4	238.1	11.15	98.4	8.89	12.91	−8
−6	0.40769	1301.6	0.05713	193.01	402.77	0.9744	1.7596	1.154	0.715	1.278	688	163.4	233.0	11.24	97.5	9.02	12.60	−6
−4	0.43628	1295.0	0.05352	195.33	403.55	0.9830	1.7566	1.159	0.722	1.282	679	163.4	227.9	11.32	96.6	9.15	12.30	−4
−2	0.46636	1288.3	0.05019	197.66	404.30	0.9915	1.7536	1.164	0.731	1.287	669	163.4	223.0	11.41	95.7	9.28	12.00	−2
0	0.49799	1281.5	0.04710	200.00	405.05	1.0000	1.7507	1.169	0.739	1.291	660	163.3	218.2	11.50	94.8	9.42	11.70	0
2	0.53120	1274.7	0.04424	202.35	405.78	1.0085	1.7478	1.175	0.748	1.296	650	163.2	213.5	11.59	93.9	9.56	11.40	2
4	0.56605	1267.8	0.04159	204.71	406.50	1.0169	1.7450	1.181	0.757	1.301	641	163.1	208.9	11.68	93.1	9.70	11.10	4
6	0.60259	1260.8	0.03913	207.09	407.20	1.0254	1.7422	1.187	0.766	1.307	632	163.0	204.4	11.77	92.2	9.84	10.81	6
8	0.64088	1253.8	0.03683	209.47	407.89	1.0338	1.7395	1.193	0.775	1.313	622	162.8	200.0	11.86	91.3	9.99	10.51	8
10	0.68095	1246.7	0.03470	211.87	408.56	1.0422	1.7368	1.199	0.785	1.319	613	162.6	195.7	11.96	90.4	10.14	10.22	10
12	0.72286	1239.5	0.03271	214.28	409.21	1.0505	1.7341	1.206	0.795	1.326	603	162.4	191.5	12.05	89.5	10.29	9.93	12
14	0.76668	1232.2	0.03086	216.70	409.85	1.0589	1.7315	1.213	0.806	1.333	594	162.2	187.3	12.14	88.6	10.45	9.64	14
16	0.81244	1224.9	0.02912	219.14	410.47	1.0672	1.7289	1.220	0.817	1.340	584	161.9	183.2	12.24	87.7	10.61	9.35	16
18	0.86020	1217.4	0.02750	221.59	411.07	1.0755	1.7263	1.228	0.828	1.348	575	161.6	179.2	12.33	86.8	10.77	9.06	18
20	0.91002	1209.9	0.02599	224.06	411.66	1.0838	1.7238	1.236	0.840	1.357	565	161.3	175.3	12.43	85.9	10.95	8.78	20
22	0.96195	1202.3	0.02457	226.54	412.22	1.0921	1.7212	1.244	0.853	1.366	555	161.0	171.5	12.53	85.0	11.12	8.50	22
24	1.01600	1194.6	0.02324	229.04	412.77	1.1004	1.7187	1.252	0.866	1.375	546	160.6	167.7	12.63	84.1	11.30	8.22	24
26	1.07240	1186.7	0.02199	231.55	413.29	1.1086	1.7162	1.261	0.879	1.385	536	160.2	163.9	12.74	83.2	11.49	7.94	26
28	1.13090	1178.8	0.02082	234.08	413.79	1.1169	1.7136	1.271	0.893	1.396	527	159.7	160.3	12.84	82.3	11.69	7.66	28
30	1.19190	1170.7	0.01972	236.62	414.26	1.1252	1.7111	1.281	0.908	1.408	517	159.2	156.7	12.95	81.4	11.89	7.38	30
32	1.25520	1162.6	0.01869	239.19	414.71	1.1334	1.7086	1.291	0.924	1.420	507	158.7	153.1	13.06	80.5	12.10	7.11	32
34	1.32100	1154.3	0.01771	241.77	415.14	1.1417	1.7061	1.302	0.940	1.434	497	158.2	149.6	13.17	79.6	12.31	6.84	34
36	1.38920	1145.8	0.01679	244.38	415.54	1.1499	1.7036	1.314	0.957	1.448	487	157.6	146.1	13.28	78.7	12.54	6.57	36
38	1.46010	1137.3	0.01593	247.00	415.91	1.1582	1.7010	1.326	0.976	1.463	478	157.0	142.7	13.40	77.8	12.77	6.30	38
40	1.53360	1128.5	0.01511	249.65	416.25	1.1665	1.6985	1.339	0.995	1.480	468	156.4	139.4	13.52	76.9	13.02	6.04	40
42	1.60980	1119.6	0.01433	252.32	416.55	1.1747	1.6959	1.353	1.015	1.498	458	155.7	136.1	13.64	76.0	13.28	5.77	42
44	1.68870	1110.6	0.01360	255.01	416.83	1.1830	1.6933	1.368	1.037	1.517	448	155.0	132.8	13.77	75.1	13.55	5.51	44
46	1.77040	1101.4	0.01291	257.73	417.07	1.1913	1.6906	1.384	1.061	1.538	437	154.2	129.5	13.90	74.1	13.83	5.25	46
48	1.85510	1091.9	0.01226	260.47	417.27	1.1997	1.6879	1.401	1.086	1.561	427	153.4	126.3	14.04	73.2	14.13	5.00	48
50	1.94270	1082.3	0.01163	263.25	417.44	1.2080	1.6852	1.419	1.113	1.586	417	152.6	123.1	14.18	72.3	14.45	4.74	50
52	2.03330	1072.4	0.01104	266.05	417.56	1.2164	1.6824	1.439	1.142	1.614	407	151.7	120.0	14.32	71.4	14.78	4.49	52
54	2.12700	1062.3	0.01048	268.89	417.63	1.2248	1.6795	1.461	1.173	1.644	396	150.8	116.9	14.47	70.4	15.14	4.24	54
56	2.22390	1052.0	0.00995	271.76	417.66	1.2333	1.6766	1.485	1.208	1.677	386	149.8	113.8	14.63	69.5	15.52	4.00	56
58	2.32400	1041.3	0.00944	274.66	417.63	1.2418	1.6736	1.511	1.246	1.714	375	148.8	110.7	14.80	68.6	15.92	3.75	58
60	2.42750	1030.4	0.00896	277.61	417.55	1.2504	1.6705	1.539	1.287	1.755	364	147.7	107.6	14.98	67.6	16.36	3.51	60
65	2.70120	1001.4	0.00785	285.18	417.06	1.2722	1.6622	1.626	1.413	1.881	337	144.9	100.0	15.46	65.3	17.61	2.92	65
70	2.99740	969.7	0.00685	293.10	416.09	1.2945	1.6529	1.743	1.584	2.056	309	141.7	92.4	16.02	62.9	19.16	2.36	70
75	3.31770	934.4	0.00595	301.46	414.49	1.3177	1.6424	1.913	1.832	2.315	280	138.1	84.6	16.70	60.6	21.16	1.82	75
80	3.66380	893.7	0.00512	310.44	412.01	1.3423	1.6299	2.181	2.231	2.735	249	134.2	76.6	17.55	58.6	23.87	1.30	80
85	4.03780	844.8	0.00434	320.38	408.19	1.3690	1.6142	2.682	2.984	3.532	215	129.7	68.1	18.71	57.4	27.82	0.83	85
90	4.44230	780.1	0.00356	332.09	401.87	1.4001	1.5922	3.981	4.975	5.626	177	124.6	58.3	20.48	59.3	34.55	0.40	90
95	4.88240	662.9	0.00262	349.56	387.28	1.4462	1.5486	17.31	25.29	26.43	128	118.0	44.4	24.76	83.5	59.15	0.05	95
96.15[c]	4.99000	523.8	0.00191	366.90	366.90	1.4927	1.4927	∞	∞	∞	0	0.0	—	—	∞	∞	0.00	96.15

*Temperatures on ITS-90 scale [b]Normal boiling point [c]Critical point

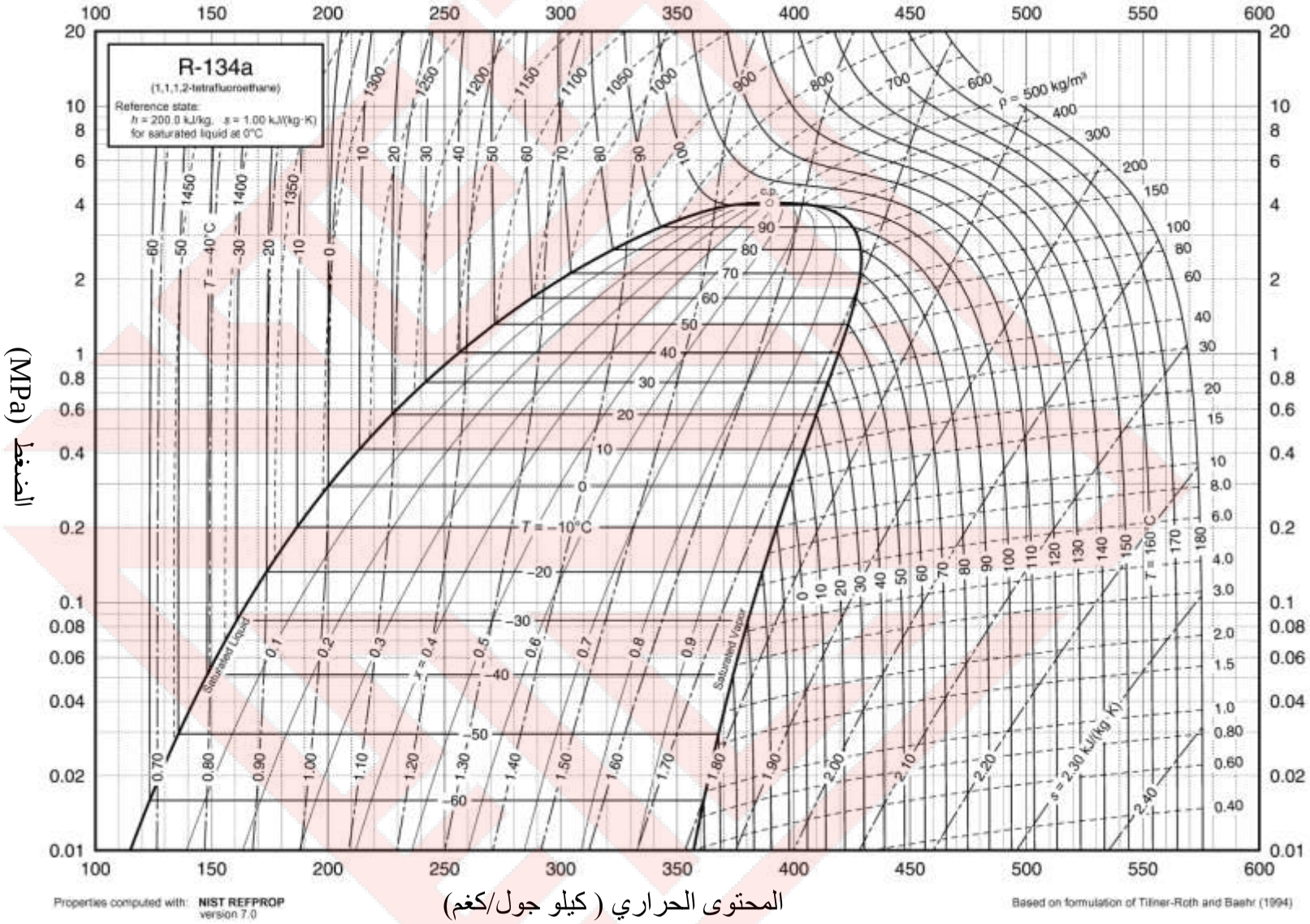


الشكل 2-1/6: مخطط الضغط – المحتوى الحراري لمائع التثليج HCFC-22 [1]

الجدول 2-3/6: خواص التشبع لمائع التثليج R-134a [5].

Temp.,* °C	Pressure, MPa	Density, kg/m³ Liquid	Volume, m³/kg Vapor	Enthalpy, kJ/kg Liquid	Enthalpy, kJ/kg Vapor	Entropy, kJ/(kg·K) Liquid	Entropy, kJ/(kg·K) Vapor	Specific Heat c_p, kJ/(kg·K) Liquid	Specific Heat c_p, kJ/(kg·K) Vapor	c_p/c_v Vapor	Velocity of Sound, m/s Liquid	Velocity of Sound, m/s Vapor	Viscosity, μPa·s Liquid	Viscosity, μPa·s Vapor	Thermal Cond., mW/(m·K) Liquid	Thermal Cond., mW/(m·K) Vapor	Surface Tension, mN/m	Temp.,* °C
−103.30[a]	0.00039	1591.1	35.4960	71.46	334.94	0.4126	1.9639	1.184	0.585	1.164	1120	126.8	2175.0	6.46	145.2	3.08	28.07	−103.30
−100	0.00056	1582.4	25.1930	75.36	336.85	0.4354	1.9456	1.184	0.593	1.162	1103	127.9	1893.0	6.60	143.2	3.34	27.50	−100
−90	0.00152	1555.8	9.7698	87.23	342.76	0.5020	1.8972	1.189	0.617	1.156	1052	131.0	1339.0	7.03	137.3	4.15	25.79	−90
−80	0.00367	1529.0	4.2682	99.16	348.83	0.5654	1.8580	1.198	0.642	1.151	1002	134.0	1018.0	7.46	131.5	4.95	24.10	−80
−70	0.00798	1501.9	2.0590	111.20	355.02	0.6262	1.8264	1.210	0.667	1.148	952	136.8	809.2	7.89	126.0	5.75	22.44	−70
−60	0.01591	1474.3	1.0790	123.36	361.31	0.6846	1.8010	1.223	0.692	1.146	903	139.4	663.1	8.30	120.7	6.56	20.80	−60
−50	0.02945	1446.3	0.60620	135.67	367.65	0.7410	1.7806	1.238	0.720	1.146	855	141.7	555.1	8.72	115.6	7.36	19.18	−50
−40	0.05121	1417.7	0.36108	148.14	374.00	0.7956	1.7643	1.255	0.749	1.148	807	143.6	472.2	9.12	110.6	8.17	17.60	−40
−30	0.08438	1388.4	0.22594	160.79	380.32	0.8486	1.7515	1.273	0.781	1.152	760	145.2	406.4	9.52	105.8	8.99	16.04	−30
−28	0.09270	1382.4	0.20680	163.34	381.57	0.8591	1.7492	1.277	0.788	1.153	751	145.4	394.9	9.60	104.8	9.15	15.73	−28
−26.07[b]	0.10133	1376.7	0.19018	165.81	382.78	0.8690	1.7472	1.281	0.794	1.154	742	145.7	384.2	9.68	103.9	9.31	15.44	−26.07
−26	0.10167	1376.5	0.18958	165.90	382.82	0.8694	1.7471	1.281	0.794	1.154	742	145.7	383.8	9.68	103.9	9.32	15.43	−26
−24	0.11130	1370.4	0.17407	168.47	384.07	0.8798	1.7451	1.285	0.801	1.155	732	145.9	373.1	9.77	102.9	9.48	15.12	−24
−22	0.12165	1364.4	0.16006	171.05	385.32	0.8900	1.7432	1.289	0.809	1.156	723	146.1	362.9	9.85	102.0	9.65	14.82	−22
−20	0.13273	1358.3	0.14739	173.64	386.55	0.9002	1.7413	1.293	0.816	1.158	714	146.3	353.0	9.92	101.1	9.82	14.51	−20
−18	0.14460	1352.1	0.13592	176.23	387.79	0.9104	1.7396	1.297	0.823	1.159	705	146.4	343.5	10.01	100.1	9.98	14.21	−18
−16	0.15728	1345.9	0.12551	178.83	389.02	0.9205	1.7379	1.302	0.831	1.161	695	146.6	334.3	10.09	99.2	10.15	13.91	−16
−14	0.17082	1339.7	0.11605	181.44	390.24	0.9306	1.7363	1.306	0.838	1.163	686	146.7	325.4	10.17	98.3	10.32	13.61	−14
−12	0.18524	1333.4	0.10744	184.07	391.46	0.9407	1.7348	1.311	0.846	1.165	677	146.8	316.9	10.25	97.4	10.49	13.32	−12
−10	0.20060	1327.1	0.09959	186.70	392.66	0.9506	1.7334	1.316	0.854	1.167	668	146.9	308.6	10.33	96.5	10.66	13.02	−10
−8	0.21693	1320.8	0.09242	189.34	393.87	0.9606	1.7320	1.320	0.863	1.169	658	146.9	300.6	10.41	95.6	10.83	12.72	−8
−6	0.23428	1314.3	0.08587	191.99	395.06	0.9705	1.7307	1.325	0.871	1.171	649	147.0	292.9	10.49	94.7	11.00	12.43	−6
−4	0.25268	1307.9	0.07987	194.65	396.25	0.9804	1.7294	1.330	0.880	1.174	640	147.0	285.4	10.57	93.8	11.17	12.14	−4
−2	0.27217	1301.4	0.07436	197.32	397.43	0.9902	1.7282	1.336	0.888	1.176	631	147.0	278.1	10.65	92.9	11.34	11.85	−2
0	0.29280	1294.8	0.06931	200.00	398.60	1.0000	1.7271	1.341	0.897	1.179	622	146.9	271.1	10.73	92.0	11.51	11.56	0
2	0.31462	1288.1	0.06466	202.69	399.77	1.0098	1.7260	1.347	0.906	1.182	612	146.9	264.3	10.81	91.1	11.69	11.27	2
4	0.33766	1281.4	0.06039	205.40	400.92	1.0195	1.7250	1.352	0.916	1.185	603	146.8	257.6	10.90	90.2	11.86	10.99	4
6	0.36198	1274.7	0.05644	208.11	402.06	1.0292	1.7240	1.358	0.925	1.189	594	146.7	251.2	10.98	89.4	12.04	10.70	6
8	0.38761	1267.9	0.05280	210.84	403.20	1.0388	1.7230	1.364	0.935	1.192	585	146.5	244.9	11.06	88.5	12.22	10.42	8
10	0.41461	1261.0	0.04944	213.58	404.32	1.0485	1.7221	1.370	0.945	1.196	576	146.4	238.8	11.15	87.6	12.40	10.14	10
12	0.44301	1254.0	0.04633	216.33	405.43	1.0581	1.7212	1.377	0.956	1.200	566	146.2	232.9	11.23	86.7	12.58	9.86	12
14	0.47288	1246.9	0.04345	219.09	406.53	1.0677	1.7204	1.383	0.967	1.204	557	146.0	227.1	11.32	85.9	12.77	9.58	14
16	0.50425	1239.8	0.04078	221.87	407.61	1.0772	1.7196	1.390	0.978	1.209	548	145.7	221.5	11.40	85.0	12.95	9.30	16
18	0.53718	1232.6	0.03830	224.66	408.69	1.0867	1.7188	1.397	0.989	1.214	539	145.5	216.0	11.49	84.1	13.14	9.03	18
20	0.57171	1225.3	0.03600	227.47	409.75	1.0962	1.7180	1.405	1.001	1.219	530	145.1	210.7	11.58	83.3	13.33	8.76	20
22	0.60789	1218.0	0.03385	230.29	410.79	1.1057	1.7173	1.413	1.013	1.224	520	144.8	205.5	11.67	82.4	13.53	8.48	22
24	0.64578	1210.5	0.03186	233.12	411.82	1.1152	1.7166	1.421	1.025	1.230	511	144.5	200.4	11.76	81.6	13.72	8.21	24
26	0.68543	1202.9	0.03000	235.97	412.84	1.1246	1.7159	1.429	1.038	1.236	502	144.1	195.4	11.85	80.7	13.92	7.95	26
28	0.72688	1195.2	0.02826	238.84	413.84	1.1341	1.7152	1.437	1.052	1.243	493	143.6	190.5	11.95	79.8	14.13	7.68	28
30	0.77020	1187.5	0.02664	241.72	414.82	1.1435	1.7145	1.446	1.065	1.249	483	143.2	185.8	12.04	79.0	14.33	7.42	30
32	0.81543	1179.6	0.02513	244.62	415.78	1.1529	1.7138	1.456	1.080	1.257	474	142.7	181.1	12.14	78.1	14.54	7.15	32
34	0.86263	1171.6	0.02371	247.54	416.72	1.1623	1.7131	1.466	1.095	1.265	465	142.1	176.6	12.24	77.3	14.76	6.89	34
36	0.91185	1163.4	0.02238	250.48	417.65	1.1717	1.7124	1.476	1.111	1.273	455	141.6	172.1	12.34	76.4	14.98	6.64	36
38	0.96315	1155.1	0.02113	253.43	418.55	1.1811	1.7118	1.487	1.127	1.282	446	141.0	167.7	12.44	75.6	15.21	6.38	38
40	1.0166	1146.7	0.01997	256.41	419.43	1.1905	1.7111	1.498	1.145	1.292	436	140.3	163.4	12.55	74.7	15.44	6.13	40
42	1.0722	1138.2	0.01887	259.41	420.28	1.1999	1.7103	1.510	1.163	1.303	427	139.7	159.2	12.65	73.9	15.68	5.88	42
44	1.1301	1129.5	0.01784	262.43	421.11	1.2092	1.7096	1.523	1.182	1.314	418	138.9	155.1	12.76	73.0	15.93	5.63	44
46	1.1903	1120.6	0.01687	265.47	421.92	1.2186	1.7089	1.537	1.202	1.326	408	138.2	151.0	12.88	72.1	16.18	5.38	46
48	1.2529	1111.5	0.01595	268.53	422.69	1.2280	1.7081	1.551	1.223	1.339	399	137.4	147.0	13.00	71.3	16.45	5.13	48
50	1.3179	1102.3	0.01509	271.62	423.44	1.2375	1.7072	1.566	1.246	1.354	389	136.6	143.1	13.12	70.4	16.72	4.89	50
52	1.3854	1092.9	0.01428	274.74	424.15	1.2469	1.7064	1.582	1.270	1.369	379	135.7	139.2	13.24	69.6	17.01	4.65	52
54	1.4555	1083.2	0.01351	277.89	424.83	1.2563	1.7055	1.600	1.296	1.386	370	134.7	135.4	13.37	68.7	17.31	4.41	54
56	1.5282	1073.4	0.01278	281.06	425.47	1.2658	1.7045	1.618	1.324	1.405	360	133.8	131.6	13.51	67.8	17.63	4.18	56
58	1.6036	1063.2	0.01209	284.27	426.07	1.2753	1.7035	1.638	1.354	1.425	350	132.7	127.9	13.65	67.0	17.96	3.95	58
60	1.6818	1052.9	0.01144	287.50	426.63	1.2848	1.7024	1.660	1.387	1.448	340	131.7	124.2	13.79	66.1	18.31	3.72	60
62	1.7628	1042.2	0.01083	290.78	427.14	1.2944	1.7013	1.684	1.422	1.473	331	130.5	120.6	13.95	65.2	18.68	3.49	62
64	1.8467	1031.2	0.01024	294.09	427.61	1.3040	1.7000	1.710	1.461	1.501	321	129.4	117.0	14.11	64.3	19.07	3.27	64
66	1.9337	1020.0	0.00969	297.44	428.02	1.3137	1.6987	1.738	1.504	1.532	311	128.1	113.5	14.28	63.4	19.50	3.05	66
68	2.0237	1008.3	0.00916	300.84	428.36	1.3234	1.6972	1.769	1.552	1.567	301	126.8	109.9	14.46	62.6	19.95	2.83	68
70	2.1168	996.2	0.00865	304.28	428.65	1.3332	1.6956	1.804	1.605	1.607	290	125.5	106.4	14.65	61.7	20.45	2.61	70
72	2.2132	983.8	0.00817	307.78	428.86	1.3430	1.6939	1.843	1.665	1.653	280	124.0	102.9	14.85	60.8	20.98	2.40	72
74	2.3130	970.8	0.00771	311.33	429.00	1.3530	1.6920	1.887	1.734	1.705	269	122.6	99.5	15.07	59.9	21.56	2.20	74
76	2.4161	957.3	0.00727	314.94	429.04	1.3631	1.6899	1.938	1.812	1.766	259	121.0	96.0	15.30	59.0	22.21	1.99	76
78	2.5228	943.1	0.00685	318.63	428.98	1.3733	1.6876	1.996	1.904	1.838	248	119.4	92.5	15.56	58.1	22.92	1.80	78
80	2.6332	928.2	0.00645	322.39	428.81	1.3836	1.6850	2.065	2.012	1.924	237	117.7	89.0	15.84	57.2	23.72	1.60	80
85	2.9258	887.2	0.00550	332.22	427.76	1.4104	1.6771	2.306	2.397	2.232	207	113.1	80.2	16.67	54.9	26.22	1.14	85
90	3.2442	837.8	0.00461	342.93	425.42	1.4390	1.6662	2.756	3.121	2.820	176	107.9	70.9	17.81	52.8	29.91	0.71	90
95	3.5912	772.7	0.00374	355.25	420.67	1.4715	1.6492	3.938	5.020	4.369	141	101.9	60.4	19.61	51.7	36.40	0.33	95
100	3.9724	651.2	0.00268	373.30	407.68	1.5188	1.6109	17.59	25.35	20.81	101	94.0	45.1	24.21	59.9	60.58	0.04	100
101.06[c]	4.0593	511.9	0.00195	389.64	389.64	1.5621	1.5621	∞	∞	∞	0	0.0	—	—	∞	∞	0.00	101.06

*Temperatures on ITS-90 scale [a]Triple point [b]Normal boiling point [c]Critical point

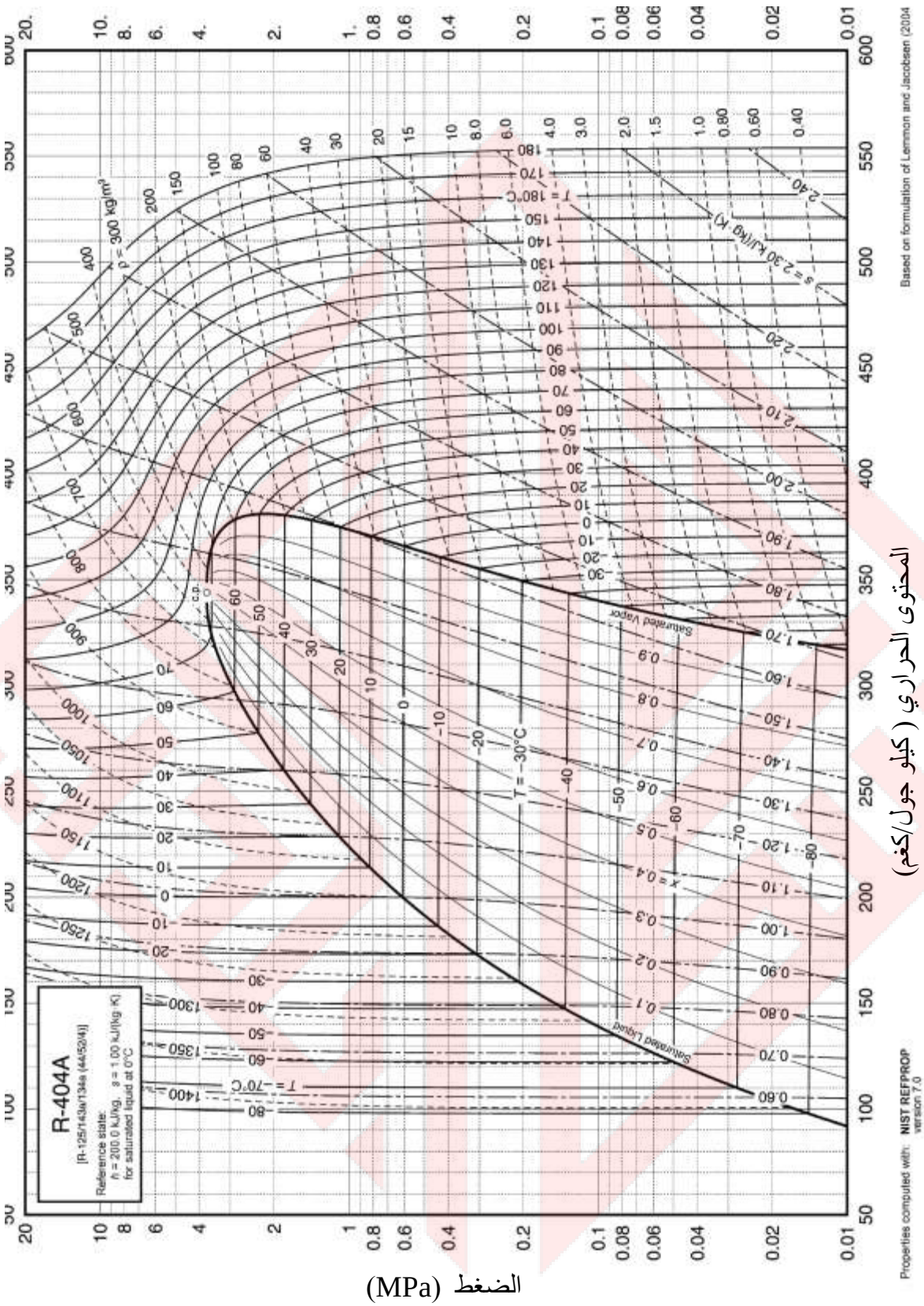


الشكل 2-6/2: مخطط الضغط – المحتوى الحراري لمائع التثليج HF-134a [1].

الجدول 2–6/ 4: خواص التشبع لمائع التثليج R-404A [5].

Pressure, MPa	Temperature,[a] °C		Density, kg/m³	Volume, m³/kg	Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg·K)		Specific Heat c_p, kJ/(kg·K)		c_p/c_v	Velocity of Sound, m/s		Viscosity, μPa·s		Thermal Cond., mW/(m·K)		Surface Tension, mN/m	Pressure, MPa
	Bubble	Dew	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		
0.005	−93.70	−92.50	1447.1	3.05794	81.16	311.61	0.4716	1.7532	1.220	0.640	1.163	998	132.9	764.9	7.32	122.5	6.15	17.78	0.005
0.006	−91.48	−90.32	1440.6	2.57690	83.85	312.92	0.4865	1.7450	1.218	0.646	1.162	980	133.6	727.8	7.41	121.2	6.28	17.58	0.006
0.007	−89.56	−88.42	1434.9	2.22992	86.19	314.06	0.4993	1.7382	1.216	0.651	1.161	966	134.1	697.9	7.48	120.1	6.40	17.40	0.007
0.008	−87.86	−86.74	1429.9	1.96748	88.26	315.07	0.5106	1.7324	1.215	0.655	1.161	953	134.6	673.0	7.55	119.2	6.50	17.24	0.008
0.009	−86.32	−85.22	1425.4	1.76182	90.13	315.99	0.5206	1.7273	1.214	0.660	1.160	942	135.0	651.7	7.61	118.3	6.60	17.09	0.009
0.01	−84.93	−83.84	1421.3	1.59620	91.83	316.83	0.5296	1.7229	1.214	0.663	1.160	933	135.4	633.3	7.66	117.5	6.68	16.96	0.01
0.02	−75.05	−74.08	1392.4	0.83425	103.81	322.78	0.5917	1.6953	1.215	0.691	1.159	870	137.9	523.7	8.04	112.2	7.31	16.00	0.02
0.04	−63.85	−62.97	1359.4	0.43619	117.48	329.58	0.6587	1.6707	1.225	0.725	1.159	807	140.4	431.3	8.47	106.4	8.05	14.85	0.04
0.06	−56.57	−55.75	1337.7	0.29837	126.44	334.00	0.7007	1.6578	1.234	0.749	1.161	770	141.7	383.8	8.74	102.8	8.55	14.08	0.06
0.08	−51.03	−50.25	1321.0	0.22779	133.31	337.36	0.7320	1.6494	1.243	0.767	1.163	742	142.6	352.7	8.95	100.1	8.93	13.48	0.08
0.1	−46.50	−45.74	1307.1	0.18467	138.97	340.08	0.7571	1.6434	1.251	0.784	1.166	719	143.2	329.8	9.12	98.0	9.25	12.98	0.1
0.10132[b]	−46.22	−45.47	1306.3	0.18240	139.31	340.25	0.7586	1.6430	1.252	0.785	1.166	718	143.2	328.5	9.13	97.8	9.27	12.95	0.10132
0.12	−42.63	−41.90	1295.1	0.15551	143.83	342.40	0.7783	1.6387	1.259	0.798	1.169	700	143.6	311.9	9.26	96.2	9.53	12.55	0.12
0.14	−39.24	−38.53	1284.5	0.13443	148.12	344.41	0.7967	1.6349	1.266	0.811	1.171	684	143.9	297.3	9.39	94.6	9.78	12.17	0.14
0.16	−36.20	−35.51	1275.0	0.11846	151.97	346.20	0.8130	1.6318	1.273	0.823	1.174	669	144.1	285.0	9.50	93.2	10.01	11.82	0.16
0.18	−33.45	−32.78	1266.2	0.10592	155.49	347.81	0.8277	1.6292	1.279	0.834	1.177	656	144.2	274.4	9.60	91.9	10.21	11.51	0.18
0.2	−30.93	−30.27	1258.0	0.09581	158.73	349.28	0.8411	1.6270	1.285	0.844	1.179	644	144.3	265.1	9.69	90.8	10.40	11.21	0.2
0.22	−28.59	−27.94	1250.4	0.08748	161.75	350.63	0.8534	1.6250	1.291	0.855	1.182	633	144.3	256.9	9.78	89.7	10.58	10.94	0.22
0.24	−26.42	−25.78	1243.3	0.08049	164.57	351.88	0.8649	1.6233	1.297	0.864	1.185	623	144.4	249.5	9.86	88.7	10.75	10.69	0.24
0.26	−24.37	−23.75	1236.5	0.07454	167.23	353.04	0.8755	1.6217	1.303	0.873	1.188	613	144.3	242.8	9.94	87.8	10.91	10.45	0.26
0.28	−22.45	−21.83	1230.1	0.06941	169.75	354.13	0.8855	1.6203	1.308	0.882	1.190	604	144.3	236.7	10.01	87.0	11.06	10.22	0.28
0.3	−20.62	−20.02	1223.9	0.06494	172.14	355.15	0.8950	1.6190	1.313	0.891	1.193	595	144.2	231.1	10.08	86.2	11.21	10.01	0.3
0.32	−18.89	−18.29	1218.0	0.06101	174.43	356.12	0.9039	1.6179	1.319	0.899	1.196	587	144.1	225.9	10.15	85.4	11.34	9.81	0.32
0.34	−17.24	−16.65	1212.4	0.05752	176.61	357.03	0.9125	1.6168	1.324	0.907	1.199	579	144.0	221.1	10.21	84.7	11.48	9.61	0.34
0.36	−15.66	−15.08	1206.9	0.05441	178.71	357.90	0.9206	1.6158	1.329	0.915	1.202	572	143.9	216.6	10.27	84.0	11.61	9.42	0.36
0.38	−14.15	−13.57	1201.6	0.05162	180.73	358.72	0.9283	1.6149	1.334	0.923	1.205	565	143.8	212.4	10.33	83.3	11.73	9.24	0.38
0.4	−12.69	−12.12	1196.5	0.04909	182.68	359.51	0.9358	1.6141	1.339	0.931	1.208	558	143.7	208.4	10.39	82.7	11.85	9.07	0.4
0.42	−11.29	−10.73	1191.6	0.04680	184.56	360.26	0.9429	1.6133	1.344	0.938	1.211	551	143.5	204.7	10.44	82.1	11.97	8.90	0.42
0.44	−9.94	−9.39	1186.7	0.04471	186.38	360.98	0.9498	1.6125	1.349	0.946	1.214	545	143.4	201.2	10.49	81.5	12.08	8.74	0.44
0.46	−8.64	−8.09	1182.0	0.04279	188.15	361.67	0.9564	1.6118	1.353	0.953	1.217	538	143.2	197.8	10.55	81.0	12.19	8.58	0.46
0.48	−7.37	−6.83	1177.5	0.04103	189.86	362.33	0.9628	1.6112	1.358	0.960	1.220	532	143.0	194.6	10.60	80.4	12.30	8.43	0.48
0.5	−6.15	−5.61	1173.0	0.03940	191.53	362.96	0.9690	1.6105	1.363	0.967	1.223	527	142.8	191.6	10.65	79.9	12.41	8.28	0.5
0.55	−3.24	−2.72	1162.3	0.03584	195.51	364.45	0.9837	1.6091	1.374	0.984	1.231	513	142.4	184.6	10.77	78.7	12.66	7.93	0.55
0.6	−0.53	−0.02	1152.0	0.03284	199.26	365.81	0.9973	1.6078	1.386	1.001	1.239	500	141.9	178.2	10.88	77.5	12.91	7.61	0.6
0.65	2.02	2.52	1142.3	0.03029	202.81	367.06	1.0101	1.6066	1.397	1.018	1.247	488	141.3	172.5	10.99	76.5	13.16	7.30	0.65
0.7	4.42	4.91	1132.9	0.02809	206.18	368.21	1.0222	1.6055	1.409	1.034	1.256	476	140.8	167.2	11.10	75.5	13.41	7.01	0.7
0.75	6.70	7.18	1123.8	0.02618	209.41	369.28	1.0336	1.6044	1.420	1.051	1.264	465	140.2	162.4	11.20	74.5	13.65	6.74	0.75
0.8	8.87	9.34	1115.1	0.02449	212.49	370.27	1.0444	1.6035	1.432	1.067	1.274	455	139.6	157.9	11.30	73.6	13.89	6.48	0.8
0.85	10.94	11.40	1106.5	0.02300	215.46	371.19	1.0547	1.6025	1.443	1.084	1.283	445	139.0	153.6	11.40	72.8	14.12	6.23	0.85
0.9	12.92	13.37	1098.2	0.02166	218.32	372.05	1.0646	1.6016	1.455	1.100	1.293	435	138.3	149.7	11.50	72.0	14.35	5.99	0.9
0.95	14.81	15.26	1090.2	0.02046	221.09	372.85	1.0741	1.6007	1.466	1.117	1.303	426	137.7	146.0	11.59	71.2	14.59	5.76	0.95
1.0	16.64	17.08	1082.2	0.01937	223.77	373.59	1.0832	1.5999	1.478	1.134	1.313	417	137.1	142.5	11.69	70.4	14.82	5.54	1.0
1.1	20.09	20.52	1066.9	0.01749	228.89	374.94	1.1005	1.5982	1.503	1.169	1.336	400	135.7	136.1	11.88	69.0	15.29	5.13	1.1
1.2	23.32	23.73	1052.0	0.01590	233.75	376.12	1.1166	1.5965	1.528	1.206	1.360	384	134.4	130.2	12.07	67.7	15.76	4.75	1.2
1.3	26.35	26.75	1037.5	0.01455	238.37	377.14	1.1318	1.5949	1.554	1.244	1.386	368	133.0	124.9	12.26	66.5	16.23	4.39	1.3
1.4	29.22	29.60	1023.4	0.01338	242.81	378.02	1.1462	1.5932	1.582	1.285	1.414	354	131.6	119.9	12.45	65.3	16.71	4.06	1.4
1.5	31.93	32.30	1009.5	0.01236	247.07	378.78	1.1599	1.5914	1.611	1.329	1.445	340	130.1	115.3	12.65	64.2	17.21	3.75	1.5
1.6	34.51	34.87	995.7	0.01146	251.19	379.42	1.1730	1.5896	1.643	1.376	1.478	327	128.7	111.0	12.84	63.1	17.72	3.45	1.6
1.7	36.97	37.32	982.1	0.01066	255.17	379.95	1.1856	1.5878	1.676	1.426	1.515	314	127.2	107.0	13.05	62.1	18.24	3.17	1.7
1.8	39.33	39.67	968.6	0.00994	259.05	380.38	1.1977	1.5858	1.712	1.481	1.556	301	125.7	103.2	13.25	61.2	18.80	2.91	1.8
1.9	41.58	41.91	955.1	0.00930	262.83	380.70	1.2095	1.5838	1.751	1.541	1.601	289	124.1	99.5	13.47	60.2	19.37	2.66	1.9
2.0	43.75	44.07	941.6	0.00871	266.52	380.92	1.2208	1.5817	1.794	1.607	1.652	277	122.6	96.1	13.70	59.3	19.98	2.43	2.0
2.1	45.84	46.15	928.1	0.00817	270.14	381.05	1.2319	1.5794	1.841	1.681	1.709	266	121.0	92.7	13.93	58.5	20.62	2.21	2.1
2.2	47.85	48.15	914.4	0.00768	273.70	381.08	1.2427	1.5770	1.893	1.763	1.774	254	119.4	89.5	14.18	57.6	21.31	2.00	2.2
2.3	49.80	50.08	900.6	0.00723	277.20	381.01	1.2532	1.5745	1.952	1.856	1.847	243	117.8	86.5	14.44	56.8	22.04	1.80	2.3
2.4	51.68	51.95	886.5	0.00680	280.66	380.83	1.2635	1.5718	2.019	1.962	1.932	232	116.2	83.5	14.72	56.0	22.83	1.61	2.4
2.5	53.50	53.76	872.2	0.00641	284.09	380.55	1.2737	1.5689	2.095	2.085	2.032	222	114.5	80.5	15.02	55.3	23.69	1.43	2.5
2.6	55.26	55.51	857.5	0.00604	287.50	380.15	1.2837	1.5658	2.183	2.229	2.149	211	112.9	77.7	15.34	54.5	24.62	1.26	2.6
2.7	56.97	57.21	842.4	0.00569	290.89	379.62	1.2937	1.5624	2.288	2.401	2.289	200	111.2	74.9	15.69	53.8	25.65	1.10	2.7
2.8	58.63	58.86	826.8	0.00536	294.29	378.96	1.3036	1.5587	2.414	2.609	2.459	190	109.5	72.1	16.07	53.2	26.79	0.94	2.8
2.9	60.24	60.46	810.5	0.00505	297.70	378.14	1.3135	1.5547	2.569	2.868	2.672	179	107.7	69.3	16.49	52.6	28.06	0.80	2.9
3.0	61.81	62.01	793.4	0.00475	301.15	377.15	1.3234	1.5503	2.765	3.197	2.944	169	106.0	66.5	16.95	52.0	29.51	0.67	3.0
3.2	64.82	64.99	755.6	0.00417	308.25	374.49	1.3438	1.5397	3.381	4.233	3.797	148	102.3	60.9	18.09	51.2	33.17	0.43	3.2
3.4	67.67	67.81	709.8	0.00361	315.97	370.45	1.3657	1.5255	4.771	6.536	5.689	126	98.5	54.7	19.68	51.3	38.73	0.23	3.4
3.729[c]	72.05	72.05	486.5	0.00206	343.92	343.92	1.4455	1.4455	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00	3.729

[a]Temperatures on ITS-90 scale [b]Bubble and dew points at one standard atmosphere [c]Critical point



الشكل 2-3/6: مخطط الضغط – المحتوى الحراري لمائع التثليج R- 404A [1].

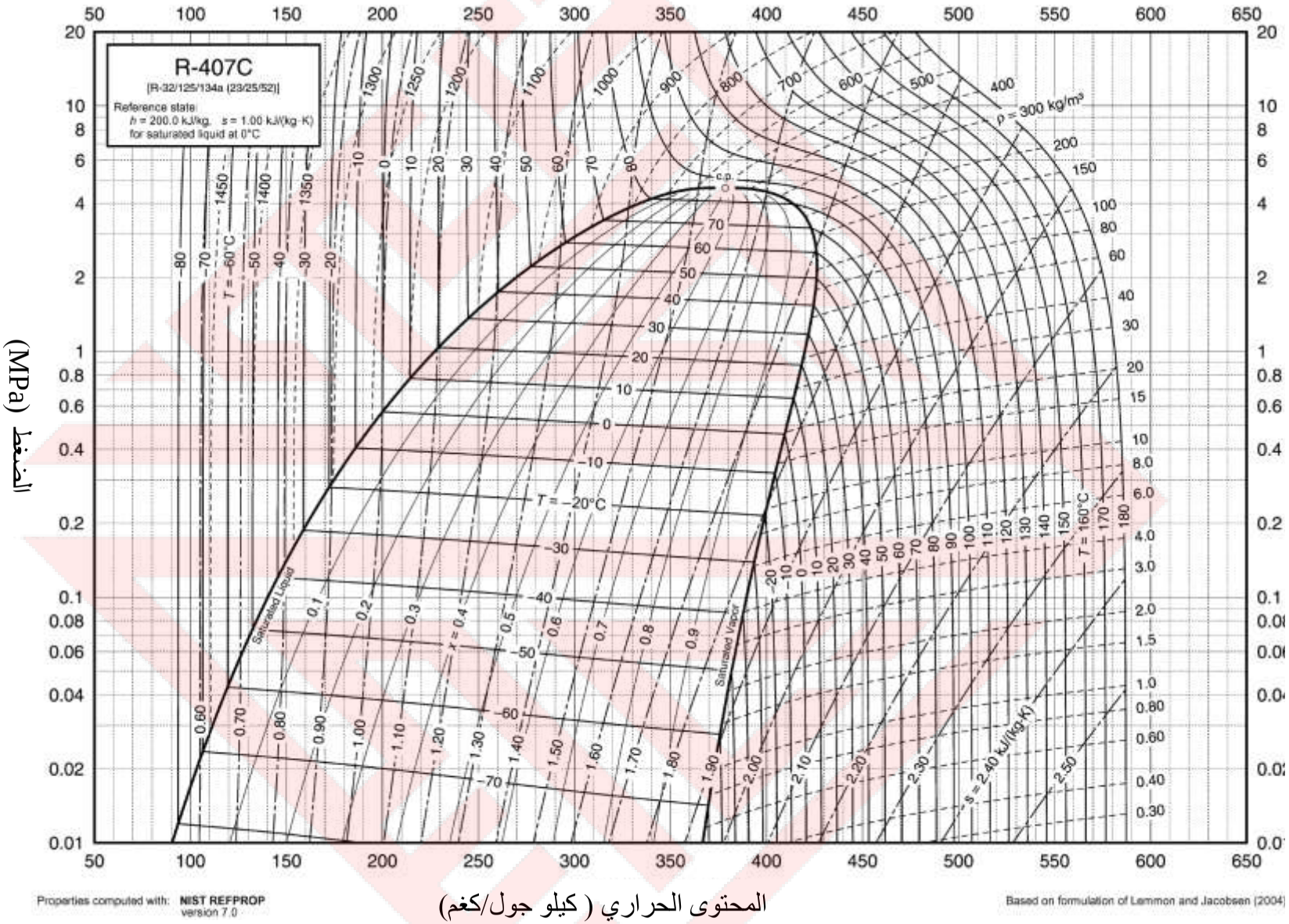
الجدول 2–5/6: خواص التشبع لمائع التثليج R-407C [5].

Pressure, MPa	Temperature,* °C Bubble	Temperature,* °C Dew	Density, kg/m³ Liquid	Volume, m³/kg Vapor	Enthalpy, kJ/kg Liquid	Enthalpy, kJ/kg Vapor	Entropy, kJ/(kg·K) Liquid	Entropy, kJ/(kg·K) Vapor	Specific Heat c_p, kJ/(kg·K) Liquid	Specific Heat c_p, kJ/(kg·K) Vapor	c_p/c_v Vapor	Velocity of Sound, m/s Liquid	Velocity of Sound, m/s Vapor	Viscosity, μPa·s Liquid	Viscosity, μPa·s Vapor	Thermal Cond., mW/(m·K) Liquid	Thermal Cond., mW/(m·K) Vapor	Surface Tension, mN/m	Pressure, MPa
0.01	–82.45	–74.81	1495.5	1.89703	90.48	366.78	0.5259	1.9471	1.281	0.668	1.182	1008	149.1	779.8	8.43	151.5	6.94	24.75	0.01
0.02	–72.50	–65.02	1466.7	0.99017	103.24	372.75	0.5910	1.9104	1.283	0.694	1.181	953	151.8	632.8	8.83	145.4	7.52	22.93	0.02
0.04	–61.25	–53.95	1433.7	0.51705	117.72	379.47	0.6612	1.8761	1.291	0.727	1.182	893	154.6	513.1	9.28	138.5	8.19	20.91	0.04
0.06	–53.96	–46.79	1412.0	0.35346	127.17	383.77	0.7050	1.8573	1.299	0.750	1.184	856	156.1	453.1	9.57	134.1	8.64	19.62	0.06
0.08	–48.42	–41.34	1395.3	0.26975	134.39	386.99	0.7374	1.8445	1.306	0.769	1.187	828	157.1	414.4	9.79	130.7	8.99	18.65	0.08
0.1	–43.90	–36.90	1381.5	0.21865	140.31	389.59	0.7635	1.8349	1.312	0.786	1.190	806	157.8	386.2	9.97	128.1	9.28	17.87	0.1
0.10132[b]	–43.63	–36.63	1380.7	0.21595	140.67	389.75	0.7650	1.8343	1.312	0.787	1.190	804	157.8	384.6	9.98	127.9	9.29	17.82	0.10132
0.12	–40.05	–33.11	1369.7	0.18411	145.39	391.78	0.7854	1.8273	1.318	0.800	1.193	787	158.3	364.3	10.12	125.8	9.52	17.21	0.12
0.14	–36.67	–29.79	1359.1	0.15916	149.86	393.68	0.8043	1.8210	1.324	0.813	1.196	770	158.7	346.6	10.25	123.8	9.75	16.63	0.14
0.16	–33.65	–26.83	1349.7	0.14025	153.86	395.36	0.8211	1.8156	1.329	0.825	1.199	755	159.0	331.8	10.37	122.0	9.94	16.12	0.16
0.18	–30.92	–24.15	1341.0	0.12542	157.51	396.86	0.8362	1.8110	1.334	0.837	1.201	742	159.3	319.1	10.48	120.4	10.13	15.66	0.18
0.2	–28.41	–21.69	1333.0	0.11347	160.87	398.22	0.8499	1.8069	1.339	0.848	1.204	730	159.5	308.0	10.57	119.0	10.29	15.24	0.2
0.22	–26.09	–19.41	1325.5	0.10362	163.99	399.47	0.8625	1.8033	1.344	0.858	1.207	719	159.6	298.2	10.66	117.6	10.45	14.86	0.22
0.24	–23.93	–17.29	1318.4	0.09536	166.91	400.62	0.8742	1.8000	1.349	0.868	1.210	708	159.7	289.5	10.75	116.4	10.60	14.50	0.24
0.26	–21.90	–15.31	1311.8	0.08833	169.65	401.69	0.8851	1.7970	1.354	0.877	1.213	698	159.8	281.6	10.83	115.2	10.74	14.16	0.26
0.28	–19.99	–13.43	1305.5	0.08227	172.24	402.69	0.8954	1.7942	1.358	0.886	1.216	689	159.8	274.4	10.90	114.2	10.87	13.85	0.28
0.3	–18.19	–11.66	1299.5	0.07699	174.71	403.62	0.9050	1.7917	1.362	0.895	1.219	680	159.8	267.8	10.97	113.1	10.99	13.56	0.3
0.32	–16.47	–9.98	1293.7	0.07235	177.06	404.49	0.9141	1.7894	1.367	0.903	1.222	672	159.8	261.8	11.04	112.2	11.11	13.28	0.32
0.34	–14.83	–8.38	1288.2	0.06824	179.30	405.32	0.9228	1.7872	1.371	0.911	1.224	664	159.8	256.1	11.11	111.2	11.23	13.01	0.34
0.36	–13.27	–6.85	1282.9	0.06457	181.45	406.10	0.9310	1.7851	1.375	0.919	1.227	656	159.8	250.9	11.17	110.4	11.35	12.76	0.36
0.38	–11.77	–5.38	1277.8	0.06127	183.52	406.85	0.9389	1.7832	1.379	0.927	1.230	649	159.7	246.0	11.23	109.5	11.46	12.52	0.38
0.4	–10.33	–3.97	1272.8	0.05830	185.52	407.55	0.9465	1.7814	1.383	0.934	1.233	642	159.7	241.4	11.28	108.7	11.57	12.29	0.4
0.42	–8.94	–2.61	1268.0	0.05559	187.44	408.23	0.9537	1.7796	1.387	0.942	1.236	635	159.6	237.1	11.34	107.9	11.68	12.07	0.42
0.44	–7.61	–1.31	1263.4	0.05313	189.30	408.87	0.9607	1.7780	1.391	0.949	1.239	629	159.5	233.0	11.39	107.2	11.78	11.85	0.44
0.46	–6.31	–0.04	1258.8	0.05087	191.11	409.48	0.9674	1.7764	1.395	0.956	1.242	622	159.4	229.1	11.45	106.5	11.88	11.65	0.46
0.48	–5.06	1.18	1254.4	0.04879	192.86	410.07	0.9739	1.7750	1.399	0.963	1.245	616	159.3	225.4	11.50	105.8	11.98	11.45	0.48
0.5	–3.85	2.36	1250.1	0.04687	194.56	410.64	0.9801	1.7735	1.403	0.970	1.248	610	159.2	221.9	11.54	105.1	12.08	11.26	0.5
0.55	–0.98	5.17	1239.8	0.04267	198.61	411.95	0.9950	1.7702	1.413	0.987	1.255	596	158.9	213.9	11.66	103.5	12.31	10.81	0.55
0.6	1.70	7.79	1230.0	0.03915	202.42	413.15	1.0087	1.7672	1.422	1.004	1.262	583	158.6	206.7	11.77	102.1	12.54	10.40	0.6
0.65	4.22	10.24	1220.7	0.03615	206.02	414.25	1.0216	1.7644	1.432	1.020	1.270	571	158.2	200.1	11.88	100.7	12.75	10.01	0.65
0.7	6.60	12.56	1211.7	0.03356	209.44	415.25	1.0338	1.7618	1.441	1.036	1.278	559	157.8	194.1	11.98	99.4	12.96	9.64	0.7
0.75	8.85	14.76	1203.1	0.03131	212.71	416.18	1.0452	1.7594	1.451	1.052	1.286	548	157.4	188.6	12.08	98.2	13.17	9.30	0.75
0.8	11.00	16.85	1194.9	0.02933	215.83	417.03	1.0561	1.7571	1.460	1.067	1.294	537	157.0	183.6	12.17	97.1	13.37	8.98	0.8
0.85	13.04	18.84	1186.8	0.02757	218.83	417.83	1.0665	1.7550	1.469	1.082	1.302	527	156.6	178.8	12.26	96.0	13.58	8.67	0.85
0.9	15.00	20.74	1179.1	0.02600	221.71	418.57	1.0764	1.7529	1.479	1.098	1.310	518	156.1	174.4	12.35	94.9	13.78	8.38	0.9
0.95	16.88	22.56	1171.5	0.02460	224.50	419.25	1.0859	1.7509	1.488	1.113	1.319	508	155.6	170.3	12.44	93.9	13.98	8.11	0.95
1.0	18.69	24.32	1164.1	0.02332	227.19	419.89	1.0950	1.7491	1.498	1.128	1.327	499	155.2	166.4	12.52	93.0	14.18	7.84	1.0
1.1	22.11	27.63	1149.9	0.02111	232.34	421.03	1.1122	1.7455	1.517	1.159	1.346	482	154.2	159.2	12.68	91.1	14.59	7.35	1.1
1.2	25.30	30.73	1136.2	0.01926	237.20	422.03	1.1283	1.7421	1.537	1.190	1.365	466	153.2	152.8	12.84	89.5	14.99	6.89	1.2
1.3	28.30	33.63	1123.0	0.01768	241.82	422.89	1.1434	1.7389	1.557	1.222	1.385	451	152.1	146.9	13.01	87.9	15.39	6.47	1.3
1.4	31.14	36.37	1110.2	0.01631	246.24	423.63	1.1577	1.7358	1.578	1.255	1.406	436	151.0	141.5	13.15	86.4	15.80	6.07	1.4
1.5	33.83	38.97	1097.7	0.01512	250.48	424.27	1.1713	1.7328	1.600	1.289	1.428	423	150.0	136.5	13.31	85.0	16.22	5.70	1.5
1.6	36.39	41.43	1085.5	0.01408	254.57	424.80	1.1843	1.7298	1.622	1.324	1.452	409	148.8	131.8	13.47	83.7	16.64	5.35	1.6
1.7	38.84	43.78	1073.5	0.01315	258.51	425.25	1.1967	1.7269	1.645	1.361	1.477	397	147.7	127.5	13.62	82.4	17.07	5.02	1.7
1.8	41.18	46.03	1061.7	0.01231	262.33	425.61	1.2086	1.7241	1.669	1.400	1.504	385	146.6	123.4	13.78	81.2	17.52	4.71	1.8
1.9	43.43	48.18	1050.0	0.01157	266.05	425.89	1.2200	1.7212	1.695	1.440	1.533	373	145.4	119.6	13.94	80.1	17.98	4.42	1.9
2.0	45.59	50.25	1038.5	0.01089	269.66	426.10	1.2311	1.7184	1.722	1.483	1.564	361	144.2	115.9	14.10	78.9	18.45	4.14	2.0
2.1	47.67	52.24	1027.1	0.01027	273.19	426.23	1.2418	1.7155	1.750	1.529	1.597	350	143.0	112.5	14.27	77.9	18.94	3.87	2.1
2.2	49.68	54.15	1015.7	0.00971	276.64	426.29	1.2522	1.7126	1.780	1.577	1.633	339	141.8	109.2	14.44	76.8	19.45	3.62	2.2
2.3	51.63	56.00	1004.4	0.00919	280.02	426.28	1.2624	1.7097	1.813	1.629	1.671	329	140.6	106.0	14.62	75.8	19.98	3.38	2.3
2.4	53.51	57.79	993.1	0.00871	283.34	426.20	1.2723	1.7068	1.847	1.684	1.713	318	139.4	103.0	14.79	74.9	20.54	3.15	2.4
2.5	55.34	59.51	981.8	0.00827	286.60	426.06	1.2819	1.7038	1.884	1.744	1.758	308	138.2	100.0	14.98	73.9	21.12	2.93	2.5
2.6	57.11	61.19	970.5	0.00786	289.82	425.85	1.2914	1.7007	1.924	1.810	1.808	298	136.9	97.2	15.17	73.0	21.73	2.72	2.6
2.7	58.83	62.81	959.0	0.00747	292.99	425.57	1.3006	1.6976	1.968	1.881	1.863	288	135.6	94.5	15.37	72.1	22.38	2.52	2.7
2.8	60.51	64.38	947.5	0.00711	296.12	425.21	1.3097	1.6944	2.016	1.958	1.923	279	134.4	91.9	15.58	71.3	23.06	2.33	2.8
2.9	62.14	65.91	935.9	0.00677	299.23	424.79	1.3187	1.6911	2.069	2.044	1.990	269	133.1	89.3	15.80	70.4	23.79	2.14	2.9
3.0	63.73	67.40	924.1	0.00645	302.31	424.29	1.3276	1.6877	2.128	2.139	2.065	259	131.7	86.8	16.03	69.6	24.56	1.96	3.0
3.2	66.80	70.25	899.9	0.00587	308.43	423.06	1.3450	1.6805	2.268	2.365	2.243	240	129.1	81.9	16.53	68.1	26.26	1.63	3.2
3.4	69.73	72.94	874.6	0.00533	314.54	421.46	1.3622	1.6726	2.451	2.657	2.475	222	126.4	77.1	17.09	66.6	28.22	1.33	3.4
3.6	72.53	75.50	847.6	0.00484	320.71	419.45	1.3795	1.6639	2.701	3.050	2.789	203	123.6	72.5	17.75	65.2	30.54	1.05	3.6
3.8	75.22	77.92	818.1	0.00439	327.02	416.91	1.3970	1.6540	3.065	3.613	3.239	184	120.7	67.7	18.52	64.0	33.33	0.79	3.8
4.0	77.82	80.21	785.1	0.00395	333.64	413.66	1.4152	1.6424	3.647	4.486	3.935	165	117.7	62.9	19.48	63.1	36.86	0.56	4.0
4.2	80.32	82.37	746.0	0.00352	340.83	409.34	1.4348	1.6281	4.726	6.029	5.159	146	114.6	57.6	20.75	62.7	41.59	0.36	4.2
4.63[c]	86.03	86.03	484.2	0.00207	378.48	378.48	1.5384	1.5384	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00	4.63

*Temperatures on ITS-90 scale

[b] Bubble and dew points at one standard atmosphere

[c] Critical point

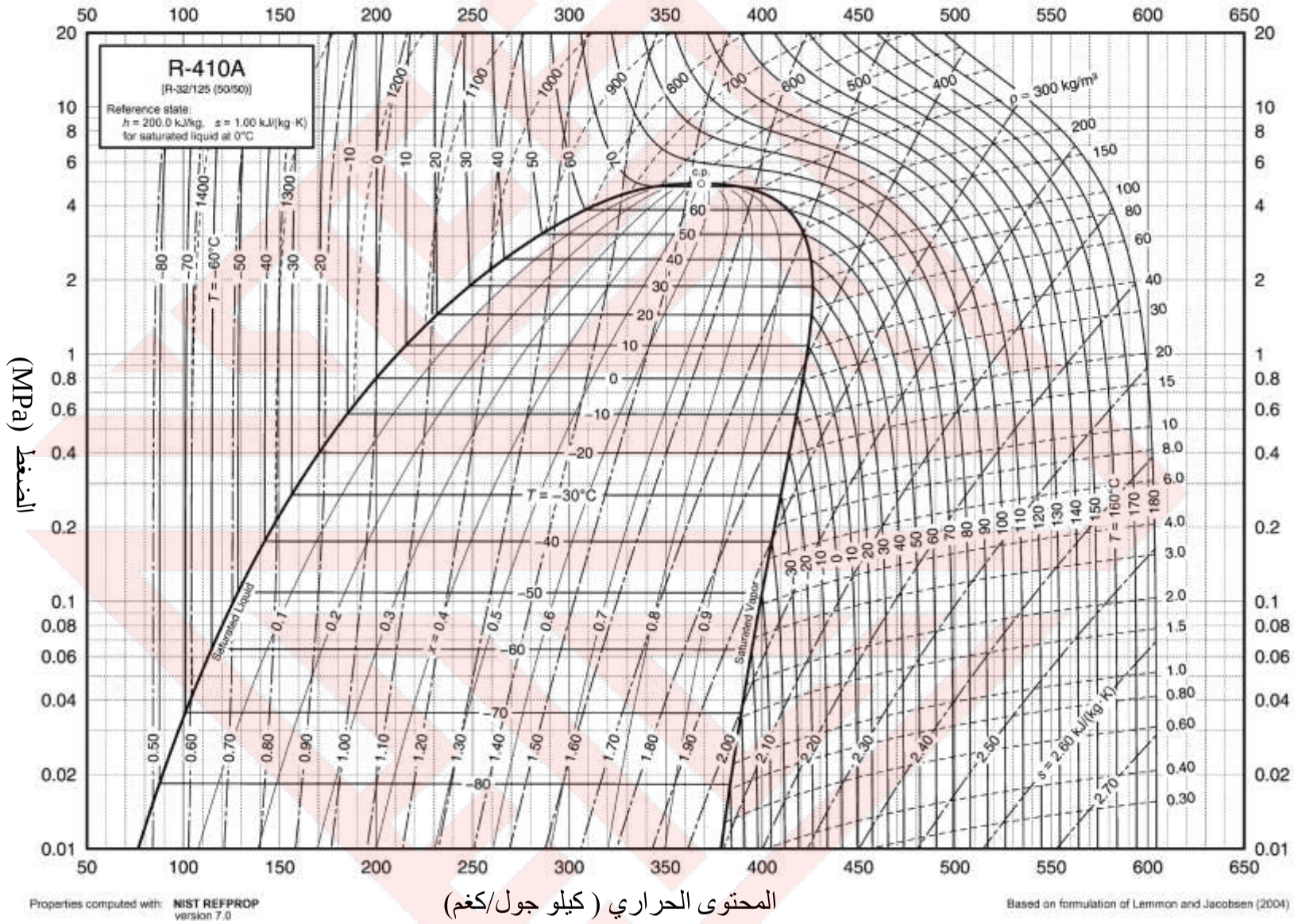


الشكل 2-4/6: مخطط الضغط – المحتوى الحراري لمائع التثليج R-407C [1] .

الجدول 2–6/6: خواص التشبع لمائع التثليج R-410A [5].

Pressure, MPa	Temperature,[a] °C		Density, kg/m³	Volume, m³/kg	Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg·K)		Specific Heat c_p, kJ/(kg·K)		c_p/c_v	Velocity of Sound, m/s		Viscosity, μPa·s		Thermal Cond., mW/(m·K)		Surface Tension, mN/m	Pressure, MPa
	Bubble	Dew	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		
0.01	−88.23	−88.14	1460.6	2.09888	76.56	378.76	0.4588	2.0927	1.344	0.668	1.227	1004	159.7	669.9	8.29	177.3	7.44	24.72	0.01
0.02	−78.79	−78.70	1432.9	1.09659	89.26	384.25	0.5258	2.0432	1.345	0.696	1.228	958	162.8	552.9	8.71	170.8	7.79	22.91	0.02
0.04	−68.12	−68.04	1401.1	0.57309	103.64	390.29	0.5978	1.9956	1.351	0.734	1.231	906	165.8	454.8	9.17	163.3	8.21	20.90	0.04
0.06	−61.22	−61.14	1380.0	0.39193	113.00	394.10	0.6426	1.9687	1.358	0.762	1.235	872	167.5	404.6	9.47	158.3	8.50	19.62	0.06
0.08	−55.98	−55.90	1363.9	0.29918	120.14	396.92	0.6758	1.9500	1.364	0.785	1.239	847	168.7	371.8	9.70	154.6	8.73	18.66	0.08
0.1	−51.70	−51.62	1350.5	0.24256	125.99	399.17	0.7024	1.9358	1.369	0.805	1.243	826	169.5	347.8	9.88	151.5	8.93	17.88	0.1
0.10132[b]	−51.44	−51.36	1349.7	0.23957	126.34	399.31	0.7040	1.9350	1.370	0.807	1.244	824	169.5	346.4	9.90	151.3	8.94	17.84	0.10132
0.12	−48.06	−47.98	1339.0	0.20427	130.99	401.05	0.7247	1.9243	1.375	0.823	1.247	808	170.1	329.0	10.04	148.9	9.11	17.23	0.12
0.14	−44.87	−44.79	1328.8	0.17661	135.39	402.67	0.7441	1.9147	1.380	0.839	1.251	792	170.6	313.8	10.18	146.6	9.26	16.65	0.14
0.16	−42.02	−41.94	1319.6	0.15565	139.34	404.09	0.7612	1.9065	1.385	0.854	1.255	778	170.9	300.9	10.30	144.6	9.40	16.15	0.16
0.18	−39.44	−39.36	1311.2	0.13921	142.93	405.36	0.7766	1.8993	1.390	0.868	1.259	765	171.2	289.9	10.41	142.8	9.53	15.69	0.18
0.2	−37.07	−36.99	1303.4	0.12595	146.23	406.50	0.7905	1.8928	1.395	0.881	1.263	753	171.5	280.3	10.51	141.1	9.66	15.27	0.2
0.22	−34.89	−34.80	1296.2	0.11503	149.29	407.53	0.8034	1.8871	1.399	0.893	1.266	743	171.6	271.8	10.61	139.5	9.77	14.89	0.22
0.24	−32.85	−32.76	1289.4	0.10587	152.15	408.49	0.8153	1.8818	1.404	0.904	1.270	732	171.8	264.2	10.70	138.1	9.88	14.54	0.24
0.26	−30.94	−30.85	1283.0	0.09807	154.84	409.36	0.8264	1.8770	1.408	0.916	1.274	723	171.9	257.2	10.78	136.7	9.98	14.21	0.26
0.28	−29.14	−29.05	1276.9	0.09135	157.38	410.18	0.8368	1.8726	1.413	0.926	1.277	714	172.0	251.0	10.86	135.5	10.08	13.90	0.28
0.3	−27.44	−27.35	1271.1	0.08550	159.80	410.94	0.8466	1.8685	1.417	0.936	1.281	705	172.0	245.2	10.93	134.3	10.18	13.60	0.30
0.32	−25.82	−25.73	1265.5	0.08035	162.10	411.65	0.8558	1.8647	1.421	0.946	1.285	697	172.0	239.8	11.00	133.10	10.27	13.33	0.32
0.34	−24.28	−24.19	1260.2	0.07579	164.29	412.32	0.8646	1.8611	1.426	0.956	1.288	689	172.1	234.9	11.07	132.10	10.36	13.06	0.34
0.36	−22.81	−22.72	1255.0	0.07172	166.40	412.95	0.8703	1.8577	1.430	0.965	1.292	682	172.1	230.3	11.13	131.00	10.46	12.81	0.36
0.38	−21.40	−21.31	1250.1	0.06806	168.43	413.54	0.8810	1.8545	1.434	0.975	1.295	675	172.0	226.0	11.19	130.10	10.55	12.57	0.38
0.4	−20.04	−19.95	1245.3	0.06476	170.38	414.10	0.8887	1.8514	1.438	0.983	1.299	668	172.0	221.9	11.25	129.10	10.64	12.35	0.40
0.42	−18.74	−18.65	1240.6	0.06176	172.26	414.64	0.8960	1.8486	1.443	0.992	1.303	661	172.0	218.1	11.31	128.20	10.73	12.13	0.42
0.44	−17.48	−17.39	1236.1	0.05902	174.08	415.14	0.9031	1.8458	1.447	1.001	1.306	655	171.9	214.5	11.36	127.30	10.82	11.92	0.44
0.46	−16.27	−16.18	1231.8	0.05652	175.84	415.63	0.9099	1.8432	1.451	1.009	1.310	649	171.8	211.1	11.42	126.50	10.91	11.71	0.46
0.48	−15.10	−15.00	1227.5	0.05421	177.55	416.09	0.9165	1.8407	1.455	1.017	1.313	643	171.8	207.8	11.47	125.70	10.99	11.52	0.48
0.5	−13.96	−13.86	1223.3	0.05209	179.21	416.53	0.9228	1.8383	1.459	1.025	1.317	637	171.7	204.7	11.52	124.90	11.08	11.33	0.50
0.55	−11.26	−11.16	1213.4	0.04743	183.17	417.54	0.9379	1.8326	1.469	1.045	1.326	623	171.4	197.6	11.64	123.10	11.28	10.89	0.55
0.6	−8.74	−8.64	1203.9	0.04352	186.89	418.46	0.9518	1.8275	1.479	1.064	1.335	610	171.2	191.2	11.75	121.40	11.48	10.47	0.60
0.65	−6.38	−6.28	1194.9	0.04019	190.40	419.28	0.9649	1.8227	1.489	1.083	1.344	597	170.9	185.3	11.86	119.70	11.68	10.09	0.65
0.7	−4.15	−4.05	1186.3	0.03732	193.74	420.03	0.9772	1.8183	1.499	1.101	1.354	586	170.5	180.0	11.96	118.20	11.88	9.73	0.70
0.75	−2.04	−1.93	1178.1	0.03482	196.92	420.71	0.9888	1.8141	1.509	1.119	1.363	574	170.2	175.1	12.06	116.80	12.07	9.39	0.75
0.8	−0.03	0.08	1170.1	0.03262	199.96	421.33	0.9998	1.8102	1.519	1.136	1.373	564	169.8	170.6	12.15	115.50	12.26	9.07	0.80
0.85	1.89	1.99	1162.4	0.03068	202.88	421.89	1.0103	1.8065	1.529	1.154	1.382	554	169.4	166.4	12.24	114.20	12.45	8.77	0.85
0.9	3.72	3.83	1154.9	0.02894	205.69	422.41	1.0204	1.8030	1.540	1.171	1.392	544	169.0	162.4	12.33	113.00	12.64	8.48	0.90
0.95	5.48	5.58	1147.6	0.02738	208.40	422.88	1.0300	1.7996	1.550	1.188	1.402	535	168.6	158.7	12.41	111.80	12.82	8.21	0.95
1.0	7.17	7.27	1140.5	0.02596	211.02	423.31	1.0392	1.7964	1.560	1.205	1.413	525	168.1	155.3	12.49	110.70	13.01	7.95	1.00
1.1	10.36	10.47	1126.8	0.02351	216.03	424.07	1.0567	1.7903	1.581	1.239	1.434	508	167.2	148.8	12.65	108.60	13.39	7.46	1.10
1.2	13.34	13.46	1113.7	0.02145	220.76	424.68	1.0730	1.7846	1.603	1.274	1.457	492	166.3	143.1	12.81	106.70	13.79	7.01	1.20
1.3	16.15	16.26	1101.0	0.01970	225.26	425.19	1.0883	1.7792	1.624	1.31	1.481	477	165.4	137.8	12.95	104.80	14.19	6.59	1.30
1.4	18.79	18.91	1088.8	0.01819	229.56	425.59	1.1027	1.7741	1.647	1.347	1.506	462	164.4	133.0	13.12	103.10	14.60	6.20	1.40
1.5	21.30	21.41	1076.9	0.01687	233.68	425.89	1.1165	1.7691	1.670	1.385	1.532	448	163.4	128.5	13.23	101.50	15.03	5.83	1.50
1.6	23.68	23.80	1065.2	0.01571	237.65	426.11	1.1296	1.7644	1.694	1.424	1.560	435	162.4	124.3	13.38	99.98	15.46	5.49	1.60
1.7	25.96	26.07	1053.8	0.01468	241.48	426.25	1.1421	1.7597	1.719	1.465	1.590	422	161.4	120.4	13.52	98.53	15.91	5.16	1.70
1.8	28.13	28.25	1042.6	0.01376	245.19	426.31	1.1542	1.7552	1.745	1.509	1.621	410	160.3	116.8	13.66	97.15	16.38	4.86	1.80
1.9	30.22	30.34	1031.6	0.01293	248.79	426.31	1.1657	1.7508	1.772	1.555	1.655	398	159.3	113.3	13.81	95.82	16.86	4.57	1.90
2.0	32.22	32.34	1020.7	0.01218	252.29	426.24	1.1769	1.7464	1.800	1.603	1.690	386	158.2	110.1	13.95	94.56	17.36	4.29	2.00
2.1	34.16	34.28	1009.9	0.0115	255.71	426.10	1.1878	1.7421	1.830	1.655	1.728	375	157.1	107.0	14.10	93.34	17.88	4.03	2.10
2.2	36.02	36.14	999.2	0.01088	259.05	425.90	1.1983	1.7379	1.861	1.709	1.769	364	156.0	104.0	14.25	92.17	18.42	3.78	2.20
2.3	37.82	37.94	988.6	0.01031	262.32	425.64	1.2085	1.7336	1.894	1.768	1.813	353	154.9	101.2	14.40	91.05	18.99	3.54	2.30
2.4	39.56	39.68	978.0	0.00978	265.52	425.33	1.2185	1.7294	1.929	1.831	1.860	343	153.8	98.5	14.55	89.96	19.58	3.31	2.40
2.5	41.25	41.37	967.5	0.00929	268.67	424.95	1.2282	1.7251	1.967	1.898	1.911	332	152.6	95.9	14.71	88.91	20.21	3.10	2.50
2.6	42.89	43.00	957.0	0.00883	271.77	424.51	1.2377	1.7209	2.008	1.971	1.966	322	151.5	93.4	14.87	87.89	20.87	2.89	2.60
2.7	44.48	44.59	946.4	0.00841	274.82	424.02	1.2470	1.7166	2.052	2.050	2.026	313	150.3	91.0	15.03	86.91	21.56	2.69	2.70
2.8	46.02	46.14	935.8	0.00802	277.84	423.47	1.2561	1.7123	2.100	2.136	2.091	303	149.1	88.6	15.21	85.96	22.29	2.50	2.80
2.9	47.53	47.64	925.2	0.00764	280.82	422.85	1.2651	1.7079	2.153	2.230	2.163	293	147.9	86.3	15.38	85.04	23.07	2.31	2.90
3.0	48.99	49.10	914.5	0.00729	283.78	422.18	1.2740	1.7035	2.211	2.333	2.243	284	146.7	84.1	15.57	84.14	23.89	2.14	3.00
3.2	51.81	51.91	892.6	0.00665	289.62	420.62	1.2913	1.6944	2.348	2.575	2.429	265	144.2	79.9	15.96	82.42	25.70	1.81	3.20
3.4	54.49	54.59	870.0	0.00607	295.43	418.78	1.3085	1.6849	2.522	2.879	2.663	247	141.7	75.7	16.39	80.81	27.77	1.50	3.40
3.6	57.05	57.15	846.3	0.00555	301.26	416.60	1.3254	1.6747	2.752	3.276	2.970	229	139.0	71.7	16.87	79.29	30.17	1.22	3.60
3.8	59.50	59.59	821.0	0.00506	307.16	414.03	1.3425	1.6638	3.070	3.815	3.386	210	136.3	67.7	17.43	77.90	33.02	0.97	3.80
4.0	61.85	61.93	793.5	0.00460	313.24	410.97	1.3600	1.6517	3.541	4.596	3.987	192	133.4	63.7	18.08	76.68	36.48	0.74	4.00
4.2	64.10	64.17	762.6	0.00417	319.65	407.24	1.3783	1.6380	4.306	5.826	4.929	173	130.4	59.4	18.87	75.77	40.86	0.53	4.20
4.903[c]	71.36	71.36	459.5	0.00218	368.55	368.55	1.5181	1.5181	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00	4.903

[a]Temperatures on ITS-90 scale [b]Bubble and dew points at one standard atmosphere [c]Critical point



الشكل 2-5/6: مخطط الضغط – المحتوى الحراري لمائع التثليج R- 410A [1] .

الجدول 2-1/7: الإستعمالات المثالية لموائع التثليج الثانوية[4].

ت	الإستعمال	مائع التثليج الثانوي
1	معامل التخمير	غليكول البروبلين
2	المصانع الكيميائية	كلوريد الصوديوم، كلوريد الكالسيوم، غليكول الأثيلين
3	معامل الألبان	كلوريد الصوديوم، كلوريد الكالسيوم، غليكول البروبلين
4	تصنيع المواد الغذائية	كلوريد الصوديوم، كلوريد الكالسيوم، غليكول البروبلين
5	صناعة الآيس – كريم	كلوريد الكالسيوم، غليكول البروبلين
6	معامل الثلج	كلوريد الكالسيوم، كلوريد الصوديوم
7	تعبئة اللحوم	كلوريد الصوديوم، كلوريد الكالسيوم
8	حلبات التزلج على الجليد	كلوريد الكالسيوم، غليكول الأثيلين
9	تطبيقات درجات حرارة واطئة خاصة	كلوريد الكالسيوم، غليكول الأثيلين

الجدول 2-2/7: خواص محلول كلوريد الكالسيوم [1].

النسبة الوزنية لكلوريد الكالسيوم النقي %	الحرارة النوعية عند 15 °C	بداية التبلور °C	الكثافة عند 15 °C (kg/m³)		الكثافة عند درجات حرارة مختلفة (kg/m³)			
			$CaCl_2$	Brine	−20°C	−10°C	0°C	10°C
0	4184	0.0	0.0	999				
5	3866	−2.4	52.2	1044			1042	1041
6	3824	−2.9	63.0	1049			1051	1050
7	3757	−3.4	74.2	1059			1060	1059
8	3699	−4.1	85.5	1068			1070	1068
9	3636	−4.7	96.9	1078			1079	1077
10	3577	−5.4	108.6	1087			1088	1086
11	3523	−6.2	120.5	1095			1097	1095
12	3464	−7.1	132.5	1104			1107	1104
13	3414	−8.0	144.8	1113			1116	1114
14	3364	−9.2	157.1	1123			1126	1123
15	3318	−10.3	169.8	1132		1140	1136	1133
16	3259	−11.6	182.6	1141		1150	1145	1142
17	3209	−13.0	195.7	1152		1160	1155	1152
18	3163	−14.5	209.0	1161		1170	1165	1162
19	3121	−16.2	222.7	1171		1179	1175	1172
20	3084	−18.0	236.0	1180		1189	1185	1182
21	3050	−19.9	249.6	1189				
22	2996	−22.1	264.3	1201	1214	1210	1206	1202
23	2958	−24.4	278.7	1211				
24	2916	−26.8	293.5	1223	1235	1231	1227	1223
25	2882	−29.4	308.2	1232				
26	2853	−32.1	323.1	1242				
27	2816	−35.1	338.5	1253				
28	2782	−38.8	354.0	1264				
29	2753	−45.2	369.9	1275				
29.87	2741	−55.0	378.8	1289				
30	2732	−46.0	358.4	1294				
32	2678	−28.6	418.1	1316				
34	2636	−15.4	452.0	1339				

الجدول 2-3/7: خواص محلول كلوريد الصوديوم [5].

النسبة الوزنية لكلوريد الصوديوم النقي %	الحرارة النوعية عند 15 °C J/(kg·K)	بداية التبلور °C	الكثافة عند 15 °C (kg/m³) NaCl	الكثافة عند 15 °C (kg/m³) Brine	الكثافة عند درجات حرارة مختلفة (kg/m³) −10°C	−0°C	10°C	20°C
0	4184	0.0	0.0	1000				
5	3925	−2.9	51.7	1035		1038.1	1036.5	1034.0
6	3879	−3.6	62.5	1043		1045.8	1043.9	1041.2
7	3836	−4.3	73.4	1049		1053.7	1051.4	1048.5
8	3795	−5.0	84.6	1057		1061.2	1058.9	1055.8
9	3753	−5.8	95.9	1065		1069.0	1066.4	1063.2
10	3715	−6.6	107.2	1072		1076.8	1074.0	1070.6
11	3678	−7.3	118.8	1080		1084.8	1081.6	1078.1
12	3640	−8.2	130.3	1086		1092.4	1089.6	1085.6
13	3607	−9.1	142.2	1094		1100.3	1097.0	1093.2
14	3573	−10.1	154.3	1102		1108.2	1104.7	1100.8
15	3544	−10.9	166.5	1110	1119.4	1116.2	1112.5	1108.5
16	3515	−11.9	178.9	1118	1127.6	1124.2	1120.4	1116.2
17	3485	−13.0	191.4	1126	1135.8	1132.2	1128.3	1124.0
18	3456	−14.1	204.1	1134	1144.1	1140.3	1136.2	1131.8
19	3427	−15.3	217.0	1142	1153.4	1148.5	1144.3	1139.7
20	3402	−16.5	230.0	1150	1160.7	1156.7	1154.1	1147.7
21	3376	−17.8	243.2	1158	1169.1	1165.0	1160.5	1155.8
22	3356	−19.1	256.6	1166	1177.6	1173.3	1168.7	1163.9
23	3330	−20.6	270.0	1174	1186.1	1181.7	1177.0	1172.0
24	3310	−15.7	283.7	1182	1194.7	1190.1	1185.3	1180.3
25	3289	−8.8	297.5	1190				
25.2		0.0						

مراجع الباب 2

[1] ASHRAE, "***1981 ASHRAE Handbook : Fundamentals***", Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A. ASHRAE 1981.

[2] الجودي، د.خالد أحمد،" ***مبادئ هندسة تكييف الهواء والتثليج***"، جامعة البصرة، الطبعة الثانيـة، 1996.

[3] Khurmi, R.S. and Gupta, J.K., " ***A Text Book of Air Conditioning and Refrigeration***", EPH Ltd., New Delhi, 1987.

[4] Al- Jeebori, A.S., "***Fundamentals of Air Conditioning and Refrigeration***", Dar Al – Kutub, 2006.

[5] ASHRAE, "***2013 ASHRAE Handbook : Fundamentals***", Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A., ASHRAE, 2013.

[6] Jain, V.K., " ***Refrigeration and Air Conditioning*** – *Theory and Practice*", S. Chand & Co. ltd., New Delhi, 1986.

[7] وزارة البيئة العراقية، وحدة الأوزون الوطنية، " *عشرون سؤالاً عن الأوزون*"، وزارة البيئة،2011.

[8] UNEP , "***Good Practices in Refrigeration Training Manual*** ", Dec. 1994.

[9] برنامج الأمم المتحدة للبيئة، "***الدليل الارشادي لفنيي خدمات التثليج***"، ترجمة د. خالد الجودي ود.عصام خليل، قيد الطبع.

[10] "***Britannica Online Encyclopedia***", www.britannica.com.

الباب 3

تصنيف منظومات التثليج واستعمالاتها

(Refrigerating System Classification and its Applications)

3-1 مكيف الهواء المنزلي (Domestic air conditioner)

مكيف الهواء المنزلي وسيلة لتيسير الراحة الى الساكنين عن طريق تبريد الهواء وسحب الرطوبة منه وترشيحه وتدويره داخل الحيز المكيف. ويمكن ان يحقق التهوية عن طريق سحب الهواء الخارجي الى الغرفة وطرد كمية مساوية من الهواء الى الخارج. تتم السيطرة على درجة حرارة الغرفة بواسطة منظم درجة حرارة متكامل. كما يمكن ان يقوم المكيف بتدفئة الغرفة اذا احتوى على مضخة حرارية (Heat pump) أو سلك تسخين كهربائي. تصنف أجهزة تكييف الهواء المنزلي الى أربعة أنواع هي [1] :

3-1/1 مكيف الهواء الجداري (الشباكي) (Window type air conditioner)

ينصب خلال شباك أو خلال فتحة في جدار الغرفة، ويحتوي على نظام سيطرة داخلي بسيط يسمى منظم درجة الحرارة (thermostat) يقوم بتشغيل وإطفاء ضاغط دورة التثليج للسيطرة على درجة حرارة الغرفة. ويتحقق تكييف الهواء عن طريق مروحة تدفع الهواء عبر مبخر منظومة تثليج مغلقة. يقع مكثف المكيف خارج الغرفة، وهنالك مروحة تقوم بسحب الهواء من الخارج ودفعه عبر مكثف دورة التثليج. وينصب المكيف الجداري بشكل مستقل لكل غرفة، ويتناسب هذا النوع من المكيفات مع الأبنية القديمة التي لايمكن تكييفها بأنظمة التكييف المركزي. ولاتزيد سعة المكيفات الجدارية على 2 TR تثليج أو ما يعادل (24000 Btu/h).

3-1/2 مكيف الهواء المنفصل (Split type air conditioner)

يسمى هذا النوع أيضا بالمكيفات الخالية من مجاري الهواء، ويحتوي على جزأين، أحدهما داخل الغرفة ويحتوي على مروحة ومبخر منظومة التثليج ووسيلة السيطرة، والجزء الآخر خارج الغرفة ويحتوي على ضاغط وحدة التثليج ومروحة تسحب الهواء الخارجي من خلال المكثف. تربط الوحدتان بواسطة أنابيب نحاسية تنقل مائع التثليج بين الجزأين وتمر من خلال فتحة في الجدار، ولا تزيد سعة مكيفات الهواء المنفصلة على 5 TR أو ما يعادل(60000 Btuh).

3-1/3 مكيفات الهواء المتنقلة (Portable type air conditioner)

وهي من النوع المجمع تستعمل للتكييف الموضعي وقد شاعت حديثا في العراق. توضع داخل الحيز المكيف وتستعمل خرطوماً لطرد الهواء الساخن المستعمل في تبريد مكثف دورة التثليج الى خارج الغرفة. وتحتوي على منظم درجة حرارة (thermostat) تتحقق من خلاله السيطرة على درجة حرارة الغرفة عن طريق تشغيل وايقاف ضاغط الدورة. وتستعمل في الغرف التي يصعب فيها نصب مكيف الهواء الجداري او وحدة التكييف المنفصلة، وتتواجد بسعات تقارب الطن الواحد تثليج (12000 Btuh).

3-1/4 المضخات الحرارية (Heat pumps)

قد تحتوي كل من مكيفات الهواء الجدارية والمنفصلة والمتنقلة المذكورة آنفاً على صمام رباعي ذي ملف لولبي لتحويل مكيف الهواء الى مضخة حرارية عن طريق عكس دورة التثليج. وعند عكس دورة التثليج تقوم المكيفات بتدفئة الغرفة خلال الفصول الباردة بدلا من التبريد [2].

وبحسب تصنيف مؤسسة ENERGY STAR يجب أن تتميز مكيفات الهواء المنزلية بنسبة فعالية للطاقة (energy efficiency ratio) (أو معامل أداء) لا تقل عما مبين في الجدول (3-1/1).

الجدول 3-1/1: نسبة فعالية للطاقة (ومعامل الأداء) لوحدات التكييف المنزلية بحسب تصنيف مؤسسة ENERGY STAR.

مكيفات هواء بدون صمام عاكس		
السعة (Btu/h)	نسبة فعالية الطاقة *	معامل الأداء**
أصغر من 6000	10.7	3.13
من 6000 الى 7999	10.8	3.16
من 8000 الى 19999	10.7	3.13
يساوي 20000 أو أكبر	9.4	2.75
مكيف هواء مع صمام عاكس		
أصغر من 2000	9.9	2.90
أكبر من 2000	9.4	2.75

* نسبة فعالية الطاقة، تساوي النسبة بين سعة تبريد المكيف بوحدات الحرارة البريطانية بالساعة الى مقدار الطاقة الكهربائية المستهلكة من قبل ضاغط المكيف بوحدات الواط.

** يساوي معامل الأداء النسبة بين سعة التبريد بوحدات الواط الى مقدار الطاقة المستهلكة من قبل المكيف بوحدات الواط.

3-2 المنظومات متغيرة تدفق مائع التثليج (Variable refrigerant flow system VRF)

تعتبر هذه المنظومات من صنف منظومات التمدد المباشر وهي تتشابه مع المنظومات الاحادية* (unitary systems) وتتشارك مع اجزاء المنظومة نفسها من ضاغط ومكثف ومبخر ووسيلة تمدد.

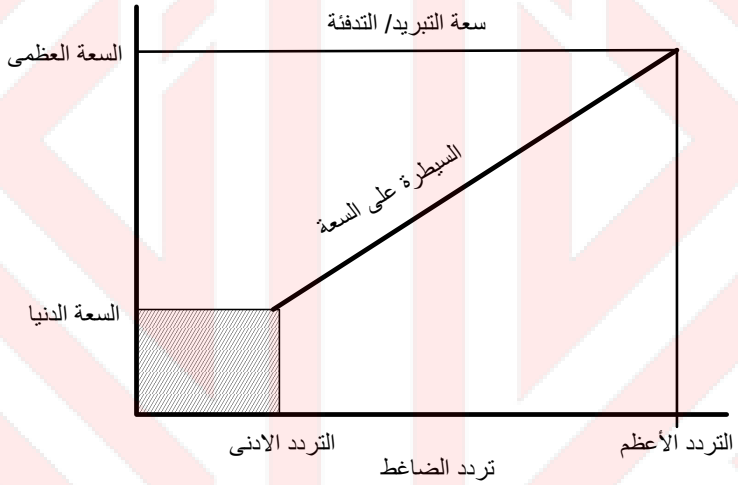
---

[1]* المنظومات الاحادية هي المنظومات التي تجمع في المصنع وتحتوي على المبخر او ملف التبريد اضافة الى الضاغط والمكثف وقد توفر التدفئة اضافة الى ذلك، وتسمى ايضاً بالمنظومات المجمعة (Package units).

وتخالف المنظومات الاحادية كونها تحتوي على وحدة تكثيف واحدة تربط جميع الوحدات الداخلية وتوضع وحدة التكثيف خارج او داخل البناية المكيفة اعتمادا على نوع التصميم.

وتتكون المنظومات متغيرة تدفق مائع التثليج من ضاغط واحد او عدد من الضواغط مع وحدة داخلية قد تحتوي او لا تحتوي على مجارٍ للهواء المكيف، وتمتاز هذه المنظومات بمرونة عالية بحيث يمكن ان تسيطر على احمال متغيرة وامكانية تغطية عدة مناطق وبحسب طبيعة تصميم المنطقة. وتتراوح سعاتها من 1.5 الى 64 طن تثليج للوحدات الخارجية ومن 0.4 الى 10 اطنان تثليج للوحدات الخارجية.

وتجهز هذه المنظومات على الاقل بضاغط واحد متغير السرعة او متغير السعة، ويبين الشكل (3-1/1) كيفية السيطرة على سعة ضاغط احادي متغير السرع حيث يعمل الضاغط عند الحد الضروري لتوفير الظروف الداخلية المطلوبة.

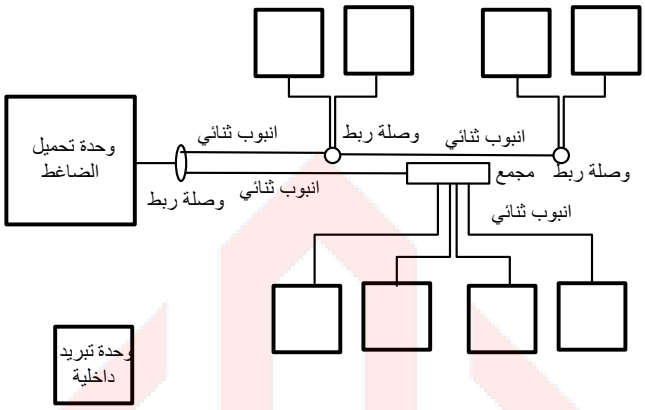


الشكل 3-1/1: منحني التحكم في سعة منظومة متغيرة تدفق مائع التثليج تحتوي على ضاغط احادي متغير السرع.

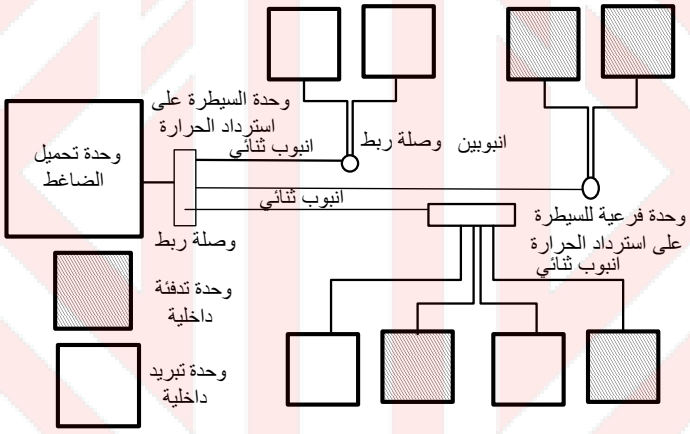
3-1/2 أنواع المنظومات متغيرة تدفق مائع التثليج

تتكون المنظومات متغيرة تدفق مائع التثليج من ثلاثة انواع هي:

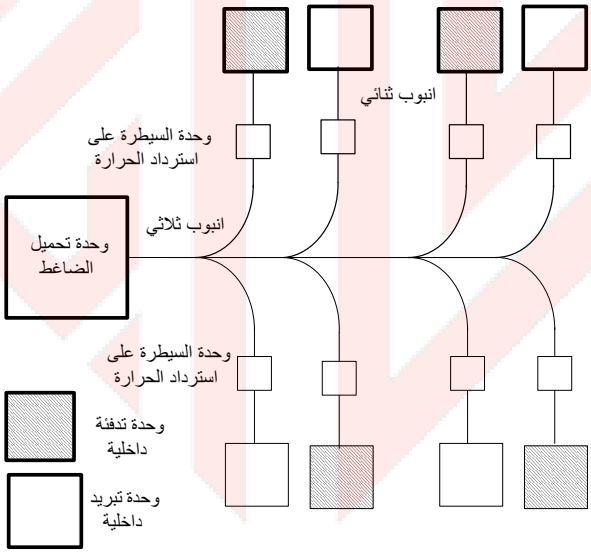
- منظومة تبريد فقط مبينة في الشكل (3-2/1).
- منظومة المضخة الحرارية مبينة في الشكل (3-3/1).
- منظومة استرداد الحرارة heat recovery مبينة في الشكل (3-4/1).



الشكل 3-1/2: منظومة التبريد متغيرة تدفق مائع التثليج.

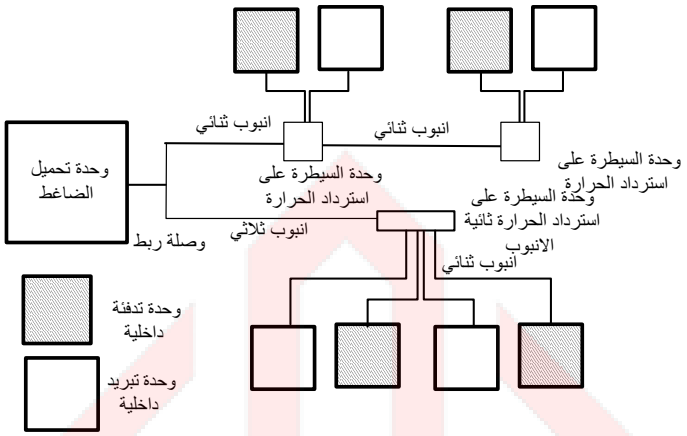


الشكل 3-1/3: منظومة المضخة الحرارية متغيرة تدفق مائع التثليج.



أ- ربط توازٍ

الشكل 3-1/4: منظومة متغيرة تدفق مائع التثليج ذات استرداد الحرارة.



ب- ربط الوحدات على التوازي – التوالي (هجين)

تتمة الشكل 3-1/4

وكما هو معروف فان المضخة الحرارية لها القابلية على عكس اتجاه سريان مائع التثليج للتحكم بطريقة التدفئة او التبريد للفضاء الداخلي. ويمكن التحكم بجميع الوحدات الداخلية بشكل مستقل ولكن لا يمكن تغيير طريقة عمل الوحدة حيث ان الوحدات المصممة للعمل كوحدة تبريد تعمل دائما للتبريد وكذلك بالنسبة لوحدات التدفئة.

اما بالنسبة لوحدات استرداد الحرارة فيمكن لها ان تحقق حالتي تبريد وتدفئة في وقت واحد. ويكون ذلك بأن تربط جميع الوحدات الداخلية بمنظومة السيطرة على استرداد الحرارة لغرض التحكم المستقل بدرجات الحرارة اضافة الى امكانية تغير طريقة عمل الوحدة الداخلية بين التدفئة والتبريد في أي وقت.

3-2/2 تعاريف

بحسب مواصفة معهد التكييف والتدفئة والتثليج AHRI standard 1230 تعرف المضخة الحرارية متعددة الوحدات المنفصلة بانها منظومة تامة التصنيع توضع ضمن غلاف معدني مغطى تستلم الحرارة من مصدر حراري وتطرحها الى الفضاء المكيف عند وجود الحاجة الى التدفئة. ويمكن ان تزيل الحرارة من المكان المكيف وتطرحه الى الخارج في حالة الرغبة في اجراء التبريد وازالة الرطوبة في المنظومة نفسها. وتتكون المنظومة متعددة الوحدات الداخلية من المبادلات الحرارية وضاغط او عدة ضواغط ومبادل حراري خارجي ويمكن ان تتوافر بعدة طرائق ربط.

في حين ان المنظومات متغيرة تدفق مائع التثليج متعددة الوحدات الداخلية هي منظومات تكييف منفصلة اومضخة حرارية تحتوي على دورة تثليج احادية مع وحدة او عدة وحدات خارجية وتحتوي على الاقل ضاغطاً واحداً بسرع متغيرة او تحتوي على ربط خاص للضواغط يتيح من خلالها تغير السعة بما لا يقل عن ثلاثة مراحل او اكثر، مع عدة وحدات داخلية مجهزة بوسائل تمدد مستقلة تتحقق السيطرة عليها بمنظومة سيطرة موحدة ومتصلة بمنظومة اتصال شبكية.

اما منظومات استعادة الحرارة متغيرة تدفق مائع التثليج متعددة الوحدات الداخلية فتعرف بانها منظومات يمكن ان تعمل كمكيفات للهواء او كمضخات حرارية ويمكن ان تنتج فعل تدفئة او تبريد في وقت واحد من

خلال نقل الحرارة المستعادة من الوحدة الداخلية التي تعمل عند حالة معينة(تبريد او تدفئة) الى وحدة داخلية اخرى تعمل عند حالة معاكسة. ويجب ان يحقق الجريان المتغير لمائع التثليج على الاقل ثلاث سعات او اكثر من خلال الربط المشترك لأنابيب الدورة.

3-3/2 استعمالات المنظومات متغيرة تدفق مائع التثليج

تستعمل المنظومات متغيرة تدفق مائع التثليج في عدة مجالات منها: الابنية ذات الارتفاع العالي وكذلك الابنية منخفضة الارتفاع، وفي المنشآت التعليمية كالمدارس والجامعات ومرافق الرعاية الصحية مثل عيادات الرعاية طويلة الاجل وفي اقسام سكن العاملين في المستشفى وفي المباني السكنية متعددة المستأجرين وفي المحلات التجارية والمطاعم وقاعات الاحتفالات وفي مراكز جمع البيانات. ولمزيد من المعلومات لعمل والسيطرة على هذه المنظومات يمكن الاطلاع على المرجع ASHRAE Handbook2012.

3-3 منظومات تكييف الهواء (Types of air conditioning units)

3-3/1 مكيفات الهواء المجمعة (Package air conditioning)

تستعمل لتكييف اكثر من فضاء أو فضاء واحد كبير المساحة، وتستعمل للأحمال الحرارية القليلة والمتوسطة. وقد تجمع مكونات دورة التثليج الانضغاطية (الضاغط والمكثف والمبخر وصمام التمدد) في حاوية واحدة، وتتواجد هذه عادة بسعات 3 و5 و7 و10 و15 اطنان تثليج أو أكثر. أو يجمع الضاغط والمكثف في حاوية واحدة، في حين أن مجموعة أداة التمدد والمبخر توضع في غرفة داخلية أو غرف متعددة، وتتواجد هذه بسعات 5 و8 و10 أطنان تثليج. تجهز منظومة التثليج بمفاتيح فصل للضغط العالي والضغط الواطئ، مع مفتاح حماية من زيادة الحمل، ومرحل كهربائي، ومفتاح تحسس لجريان الهواء ومفتاح تحسس لجريان الماء إذا كان المكثف مبردا بالماء. للأحمال الحرارية لغاية 5 أطنان تثليج يستعمل ضاغط واحد. وعند زيادة الحمل الحراري عن 5 أطنان تثليج يستعمل ضاغطان لتشكيل دورتي تثليج بمبخرين مستقلين ولكن متظافران مع بعضهما البعض. يعمل الضاغطان عند الحمل الحراري الأقصى، ويتوقف احدهماعن العمل عند الحمل الحراري الجزئي. يستعمل منظم درجة حرارة لكل دورة تثليج للتحكم بعمل كل ضاغط، أوقد يستعمل منظم درجة حرارة واحد للتحكم بعمل ضاغط واحد، في حين ان الضاغط الثاني يعمل باستمرار عند الحمل الحراري الأقصى. تتم المناوبة بين الحين والآخر بين الضاغطين للحمل الأقصى. للأحمال الحرارية العالية يمكن استعمال أكثر من وحدة تكييف مجمعة مع ربط مجاري الدفع والسحب المشتركة. يدفع الهواء المكيف بواسطة مروحة عالية السعة عادة بمعدل $0.167\ m^3/s$ الى $0.188\ m^3/s$ لكل طن تثليج، أو 350 cfm الى 400 cfm لكل طن تثليج عبر منظومة مجاري الهواء. ولغرض منع انجماد المبخر وللوحدات ذات الهواء الراجع يجب ان لا تقل كمية الهواء عن 325 cfm. وتقسم وحدات تكييف الهواء المجمعة بحسب تبريد المكثف الى نوعين هما[3] .

3-1/1/3 مكيفات الهواء المجمعة ذات المكثف المبرد بالهواء (Air cooled package units)

يصنع مكثف منظومات التكييف المجمعة ذات المكثف المبرد بالهواء عادة من عدة لفات من الأنابيب النحاسية المزعنفة، التي توضع خارج البناية في فضاء مفتوح يمكن من خلاله وصول الهواء الجوي الى المكثف ثم طرحه الى الخارج بعد تبريد المكثف بواسطة مروحة كما مبين في الشكل (3-1/3). عند احتواء منظومة التكييف على أكثر من ضاغط يكون المكثفان مستقلين ويوضعان جنب بعض، أو قد يعملان متظافرين.

3-2/1/3 مكيفات الهواء المجمعة ذات المكثف المبرد بالماء (Water cooled package units)

تحتوي المنظومة على برج تبريد مع منظومة أنابيب ومضخات لتدوير الماء خلال المكثف. يكون المكثف عادة من نوع الاسطوانة والأنابيب المندمجة (compact shell and tube) حيث يمر مائع التثليج خلال الأنابيب في حين أن ماء التبريد يكون في الاسطوانة. يكون المكثف المبرد الماء في وحدات التكييف المجمعة ذات الضاغطين مؤلفاً عادة من مكثف اسطوانة وأنابيب ومقسماً داخليا ليتشكل مساران مستقلان لكل دورة تثليج. أوقد يكون على شكل مكثفين مستقلين متجاورين أو متظافرين كما في المبخرين. ويبين الشكل (3-2/3) وحدة تكييف مجمعة ذات مكثف مبرد بالماء.

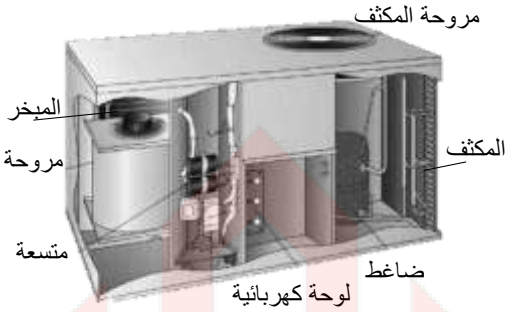
3-2/3 مكيفات الهواء المركزية (Central air conditioning units)

تستعمل منظومات التكييف المركزي في الفنادق الكبيرة والأبنية الكبيرة التي تحتوي على طوابق عديدة، وفي المطارات وغيرها من الأبنية ذات الأحمال الحرارية العالية. توضع وحدة التكثيف (الضاغط والمحرك الكهربائي للضاغط والمكثف) في غرفة المكائن بشكل مستقل عن المنطقة المكيفة ووحدة مناولة الهواء. وتكون غرفة مناولة الهواء قريبة من المنطقة المكيفة وبعيدة بقدر الإمكان عن غرفة المكائن. يبرد مكثف مكيفات الهواء المركزية إما بالهواء أو بالماء وكالآتي:

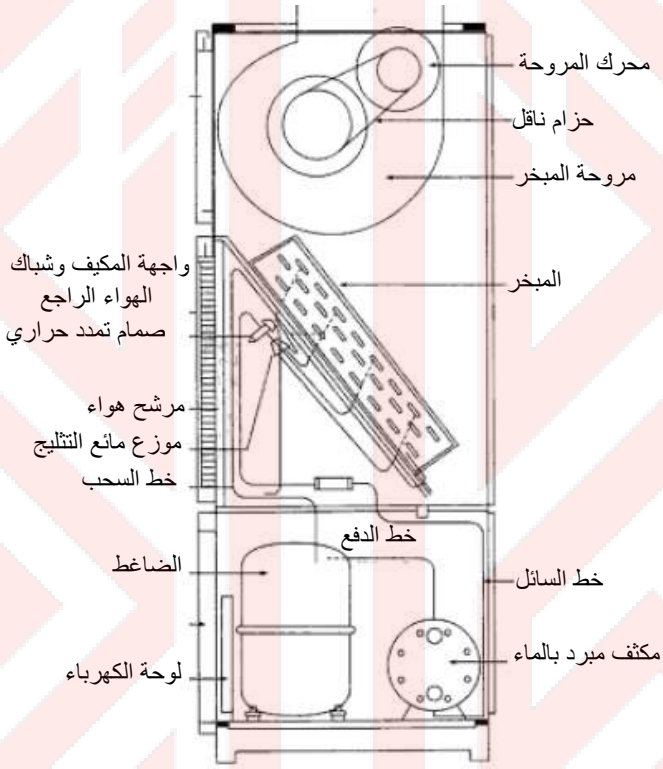
3-1/2/3 مكيفات الهواء المركزية– ذات المكثف المبرد بالهواء

(Air cooled central air conditioner)

يوضع المكثف المبرد بالهواء ومروحة المكثف في غرفة المكائن في حال وجود فضاء كاف يتوافر مع الهواء وبخلاف ذلك يوضع المكثف في الخارج. للسعات الحرارية المتوسطة تربط المروحة مباشرة الى محور المحرك، اما للسعات الحرارية العالية فيستعمل محرك كهربائي مستقل وتنقل الحركة الدورانية الى المروحة بواسطة حزام ناقل للحركة. وتقسم هذه المنظومات على وفق استعمالها إما لتبريد الهواء مباشرة أو تثليج الماء الذي يستعمل لتبريد الهواء.



الشكل 3-1/3: وحدة تكييف مجمعة ذات مكثف مبرد بالهواء.



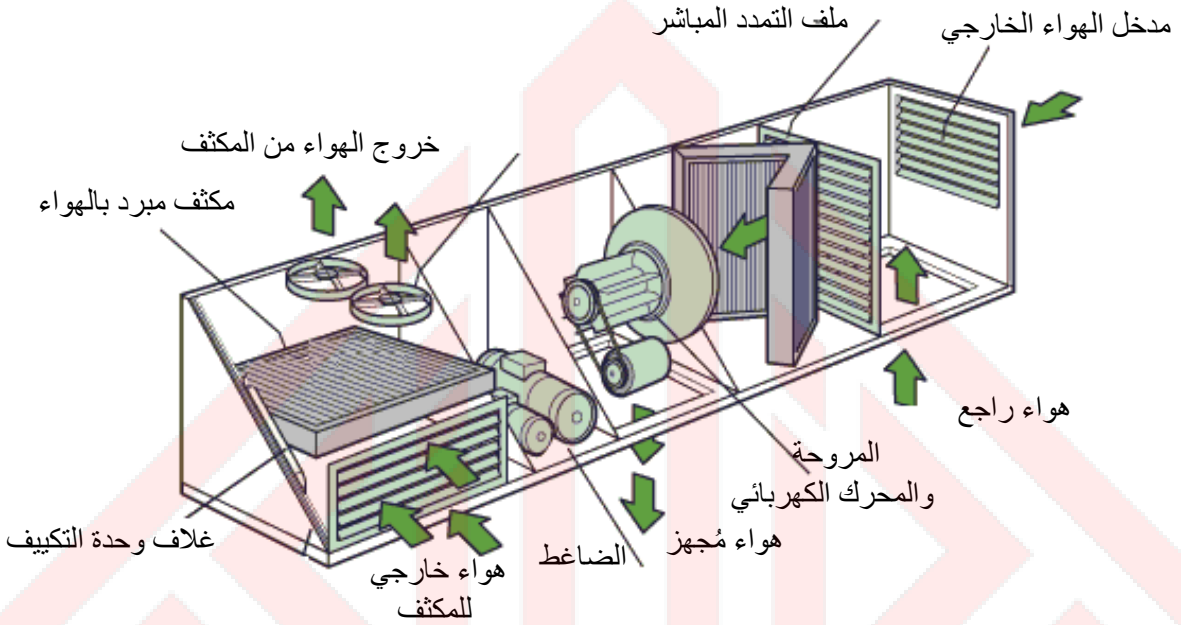
الشكل 3-2/3: وحدة تكييف مجمعة ذات مكثف مبرد بالماء.

3-1/1/2/3 مكيفات الهواء المركزية – ذات مبخر التمدد المباشر

(Direct expansion central air-conditioning)

تحتوي على ملف تمدد مباشر يغلي بداخله مائع التثليج مما يؤدي الى سحب الحرارة من الهواء المار عليه، ويجهز الهواء المكيف من وحدة التكييف مباشرة عبر مجاري الهواء الى جميع الغرف في المنطقة المكيفة. ويرتبط بمجرى الهواء ناشرات هواء تقوم بتوزيع الهواء المكيف في الغرف. يسحب الهواء بعد ازالته الحمل الحراري من فتحات سحب الهواء الى مجرى الهواء الراجع ويعاد تبريد الهواء الراجع بعد خلطه بنسبة معينة من الهواء النقي في ملف التمدد المباشر ويعاد دفعه الى مجرى هواء التجهيز. ويبين الشكل (3-3/3) مكيف هواء مركزيا ذا مكثف مبرد بالهواء مع مبخر من نوع التمدد المباشر. تستعمل عدة انواع من ضواغط

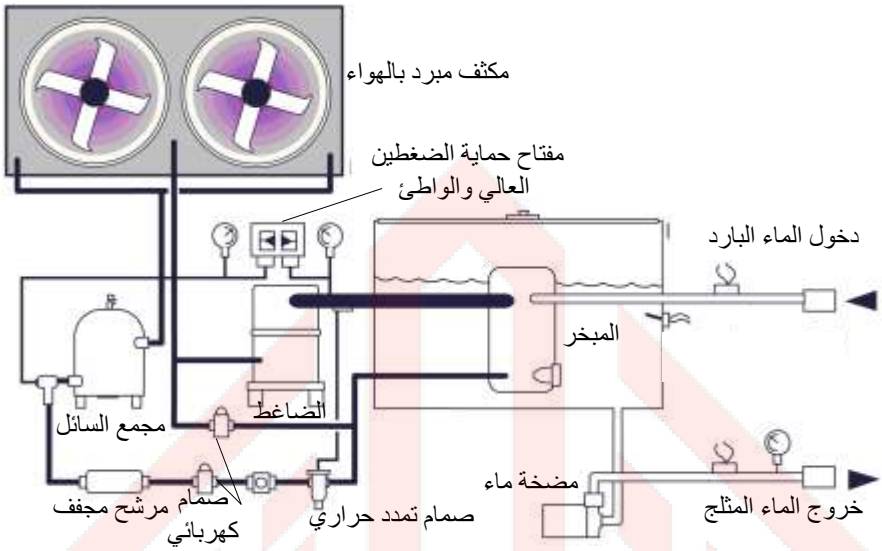
موائع التثليج في هذه الاجهزة مثل الضواغط الترددية وهي اكثرها استعمالا ثم الضواغط الحلزونية والدوارة للسعات الصغيرة بحدود 15 TR (53 kW) حداً أقصى لكل ضاغط.



الشكل 3-3/3: مكيف هواء مركزي مبرد بالهواء ذو مبخر التمدد المباشر.

3-3/2/1/2 مكيفات الهواء المركزية- مثلجات الماء (Chilled water central air conditioning unit)

يستعمل الهواء لتبريد مكثفات مثلجات الماء المجمعة (package water chillers) بسعة تتراوح من 7.5 الى 500 TR (25 الى 1580 kW). ويستعمل مبخر منظومة التثليج هنا لتثليج الماء أو مائع تثليج ثانوي. وتستعمل مضخات لدفع الماء بعد تثليجه عبر منظومة أنابيب الى ملفات التبريد لتبريد هواء التجهيز الى كل منطقة. وتحتوي المنظومة على صمام تمدد حراري وصمام ذي ملف لولبي (solenoid valve) لخط السائل وصمامات غلق الأنابيب كجزء من المنظومة. يرتبط مبخر منظومة التثليج وملفات التبريد في مناولات الهواء بأنابيب الماء المثلج عبر مضخة ماء. ويستعمل صمام لتحسس جريان الماء يربط كهربائيا على التوالي مع ملف بدء الحركة لمحرك الضاغط للسيطرة على عمل الضاغط وكما مبين في الشكل (3-4/3). وفي المنظومات الانضغاطية تستعمل الضواغط المذكورة في العبارة (3-1/1/2/3) للسعات المتوسطة والصغيرة وتستعمل كذلك ضواغط الطرد المركزي للسعات الكبيرة [3،4].



الشكل 3-4/3: مثلج الماء ذو المكثف المبرد بالهواء.

3-2/2/3 مكيفات الهواء المركزية ذات المكثف المبرد بالماء

(Water cooled central Air conditioning units)

في حال كون مكثف المنظومة مبردا بالماء، يوضع الضاغط والمحرك الكهربائي للضاغط فوق المكثف في الكثير من الاحيان ليكونا وحدة التكثيف مع برج تبريد لتبريد الماء الخارج من المكثف. وتقسم هذه المكيفات على وفق استعمال المبخر اما لتبريد الهواء مباشرة في ملف التمدد المباشر أو لتثليج الماء في مبادل حراري يكون هو المبخر.

3-1/2/2/3 مكيفات الهواء المركزية ذات ملف التمدد المباشر

(Direct expansion central air conditioning)

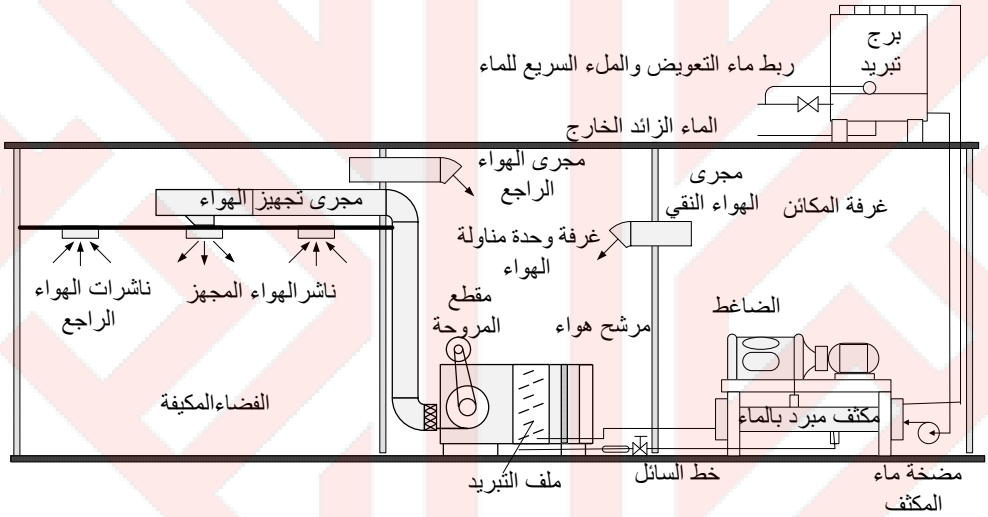
تحتوي على ملف تمدد مباشر يغلي بداخله مائع التثليج مما يؤدي الى سحب الحرارة من الهواء المار عليه، وتشمل المنظومة اعتياديا على المكونات الثلاثة التالية وكما مبين في الشكل (3-5/3):

- غرفة المكائن (plant room): تحتوي غرفة المكائن على وحدة التكثيف (الضاغط والمكثف) وقد يكون الضاغط من النوع نصف المغلق (semi hermetic type) وقد يبرد اضافيا بواسطة مروحة تدفع الهواء الخارجي على جسم الضاغط، أو من النوع المفتوح (open type)، وقد يبرد اضافيا بواسطة الماء، ويدار اما بشكل مباشر من المحرك الكهربائي أو بحزام نقل الحركة.
- غرفة وحدة مناولة الهواء (air handling room) : تحتوي على مناولة الهواء وبداخلها مروحة كبيرة ومرشح هواء وصمام تمدد حراري ومبخر منظومة التثليج الذي يتسلم مائع التثليج من وحدة التكثيف. تكون غرفة مناولة الهواء قريبة من المنطقة المكيفة وبعيدة بقدر الإمكان عن غرفة المكائن. أما عند نصب مناولة الهواء بعيدا عن المنطقة المكيفة تستعمل مجاري هواء لدفع الهواء، إضافة إلى مجاري الهواء الراجع. وتعزل مجاري سحب ودفع الهواء عزلا حراريا عند مرورها بمناطق غير مكيفة.

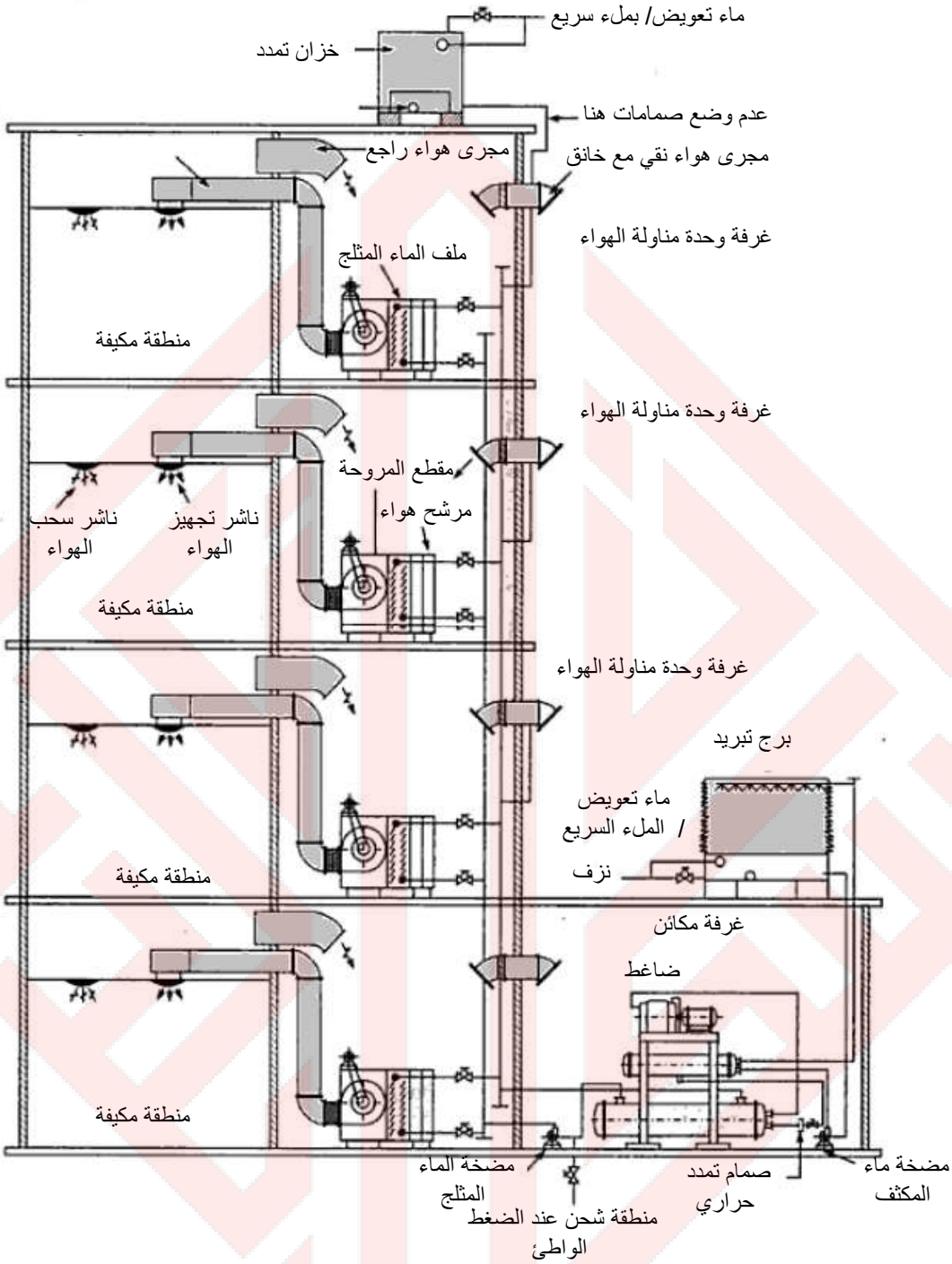
- الفضاء المكيف (conditioned space): وهو الفضاء المشغول مثل الفنادق أو جزء من مكتب أو ما يشابهه. ويمر المجرى الحامل للهواء المكيف الى جميع الغرف في المنطقة المكيفة وترتبط بمجرى الهواء ناشرات هواء تقوم بتوزيع الهواء المكيف في الغرف. ثم يسحب الهواء بعد ازالته الحمل الحراري من فتحات سحب الهواء الى مجرى سحب الهواء ويعاد تبريد الهواء الراجع بعد خلطه بنسبة معينة من الهواء النقي عبر مبخر التمدد المباشر ليعاد دفعه الى مجرى هواء التجهيز. تستعمل هذه المنظومات لأحمال حرارية تتراوح من 5 الى 15 طن تبريد.

3-2/2/2/3 مكيفات الهواء المركزية – مثلجات الماء (Water cooled central air conditioning)

يستعمل الماء مع برج تبريد لتبريد مكثفات مثلجات الماء المجمعة لسعات تثليج تتراوح من 10 الى 3000 طن تبريد (35 الى 10500 كيلوواط). ويستعمل برنامج لمعالجة الماء في أبراج التبريد المفتوحة. ويبين الشكل (3-6/3) منظومة تكييف تعمل بمثلج ماء ذي مكثف مبرد بالماء. تحتوي منظومة التثليج على نفس العناصر المذكورة في العبارة 3-2/1/2/3. وكذلك تشتمل المنظومة على ثلاثة مكونات رئيسة هي غرفة المكائن وغرفة (أو غرف) مناولات الهواء والفضاء المكيف وكما جاء ذكره في العبارة 3-1/2/2/3.



الشكل 3-5/3: وحدة تكييف مركزية ذات مكثف مبرد بالماء مع ملف تمدد مباشر.



الشكل 3-6/3: منظومة تكييف تعمل بمثلج ماء ذي مكثف مبرد بالماء.

مراجع الباب 3

[1] ENERGY STAR, "***Program Requirements for Room Air Conditioner***", 2007.

[2] ARI, " ***Unitary Air- Conditionings Source Heat Pump Equipment***", Standard 210/240, 1994.

[3] ASHRAE, "***2008 ASHRAE Handbook : HVAC Systems****", Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A.*, 2008.

[4] AHRI Standard 550/590, "***Standard for Performance Rating Of Water -Chilling Packages Using The Vapor Compression Cycle***", 2003.

الباب 4

أنواع منظومات التثليج (Types of Refrigeration Units)

4-1 المنظومات الانضغاطية (Vapor compression units)

4-1/1 منظومة التثليج الانضغاطية لضواغط الإزاحة الموجبة

(Positive displacement refrigeration unit)

4-1/1/1 منظومة التثليج الانضغاطية المثالية (Ideal vapor compression cycle)

في دورة تثليج كارنو (Carnot) هنالك صعوبتان هما الانضغاط الرطب والتمدد الادياباتي العكوسي. ولو جرت عملية الانضغاط لبخار جاف مشبع بانتروبي ثابتة (isentropic) فلابد من ضغطه إلى درجة حرارة اعلى من درجة حرارة التكثيف. ويكون شكل عملية الانضغاط مثل ما مبين في الشكل (4-1/1) حيث تجري عملية التكثيف بضغط ثابت بدلا من درجة حرارة ثابتة كما هو الحال مع دورة كارنو. حيث يزال التحميص أولا عند تكثيف بخارمائع التثليج وطرح الحرارة ثم يتكثف بضغط ودرجة حرارة ثابتين داخل غلاف الحالة إلى إن يتحول إلى سائل مشبع. تجرى عملية التمدد بثبوت المحتوى الحراري ثم تجرى عملية امتصاص الحرارة والحصول على التثليج المطلوب في الدورة بتبخرسائل مائع التثليج بدرجة حرارة وضغط ثابتين وتستمر الدورة. ويبين الشكل (4-1/1) دورة التثليج الانضغاطية المثالية او النموذجية ممثلة بالنقاط 1-2-3-4. ان العمليات الاربع التي تؤلفها هي كالآتي:

1-2: انضغاط ادياباتي عكوسي بانتروبي ثابت (isentropic) لبخار جاف مشبع الى ضغط المكثف.

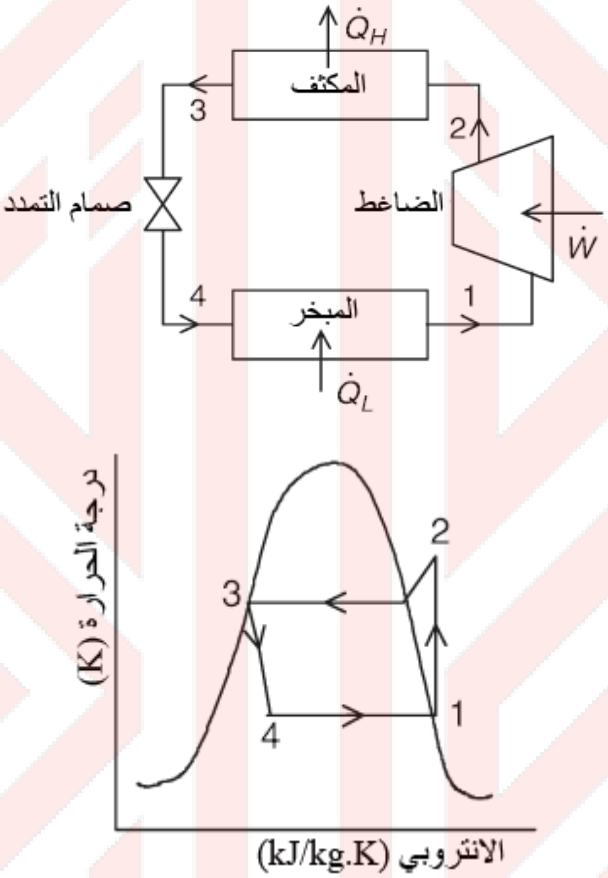
2-3: طرح حرارة بضغط ثابت يشمل ازالة التحميص والتكثيف.

3-4: تمدد ادياباتي غير عكوسي (irreversible) بمحتوى حراري ثابت لسائل مشبع الى ضغط المبخر.

4-1:امتصاص حرارة بدرجة حرارة ثابتة وضغط ثابت هو ضغط المبخر لتبخير السائل الى بخار مشبع.

يفضل استعمال مخطط الضغط والمحتوى الحراري لوجود عمليتين بضغط ثابت هما طرح وامتصاص الحرارة ووجود عملية التمدد بمحتوى حراري ثابت كما مبين في الشكل (4-1/1). ان دورة التثليج الانضغاطية على هذا المخطط أسهل للتحليل ولقراءة خواص مائع التثليج في الحالات المختلفة. ويبين الشكل كذلك العمليات الأربع التي تؤلف الدورة.هنالك جهاز أو أداة تتم فيها كل واحدة من هذه العمليات. حيث ينجز الضاغط (compressor) عملية الانضغاط بأن يضغط بخارا مشبعا ذا ضغط واطئ اي ضغط المبخر (evaporator pressure) إلى ضغط عال اي ضغط المكثف (condenser pressure) ثم تطرح الحرارة في مكثف ويتحول مائع التثليج من بخار محمص إلى بخار مشبع ثم يتكثف إلى سائل مشبع. ولابد من تبريد المكثف بوسيط آخر الذي غالبا ما يكون إما الهواء الخارجي او الماء من مصدر الإسالة أو ماء يعاد تدويره في برج التبريد. ثم يتمدد سائل التثليج المشبع في اداة التمدد التي غالبا ما تكون صمام تمدد(expansion valve)، وذلك لان معظم أدوات التمدد في دورات التثليج الانضغاطية هي صمامات تمدد ولكن تستعمل الأنابيب الشعرية في الدورات الصغيرة جدا مثل الثلاجات المنزلية والمكيفات الجدارية في حين تستعمل الصفيحة المثقوبة (orifice plate) مع دورات التثليج بضاغط نابذ مركزي ذات تدفق المائع الكبير جدا. وينخفض

ضغط المائع في عملية التمدد من ضغط المكثف إلى ضغط المبخر كما ان درجة حرارته تنخفض وذلك لتبخر جزء من السائل في أثناء عملية التمدد ممتصا حرارته الكامنة للتبخر من بقية السائل مسببا بذلك خفض درجة حرارته. ويسمى البخار الناتج في أثناء عملية التمدد بغاز التذرير(flash gas). يدخل بعد ذلك سائل التثليج وغاز التذرير بضغط واطئ إلى المبخر ممتصا حرارته الكامنة للتبخر من المكان المثلج وبذلك يتحقق التثليج المطلوب في الدورة. ويتحول السائل باجمعه في المبخر إلى حالة بخار مشبع حيث يدخل الضاغط وتعاد الدورة مرة أخرى وهكذا[2,1].



الشكل4−1/1: دورة التثليج الانضغاطية النموذجية.

4−1/1/2 معالم أداء دورة التثليج الانضغاطية النموذجية

(Performance parameters of a refrigeration cycle)

يسهل تحليل أداء دورة التثليج الانضغاطية النموذجية وحساب الشغل المصروف وكميات الحرارة ومعامل الاداء ومعدل تدفق مائع التثليج وغيرها على مخطط الضغط− المحتوى الحراري. وذلك بتطبيق معادلة الطاقة للتدفق المستمر على كل واحدة من عمليات الدورة الأربع مع إهمال التغيرات في الطاقة الكامنة والطاقة الحركية عند التطبيق لان التغير فيها يكاد يكون صفراً [3,1]. وبالرجوع إلى الشكل (4−2/1) تتحصل معالم الدورة كما يلي :

ان الشغل المصروف على الدورة(W) بوحدات كيلو جول لكل كيلو غرام من مائع التثليج هو:

$$W = h_2 - h_1 \qquad (4-1/1)$$

وتكون كمية الحرارة المطروحة في المكثف بضغط ثابت (q_c) بوحدات كيلوجول لكل كيلوغرام من مائع التثليج هي:

$$q_c = h_2 - h_3 \qquad (2/1-4)$$

أما في عملية التمدد الاديباتي عبر صمام التمدد فيكون المحتوى الحراري ثابتا أي :

$$h_3 = h_4 \qquad (3/1-4)$$

وتكون كمية الحرارة الممتصة في المبخر وهو حاصل التثليج (refrigeration effect) بضغط ثابت ودرجة حرارة ثابتة (q_r) بوحدات كيلو جول لكل كيلو غرام من مائع التثليج:

$$q_r = h_1 - h_4 \qquad (4/1-4)$$

وبذالك يمكن حساب معامل اداء دورة التثليج النموذجية (coefficient of performance-COP) من :

$$C.O.P. = \frac{q_r}{W} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \qquad (5/1-4)$$

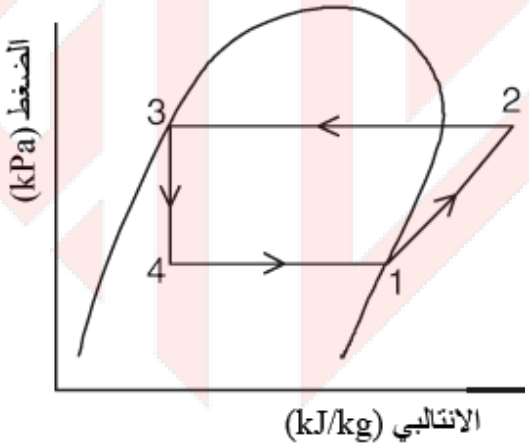
وتتحصل نسبة غاز التذرير (f) (نسبة الجفاف لبخار مائع التثليج) بأخذ اتزان حراري للمائع بعد عملية التمدد الاديباتي حيث يكون المحتوى الحراري لجزء السائل المشبع والمحتوى الحراري لغاز التذريركما يلي:

$$h_4 = h_3 = fh_1 + (1-f)h_{le} \qquad (6/1-4)$$

$$f = \frac{h_3 - h_{le}}{h_1 - h_{le}} \qquad (7/1-4)$$

حيث أن h_{le} هو المحتوى الحراري للسائل المشبع بضغط ودرجة حرارة المبخر. ويمكن الحصول على معدل التدفق الكتلي (m) بوحدات كيلوغرام في الثانية لكل كيلوواط واحد من التثليج:

$$m = \frac{1}{h_1 - h_4} \qquad (8/1-4)$$



الشكل 4-1/2: دورة التثليج الانضغاطية النموذجية.

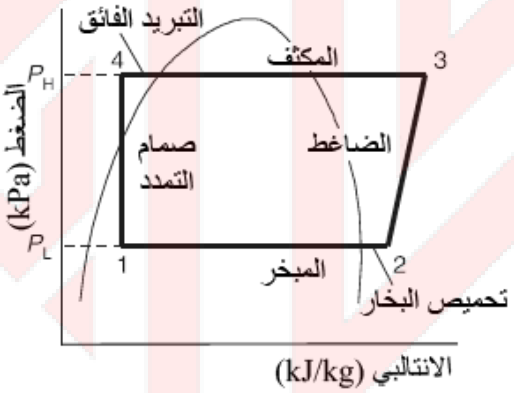
4-1/1/3 تبريد سائل التثليج تبريدا فائقا (مفرطا) وتحميص بخاره

(Liquid sub-cooling & vapor superheating)

لضمان دخول بخار محمص لايحتوي أي قطرات سائلة الى الضاغط ومنع تولد الفقاعات التي تعرقل تدفق السائل عبر صمام التمدد لابد من تبريد سائل التثليج تبريدا فائقا(مفرطا) وتحميص بخاره وبالتالي سيتحقق تحسين أداء الدورة خاصة تلك التي تعمل مع موائع التثليج الهايدروكاربونية المهلجنة. يستعمل لهذا الغرض وفي كثير من دورات التثليج الانضغاطية الصغيرة، مبادل حراري مابين سائل التثليج وبخاره. حيث يقوم البخار المشبع البارد الخارج من المبخر بتبريد السائل المشبع الساخن القادم من المكثف كما مبين في الشكل (4-1/3). ويمكن اجراء اتزان حراري للمبادل الحراري هكذا:

$$h_3 - h_4 = h_1 - h_6 \qquad (9/1\text{-}4)$$

عند مقارنة حالتين لدورة تثليج انضغاطية نموذجية بمبادل حراري مع أخرى بدونه قد يبدو لأول وهلة أن هنالك تحسناً ظاهراً في الأداء. ولكن هذا ليس صحيحا دائما لازدياد الشغل المبذول لوحدة الكتلة. كذلك فان الحجم النوعي للبخار المحمص اكبر من حجم البخار المشبع للحالتين مما يوجب استعمال ضاغط اكبر. يمكن ان تنجز عملية تبريد سائل التثليج تبريدا فائقا في المكثف بزيادة مساحته قليلا او زيادة معدل تدفق الماء أو الهواء الذي يبرد المكثف وفي الأنبوب الواصل بينه وبين المبخر. كما أن تحميص البخار يمكن ان يتحقق في المبخر نفسه مما يزيد حاصل التثليج، وذلك بتنظيم معدل تدفق مائع التثليج بحيث يخرج من المبخر محمصا ببضع درجات وبدون الحاجة إلى مبادل حراري. وعند عدم وجود مبادل حراري فان التبريد الفائق للسائل وتحميص بخاره يزيدان من حاصل التثليج اضافة إلى التعويض عن مهمة المبادل الحراري. كما إن مقدار التبريد الفائق او التحميص لا يرتبطان في هذه الحالة ببعضها كما يمكن إجراء احدهما بدون الآخر وبحسب الظروف المعطاة لعمل الدورة [4,1] .



الشكل 4-1/3: تبريد سائل التثليج تبريدا فائقا وتحميص بخاره.

4-1/1/4 دورة التثليج الانضغاطية الحقيقية (Actual vapor compression cycle)

تبعاً للعمل الحقيقي، فان فعالية دورة التثليج الانضغاطية الحقيقية المبينة في الشكل (4-1/4) تكون اقل مقارنة مع الدورة النموذجية. ومن الاختلافات الرئيسة بين الدورة الحقيقية والنموذجية:

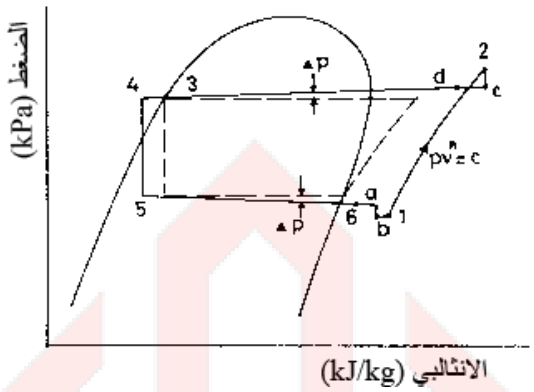
1- إن هنالك هبوطا،لابد منه، في الضغط في المكثف والمبخر في الدورة الحقيقية بسبب احتكاك المائع مع الأنابيب في كل منهما ويساوي(Δp)، كذلك هنالك هبوط في الضغط عبر صمامات السحب والدفع في الضاغط وهما($p_a - p_1$) , ($p_2 - p_c$) على التوالي, في حين يهمل هذا الهبوط في الدورة النموذجية.

2- ان تبريد السائل تبريدا فائقا وتحميص بخاره "$h_3 - h_4 = h_1 - h_6$" لابد منه في الدورة الحقيقية لضمان خروج سائل بدون أي بخار من المكثف الى صمام التمدد، ولضمان عدم وجود سائل مع البخار الخارج من المبخر والداخل إلى الضاغط. ويتحقق تحميص البخار عادة وتبريد السائل تبريدا فائقا بمبادل حراري في الوحدات الصغيرة في حين تنجز هاتان العمليتان بدون مبادل حراري في وحدات التثليج الكبيرة. اضافة الى ذلك هنالك بعض التحميص في الأنبوب الواصل بين المبخر ومدخل الضاغط. وغالبا ما تكون جدران اسطوانة الضاغط اسخن من البخار الداخل اليها مما يسبب تحميصه أكثر عند ملامسته لها.

3- إن عملية الانضغاط في الدورة الحقيقية لا تتم بانتروبي ثابتة وذلك لوجود الاحتكاك وبعض الخسائر الأخرى. وانما تكون عملية بوليتروبية ذات أس قد يفوق او يقل عن نسبة الحرارة النوعية (Pv^n=C), او قد يساويها في حالة الانضغاط ثابت الانتروبي في الدورات النموذجية. ولكن الدورات الحقيقية لا تعمل بذلك الانضغاط المثالي.

ان تحليل الدورة الحقيقية لا يختلف شيئا عن تحليل الدورة النموذجية ويتطلب الامر معرفة الحالات المختلفة والعملية الجارية. وعند معرفة معدلات هبوط الضغط في المكثف والمبخر وعبر صمامات الضاغط وكذلك مقدار التحميص والتبريد الفائق في الأنابيب الموصلة ما بين الضاغط وكل من المبخر والمكثف على التوالي نستطيع تعيين الحالات المختلفة على مخطط الضغط – المحتوي الحراري واستخراج قيم المحتوى الحراري لكل منها ثم حساب جميع معالم الدورة.

تعد منظومة التثليج الانضغاطية ذات الضاغط الترددي (reciprocating compressor) الاكثر انتشارا. وتتراوح سعتها من جزء من طن تثليج الى 100 طن تثليج. في حين يقتصر انتاج منظومات التثليج الانضغاطية ذات الضاغط الدوار على قدرات اقل من طن تثليج واحد ولكن هناك استعمالات ذات ضغط واطئ مثل المرحلة الأولى في المنظومة ذات مرحلتي ضغط فيها ضواغط دوارة بقدرة أكثر من 100 طن تثليج. تستطيع الضواغط الدوارة ضخ أحجام كبيرة نسبيا من بخار مائع التثليج مقارنة مع الضواغط الترددية. ولكن ضخها اقل بكثير من ضخ ضواغط الطرد المركزية لذا يمكن استعمال موائع التثليج ذات الحجم النوعي الكبير لحالة البخار مع الضواغط الدوارة[7]. وللحصول على تفاصيل اكثر راجع الفصل (1) في مجلد الاسس(fundamentals) [3] لجمعية آشري (ASHRAE) لعام 1997 والفصل (41) في مجلد التثليج (refrigeration) لجمعية آشري لعام 1998 [5].



الشكل 4–4/1: دورة التثليج الانضغاطية الحقيقية.

بموجب المواصفة 1998– ARI–550/690 [11] فان سعة منظومات التثليج الانضغاطية تقدر على اساس:

- درجة حرارة الماء المثلج الخارج من المبخر: 6-7°C وبمعدل جريان 0.043 l/s.kW ويشترط $\Delta T=5.5^{o}C$
- درجة حرارة ماء تبريد المكثف: 29.4 °C وبمعدل جريان 0.053 l/s.kW ويشترط $\Delta T=5.5^{o}C$
- معامل التوسيخ (fouling factor): 0.044 $m^2.^{o}C/kW$

إن المواصفة ASHRAE/IESNA-90.1-1999 [12] أوصت بان تكون الفعالية الدنيا لمنظومات التثليج الانضغاطية عند مختلف السعات والظروف المذكورة آنفاً كما مبين في الجدول (4–1/1).

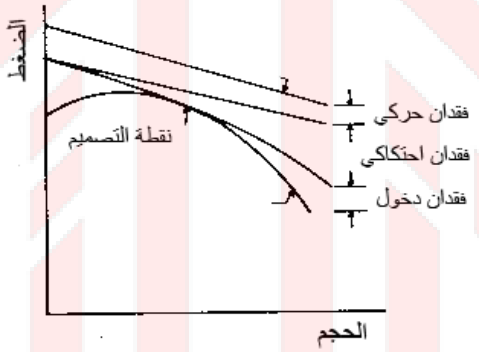
الجدول 4–1/1: الفعالية الدنيا لمختلف منظومات التثليج الانضغاطية.

الفعالية الدنيا		
منظومات التثليج	مكثفات مبردة بالهواء	مكثفات مبردة بالماء
مثلجات ذات سعة اقل من 150 طن تثليج	3.1	3.8
مثلجات ذات سعة بين 150–300 طن تثليج	3.1	4.2
مثلجات ذات سعة اكبر من 300 طن تثليج	3.1	5.8

4–2/1 منظومة التثليج الانضغاطية لضواغط الطرد المركزي (Centrifugal compressor system)

يقوم الدولاب الدوار للضاغط الطارد المركزي برفع ضغط البخار الجاري عبر قنواته بفعل قوة الطرد المركزي الناتجة من سرعته الزاوية. وتتراوح قدرات هذه المنظومات من 200 إلى 10000 كيلو واط تثليج. وتدور هذه الضواغط بسرع كبيرة جدا بواسطة توربين بخاري أو محرك كهربائي. وتستعمل أحيانا مجموعة تروس ما بين المحرك والضاغط لزيادة سرعة دولاب الضاغط. وتكون معظم وحدات تثليج الماء لأغراض تكييف الهواء ذات مكثف يبرد بالماء وبعضها يبرد بالهواء، كما انها تعمل غالبا بضغط دون الضغط الجوي كما في حالة مائعي التثليج R113 و R11، وضغط مكثف اعلى من الضغط الجوي بقليل. لذا تستعمل مع مثل هذه الوحدات وحدة طرد لاخراج الهواء الذي قد يدخل المنظومة. اما البعض الآخر فيعمل بضغط مبخر اعلى من الضغط الجوي بقليل كما في حالة مائع التثليج R22، وضغط مكثف اعلى من الضغط الجوي ولا تستعمل وحدة طرد لاخراج الهواء. ان شكل منحني الاداء للضاغط الطارد المركزي بدون اية خسائر يكون

خطا مستقيما على احداثيات الضغط – الحجم النوعي كما في الشكل (4–5/1). وتأتي الخسائر من ثلاثة مصادر هي: الحركة الدورانية لجزيئات الغاز وتسربه من أماكن الضغط العالي الى اماكن الضغط الواطى داخل بيت الدولاب، والثاني خسائر الاحتكاك، واخيرا الخسائر الناجمة عن تغير اتجاه الغاز الداخل الى عين الدولاب بزاوية 90° عند اندفاعه في بيت الدولاب. ويمكن تقليل خسائر الدخول بإعطاء الغاز حركة دوامية قبل دخوله عين الدولاب. وللحصول على تفاصيل اكثر راجع الفصل (34) في مجلد المنظومات (systems) لجمعية آشري لعام2000 [7].

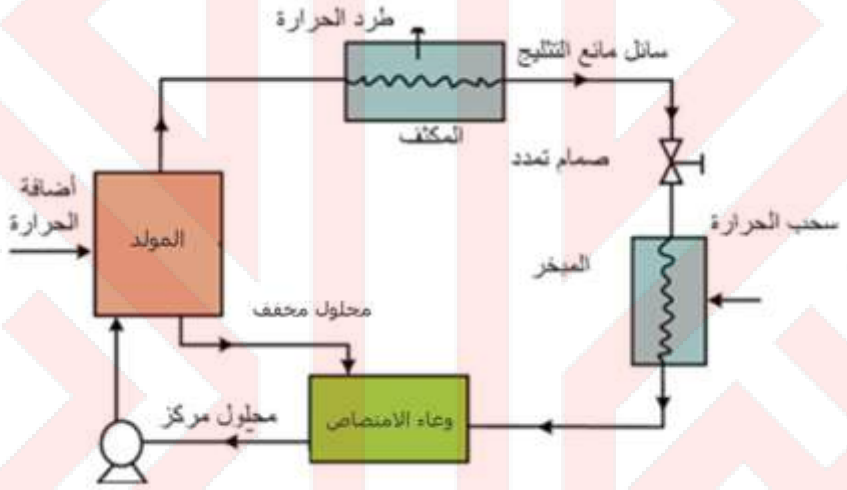


الشكل 4–5/1: العوامل المؤثرة على اداء الضاغط الطارد المركزي.

4–2 المنظومات الامتصاصية (Absorption systems)

عند إدخال كمية من سائل التثليج في وعاء مفرغ مسبقا (مبخر) محفوظ بدرجة حرارة ثابتة، يتبخر السائل ويمتص في هذه العملية حرارة تبخره الكامنة من المحيط عبر جدران المبخر مسببا تثليجه. ولكن سرعان ما يبدأ ضغط المبخر بالارتفاع مع استمرار تبخر السائل إلى أن يصل إلى ضغط التشبع المناظر لدرجة حرارة المبخر ويتوقف بعد ذلك ولا تستمر عملية التثليج. ومن اجل أن تستمر العملية لابد من إزالة بخار المائع بربط المبخر بوعاء آخر يسمى وعاء الامتصاص (absorber) يحتوي على مادة لها قابلية امتصاص بخار مائع التثليج. فإذا كان مائع التثليج الماء فان ملحا مثل بروميد الليثيوم (lithium bromide) يشكل المادة الماصة (absorbent) التي لها قابلية على امتصاص بخار الماء. وإذا كان مائع التثليج الامونيا فان الماء له قابلية شديدة على امتصاص بخار الامونيا. وللحصول على دورة مغلقة لكل من مائع التثليج والمادة الماصة لابد من ان يتحرر ماء التثليج الممتص بضغط ملائم ومن ثم تحويله إلى سائل في المكثف لاحقا. وتنجز هذه العملية في المولد (generator) حيث تسلط الحرارة على محلول المادة الماصة ومائع التثليج ويتحرر مائع التثليج من المحلول بخارا. عند امتصاص المادة الماصة بخار مائع التثليج في وعاء الامتصاص فان نسبة مائع التثليج في المحلول تزداد ويسمى المحلول محلولا مركزا لأنه غني بمائع التثليج. وتصدر نتيجة عملية الامتصاص كمية من الحرارة تسمى حرارة الامتصاص (heat of solution) مسببة ارتفاع درجة حرارة المحلول المركز (strong solution) في وعاء الامتصاص. لذا يقوم ملف مبرد بالماء بإزالة هذه الحرارة بأن يمر ماء تبريد المكثف على وعاء الامتصاص مزيلا حرارته أولا ثم يذهب إلى تبريد المكثف. تقوم مضخة المحلول بضخ المحلول المركز من وعاء الامتصاص إلى المولد حيث ترفع ضغط المحلول إلى ضغط أعلى هو ضغط المولد والمكثف، محققة بذلك فرق الضغط المطلوب بين جانبي الضغط العالي

والواطئ. إن إضافة حرارة في المولد تزيد درجة حرارة المحلول المركز حيث يتبخر معظم مائع التثليج ويترك المولد بضغط مرتفع ودرجة حرارة مرتفعة إلى المكثف تاركا وراءه محلولا مخففا (dilute solution) في المولد. ويعود المحلول المخفف، عبر صمام أو تضييق مسببا هبوط ضغطه، إلى وعاء الامتصاص لامتصاص بخار مائع التثليج من جديد[8,1]. وهكذا تستمر الدورة ما بين وعاء الامتصاص والمولد في سحب بخار ماء التثليج من المبخر وضخه إلى المكثف بضغط اعلى. يتكثف البخار في المكثف بطرحه الحرارة الكافية إلى ماء تبريد المكثف ثم يتدفق سائل التثليج عبر أداة تمدد إلى المبخر حيث يتبخر فيه ممتصا الحرارة من المادة المثلجة التي هي الماء المثلج كما مبين في الشكل (4-1/2). يتضح مما تقدم أن أهم ميزة لدورة التثليج الامتصاصية هي عدم الحاجة الا إلى القليل جدا من الشغل الميكانيكي لتدوير المضخة. أما الطاقة الحرارية في المولد فيمكن أن تأتي من بخار ماء عادم قادم من أي عملية صناعية مثلا أو من ماء ساخن من مجمع شمسي. وللحصول على تفاصيل اكثر راجع الفصل (41) في مجلد التثليج (refrigeration) لجمعية آشري لعام1998 [5].



الشكل 4-1/2: منظومة التثليج الامتصاصية الأساسية.

4-1/2 منظومة التثليج الامتصاصية ذات بروميد الليثيوم-الماء (Lithium bromide-water system)

تنطبق مبادئ عمل دورة التثليج الامتصاصية الأساسية على دورة بروميد الليثيوم-الماء تماما. ومائع التثليج في هذه الدورة هو الماء والمادة الماصة ملح بروميد الليثيوم. ولكون الماء مائع التثليج تنحصر استعمالات هذه الدورة على بلوغ درجة حرارة في المبخر أعلى من الصفر المئوي لتستعمل في الغالب في تثليج الماء لأغراض تكييف الهواء. وتصنع مثل الأجهزة التي تعمل بهذه المنظومة بقدرات من 100 طن تثليج تقريبا إلى أكثر من 1000 طن تثليج. وتعمل غالبيتها على البخار مصدرا حراريا ولكن هنالك البعض منها يعمل بمسخنات كهربائية او بحرق الغاز الطبيعي والزيوت الخفيفة. يتحرر بخار الماء من المحلول في المولد بتسخينه حيث يجري البخار إلى المكثف المبرد بالماء ثم يتكثف البخار إلى سائل. وتعمل أداة التمدد التي غالبا ما تكون على شكل نافثات رش او صفيحة مثقوبة على خفض الضغط. وفي المبخر يتبخر الماء(مائع التثليج) ممتصا الحرارة من ماء التثليج الذي يستعمل في دورة ثانية لتكييف الهواء. ويسري بخار الماء إلى وعاء الامتصاص حيث يمتصه محلول بروميد الليثيوم والماء فيزداد تركيز مائع التثليج في

المحلول الذي يضخ إلى المولد حيث يسخن. وفي المولد يتبخر معظم الماء ذاهبا إلى المكثف تاركا وراءه محلولاُ مخففًا يفتقر لمائع التثليج. تصنع دورات التثليج التي تعمل بالماء مائعا للتثليج وبروميد الليثيوم مادة ماصة على شكلين، الأول أن تصنع جميع أجزاء الدورة في اسطوانة واحدة كبيرة نصفها العلوي يحتوي المولد والمكثف ونصفها السفلي يحتوي على المبخر ووعاء الامتصاص. وتسمى بمثل هذا الترتيب منظومة الاسطوانة الواحدة (one shell system). والثاني أن يوضع المولد والمكثف(جانب الضغط العالي) في اسطوانة وان يوضع المبخر ووعاء الامتصاص (جانب الضغط الواطئ) في اسطوانة أخرى حيث تسمى بمثل هذا الترتيب منظومة الاسطوانتين (two shell system) [9,8].

ان تحليل منظومة الليثيوم– الماء الامتصاصية وحساب كميات الحرارة المضافة في المولد والمبخر والمطروحة من المكثف ووعاء الامتصاص وأخيرا الحصول على معامل أداء الدورة، يتطلب حساب المحتوى الحراري لمائع التثليج (الماء) وكذلك لمحلول الملح والماء بتركيزيه في كل من وعاء الامتصاص والمولد. وإذا توافرت درجات الحرارة في جميع أجزاء الدورة سيسهل تحليلها. ويستخرج تركيز المحلول من معرفة درجة حرارة المحلول والضغط من مخطط الاتزان للمحلول. ثم يستخرج المحتوى الحراري للمحلول من معرفة نسبة تركيز بروميد الليثيوم ودرجة حرارته. أما بالنسبة للماء فتستخرج قيمة المحتوى الحراري له من جدول حالة السائل والبخار المشبع ومن جداول البخار المحمص إن كان بخارا محمصا أو من معادلة تجريبية أو بإضافة المحتوى الحراري للتحميص إلى المحتوى الحراري للبخار المشبع.

تقسم مثلجات الماء الامتصاصية التي تعمل ببروميد الليثيوم– الماء الى:

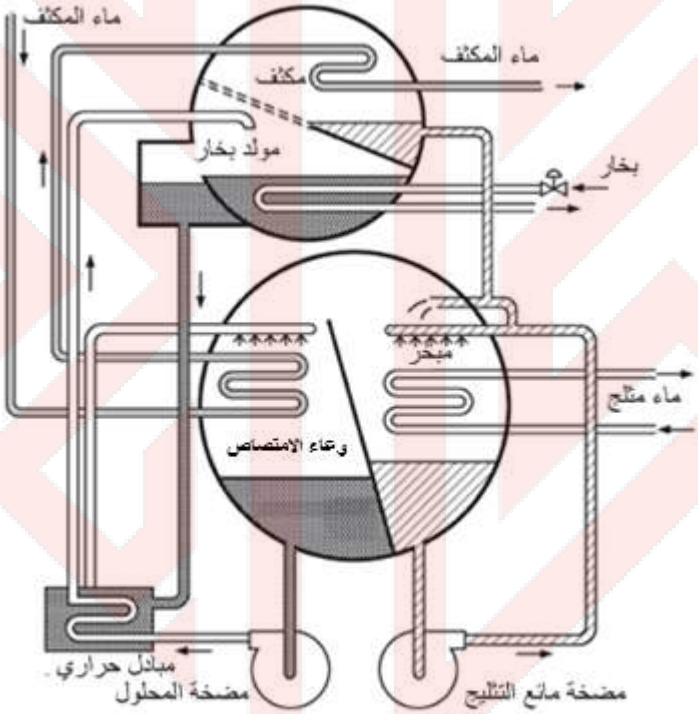
(أ) مثلجات الماء أحادية التأثير تعمل ببروميد الليثيوم (single effect lithium bromide chillers): يبين الشكل (4–2/2) مخططا لمثلج ماء أحادي التأثير يعمل ببروميد الليثيوم، في حين أن الجدول (4–1/2) يبين مواصفات مثلج الماء. يغلي المحلول المركز خارج أنابيب المولد. ويمر بخار مائع التثليج وهو الماء من المولد الى المكثف. ويكون المكثف من نوع الأسطوانة والأنابيب ومبرداً بالماء. ويكون ضغط البخار بحدود 6 كيلوباسكال مع استعمال صفيحة مثقوبة (orifice) او مصيدة سائل اسفل المكثف ليتيسر تمدد مائع التثليج في المبخرالذي هو عبارة عن مبادل حراري من نوع الأسطوانة والأنابيب. يتحقق تثليج الماء الوارد من منظومة الماء المثلج عن طريق امراره خلال انابيب المبخر بأن يرش مائع التثليج بواسطة مضخة على هذه الأنابيب.

(ب) مثلج ماء مزدوج التأثير(double effect chiller): يبين الشكل(4–3/2) مثلج ماء امتصاصي مزدوج التأثير مؤشرا عليه الضغوط ودرجات الحرارة العاملة. يحتوي المثلج على مولدين لبخار مائع التثليج يعملان عند ضغوط ودرجات حرارة مختلفة، اضافة الى ثلاثة من المبادلات الحرارية. تختلف طبيعة جريان المحلول باختلاف مثلج الماء، إذ يمكن ان يكون الجريان:

- جرياناً على التوالي: يمر المحلول بعد وعاء الامتصاص عبر المضخة ومن ثم بالتتابع الى المبادل الحراري عند درجات الحرارة الدنيا، وبعده الى مولد المرحلة الأولى ومن ثم الى المبادل الحراري عند

درجات الحرارة العليا مرة اخرى فمولد المرحلة الثانية والمبادل الحراري عند درجة الحرارة الدنيا وأخيرا الى وعاء الامتصاص، أو

- جرياناً على التوازي: يمر المحلول بعد تركه وعاء الامتصاص الى مبادل حراري مترابط لدرجتي الحرارة العليا والدنيا، ومن ثم ينقسم بين مولدي المرحلتين الأولى والثانية، وبعدها الى المبادل الحراري المترابط وبعد ذلك يتوحد المجرى ليعود المحلول مرة أخرى الى مولد البخار، أو
- جرياناً متوازياً معكوساً (reverse parallel flow): يمر المحلول بعد وعاء الامتصاص الى المضخة ومنه الى المبادل الحراري عند درجات الحرارة الدنيا، ومنه الى مولد المرحلة الثانية. ثم ينقسم الى قسمين أحدهما الى مولد بخار درجات الحرارة الدنيا ومن ثم الى وعاء الامتصاص. ويضخ القسم الثاني بالتتابع الى المبادل الحراري عند درجات الحرارة العليا ومن ثم الى مولد المرحلة الأولى ويعود الى المبادل الحراري عند درجات الحرارة العليا. ثم يتحد جزءا المحلول بعد مولد المرحلة الثانية ليتجه بعدها الى المبادل الحراري عند درجات الحرارة الدنيا ثم الى وعاء الامتصاص. ويبين الشكل (4–4/2) مثلج ماء ذا جريان متواز ومتعاكس مع تسخين مباشر بالنار، في حين ان الجدول (4–3/2) يبين المواصفات النمطية لهذا النوع من مثلجات الماء الامتصاصية [8].



الشكل 4–2/2: مثلج ماء امتصاصي احادي التأثير ذو تسخين مباشر يعمل ببروميد الليثوم– الماء.

بموجب المواصفة ARI 560–1998 [13] تختار سعات مثلجات الماء المبردة بالهواء ثنائية التأثير والتي توافق حمل التثليج المطلوب لتمتلك الخصائص التالية :

– درجة حرارة الماء المثلج: 6.7 ^{o}C وبمعدل جريان مقداره 0.043 *l*/s.kW

– درجة حرارة ماء تبريد المكثف: 29.4 ^{o}C وبمعدل جريان مقداره 0.079 *l*/s.kW

– معامل التوسيخ (fouling factor): $0.000044\ m^2.^oC/W$

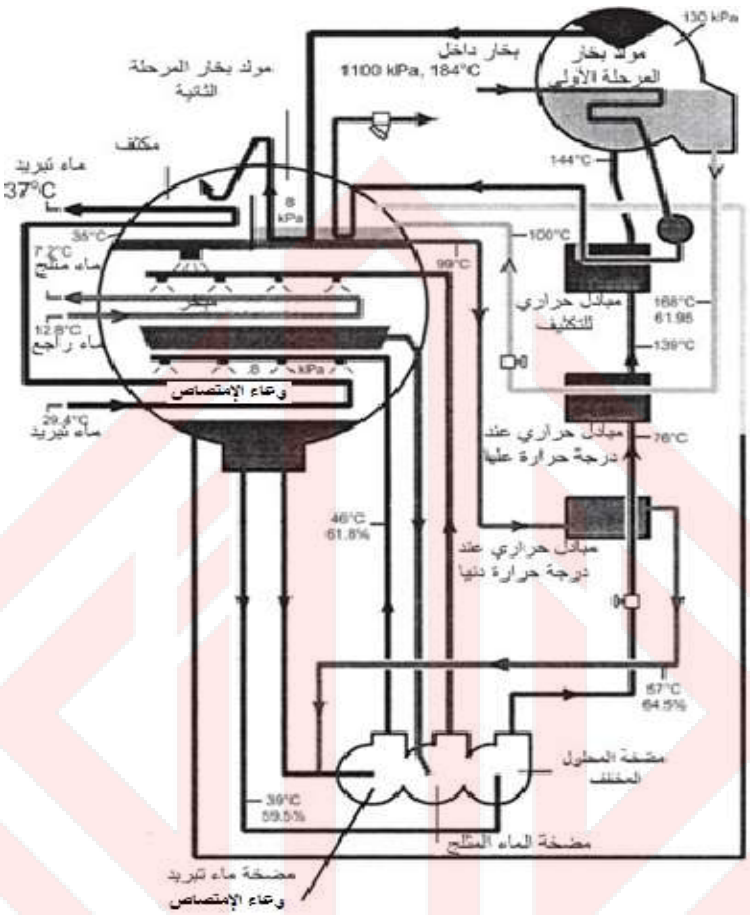
كما إن المواصفة ASHRAE/IESNA-90.1-1999 [11] أوصت بان تكون الفعالية الدنيا للمثلجات الامتصاصية عند جميع السعات بالخصائص المذكورة آنفاً كما مبين في الجدول (4–2/2):

الجدول 4–1/2: مواصفات مثلجات الماء الامتصاصية احادية التأثير التي تعمل ببروميد الليثوم–الماء[8].

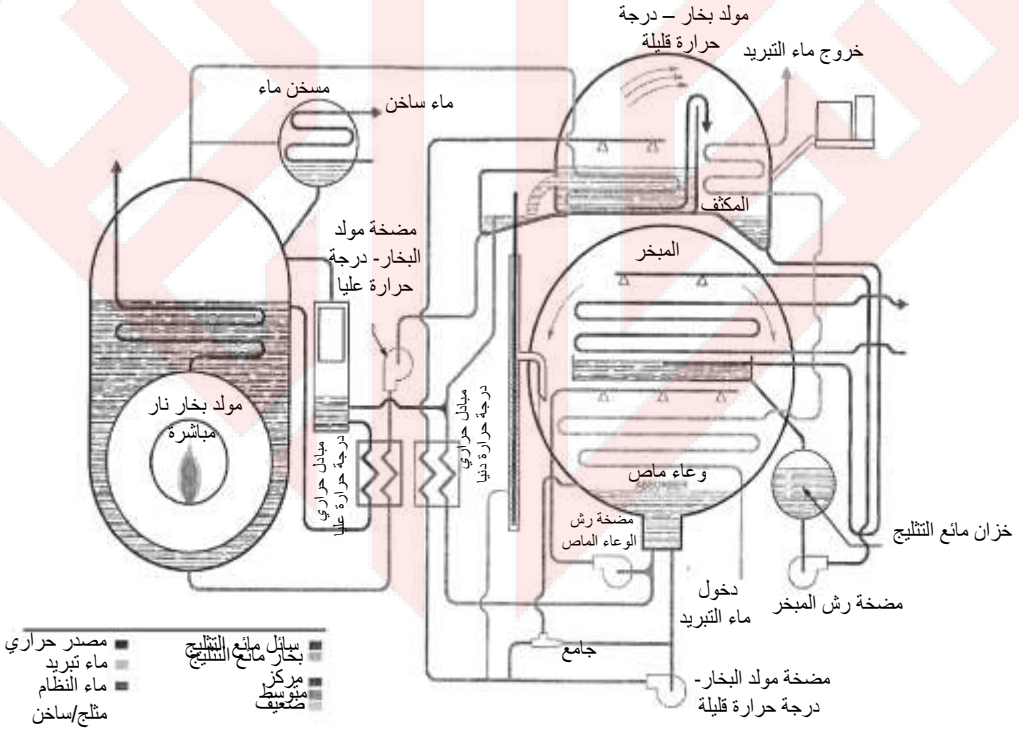
ضغط البخار الداخل	60 الى 80 kPa (ضغط مقاس)
استهلاك البخار لكل كيلوواط تثليج	1.48 الى 1.51 kW
درجة حرارة المائع الساخن	115 الى 132 ^oC ، ولاتقل عن 88 ^oC للمنظومات الصغيرة التي تستعمل المائع المستنفذ لأغراض التسخين.
الحرارة المضافة لكل كيلوواط تثليج	1.51 الى 1.54 kW للمنظومات الصغيرة
استهلاك الكهرباء لكل كيلوواط تثليج	3 الى 11 W
السعة الاسمية	180 الى 5800 kW للمنظومات الكبيرة

الجدول 4–2/2: الفعالية الدنيا لمختلف لمنظومات التثليج الامتصاصية.

منظومات التثليج	الفعالية الدنيا
مثلجات مكثفة بالهواء أحادية التأثير	0.48
مثلجات مكثفة بالماء أحادية التأثير	0.60
مثلجات مكثفة بالهواء مزدوجة التأثير	0.95



الشكل 4–3/2: مثلج ماء امتصاصي مزدوج التأثير– ذو جريان على التوالي [8].



الشكل 4–4/2: مثلج ماء امتصاصي مزدوج التأثير يعمل ببروميد الليثوم–الماء مع جريان متعاكس.

الجدول 4-3/2: مواصفات مثلجات الماء الامتصاصية مزدوجة التأثير، ذات التسخين المباشر بالنار وتعمل ببروميد الليثوم- الماء [8].

معدل استهلاك الوقود لكل كيلوواط تثليج	1 الى 1.1 kW
معامل الأداء (عند قيمة حرارية عليا للوقود)	0.92 الى 1
استهلاك الطاقة الكهربائية لكل كيلوواط تثليج	3 الى 11 W
السعة الاسمية	350 الى 5300 kW

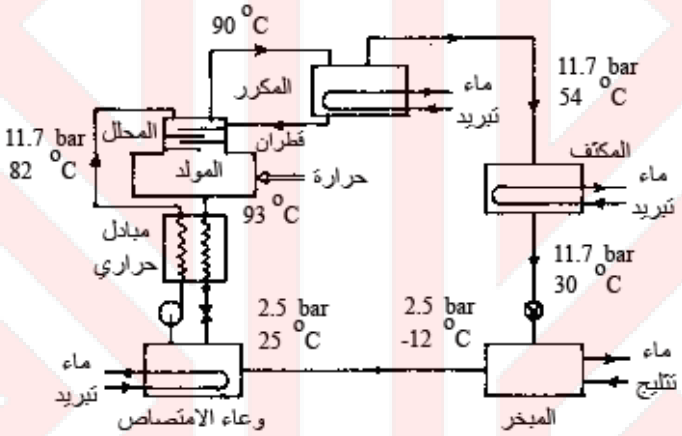
4-2/2 منظومة التثليج الامتصاصية ذات الامونيا- الماء (Aqua ammonia system)

إن منظومة الامونيا- الماء تتمثل بنفس الأجزاء الأربعة الرئيسة للمنظومة الامتصاصية الأساسية. إلا إن هنالك بعض الإضافات الضرورية الخاصة بهذه المنظومة والتي تجعل عملها أكثر فعالية. إن الامونيا هي مائع التثليج في هذه الدورة والماء هو المادة الماصة. ويمتص بخار الامونيا في وعاء الامتصاص الذي يضخ محلولا مركزا غنيا بالامونيا إلى المولد حيث تجهز الحرارة ويسخن المحلول مؤديا إلى تبخر الامونيا مع بعض الماء. وبسبب تبخر بعض الماء مع الامونيا يضاف جزءان متممان للمنظومة هما المحلل (analyzer) والمكرر(rectifier) اللذان يعملان على تجفيف بخار الامونيا من بخار الماء وذلك بتكثيف الأخير. ويبين الشكل (4-2/5) منظومة أمونيا- ماء امتصاصية عملية. تعمل منظومة الأمونيا- الماء بضغوط أعلى من الضغط الجوي تصل الى حدود 10 الى 12 كيلوباسكال ضغط تكثيف وبحدود 1.2 إلى 2.5 كيلوباسكال ضغط مبخر. ولان الامونيا هي مائع التثليج فان درجات الحرارة المتحققة في المبخر يمكن ان تكون تحت الصفر المئوي. وتستعمل المنظومة غالب الأحيان في الإستعمالات والمواقع الصناعية الكبيرة وحيث يكون البخار متوفرا أساسا ليستغل جزء منه في تسخين المولد. ويندر استعمالها لتثليج الماء لإغراض تكييف الهواء[9,8].

يعمل وعاء الامتصاص على امتصاص بخار الامونيا وإذابته في محلول الماء والامونيا منتجا محلولا مركزا غنيا بمائع التثليج. وينتج من عملية الذوبان بعض الحرارة التي تزال بتبريد وعاء الامتصاص بالماء. ويمكن ان يكون وعاء الامتصاص في الأجهزة الصناعية اسطوانة واحدة أو عددا من الاسطوانات المرتبة على بعضها واحدة فوق الأخرى. تجهز الطاقة الحرارية إلى المولد من مصدر خارجي، إما على شكل بخار ماء يتكثف داخل ملف مغمور بالمحلول أو على شكل مشعل يعمل بالغاز الطبيعي اعتياديا. وتتبخر الامونيا مع قليل من الماء في المحلول المركز بفعل التسخين. ويقوم المحلل والمكرر بتنقية بخار مائع التثليج من بخار الماء. إن المحلل مبادل حراري مفتوح أو مباشر مؤلف من مجموعة من المسطحات تقع فوق المولد وقد يكون المحلل جزءا من المولد. يأتي المحلول المركز من وعاء الامتصاص والماء من المكرر إلى فتحة المحلل ثم يجريان إلى أسفل على المسطحات فتتوافر بذلك مساحة سطحية كبيرة لالتقاء البخار المتصاعد من المولد مع المحلول النازل وبذالك يتبرد البخار المتصاعد ويتكثف الكثير من بخار الماء بحيث يكون معظم البخار الخارج من المحلل بهيئة بخار الامونيا يصحبه قليل من بخار الماء. إضافة إلى ذلك فان

المحلول النازل إلى المولد يسخن بفعل البخار الصاعد مقللا بذلك الحرارة المطلوبة في المولد. أما المكرر فهو مبادل حراري مغلق وظيفته تبريد البخار الخارج من المحلل أكثر بحيث يتبرد بخار الامونيا ويتكثف باقي بخار الماء. ويعود بخار الماء المتكثف ومعه قليل من الامونيا الذائبة إلى أعلى المحلل بواسطة أنبوب. يسمى المحلول الراجع من المكرر إلى المحلل بالقطران. ويكون المكرر اعتياديا على شكل اسطوانة وأنابيب أو اسطوانة وملف أو انبوبين متحدي المركز على غرار المكثفات تماما. وتكفي اعتياديا درجات حرارة مابين 37 الى 49 درجة مئوية في المكرر لتجفيف بخار الامونيا. اما اذا كانت درجات الحرارة أوطأ من ذلك فقد تؤدي الى تكثف الكثير من الامونيا نفسها وعودتها ذائبة مع القطران الى المحلل والمولد.

لايختلف عمل المكثف وأداة التمدد والمبخر في منظومة الامونيا– الماء عن المنظومات الأخرى. ويقوم المبادل الحراري بين المحلول المركز والمحلول المخفف في تقليل الحرارة المطلوبة للتسخين في المولد ويقلل التبريد المطلوب في وعاء الامتصاص وهي عملية فعالة واقتصادية.



الشكل 4–5/2: منظومة التثليج الامتصاصية ذات الامونيا– الماء.

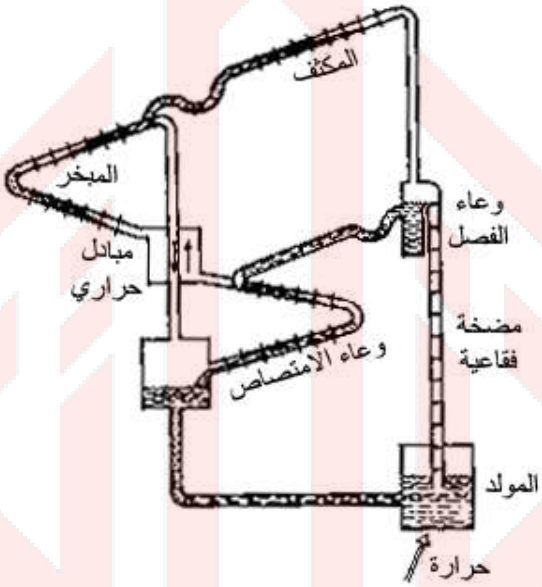
4–3/2 الثلاجة الامتصاصية الكترولوكس ذات الامونيا– الماء– الهيدروجين

(Absorption Refrigerator Electrolux)

يقتصر إنتاج منظومة الكترولوكس (Electrolux refrigerator) على الثلاجات المنزلية التي انتجتها شركة الكترولوكس السويدية. وهي عبارة عن دورة تثليج امتصاصية تعمل بالامونيا مائعا للتثليج والماء مادة ماصة كما تحتوي على مائع ثالث هو غاز الهيدروجين الذي يقوم بموازنة الضغط بين جانبي الضغط العالي والضغط الواطئ. ولا تحتوي هذه الثلاجة على مضخة ميكانيكية لتدوير المحلول.

تأتي الحرارة إلى المولد ويسخن المحلول جاعلا بخار الامونيا يتصاعد إلى الأعلى وبدلا من أن ينفصل البخار عن المحلول في المولد فقد صمم المولد بحيث تجري عملية تدوير المحلول بينه وبين وعاء الامتصاص بواسطة مضخة فقاعية تلقائية تعوض عن المضخة الميكانيكية. حيث يمتد الانبوب الناقل لبخار الامونيا من المولد تحت مستوى المحلول كما مبين في الشكل (4–6/2). فعندما تتكون فقاعات بخار الامونيا وتصعد إلى الأعلى في هذا الأنبوب تنقل أمامها دفعات صغيرة من المحلول المخفف إلى وعاء الامتصاص مكونة بذلك مضخة فقاعية. ثم يتصاعد بخار الامونيا إلى المكثف حيث يتكثف بطرح الحرارة

إلى هواء الغرفة ويجري سائل الامونيا بفعل الجاذبية الى المبخر. ويتبخر السائل هناك ممتصا الحرارة من المكان المثلج. ويجري المحلول المخفف بفعل الجاذبية من وعاء الفصل إلى وعاء الامتصاص حيث يقوم بامتصاص بخار الامونيا من المبخر مكونا بذلك محلولا مركزا الذي يجري إلى المولد ثانية حيث تبدأ الدورة من جديد.



الشكل 4-6/2: الثلاجة الامتصاصية الكترولوكس.

يوجد في كل من المبخر ووعاء الامتصاص غاز الهيدروجين، ومن المعلوم أن بامكان سائل الامونيا التبخر بوجود الهواء اوغازات أخرى. وكلما كان الغاز اخف كان تبخر الامونيا أسرع. وبما أن الهيدروجين اخف الغازات ولا يسبب الصدأ وغير ذائب في الماء فانه ملائم جدا للاستعمال في هذه الدورة. ويسلط الهيدروجين ضغطا جزئيا بحيث يكون مجموعه مع الضغط الجزئي لبخار الامونيا في المبخر مساويا إلى ضغط الامونيا والماء في المكثف والمولد. ولذلك يتبخر سائل الامونيا عند وصوله المبخر بدرجة حرارة واطئة (لانخفاض ضغط الامونيا الجزئي في المبخر) مؤديا إلى التثليج. أما في المكثف حيث لايوجد هيدروجين فان عملية التكثيف تجري بدرجة حرارة عالية نسبيا تمكن من طرح الحرارة إلى هواء الغرفة وذلك لارتفاع ضغط الامونيا. يدور الهيدروجين مع بخار الامونيا في المبخر إلى اعلى ثم يمران على مبادل حراري حيث يسخنان قليلا بفعل غاز الهيدروجين الصاعد من وعاء الامتصاص. ثم يصل الاثنان إلى وعاء الامتصاص حيث يتلامس بخار الامونيا مع المحلول المخفف الوارد من وعاء الفصل ويذوب فيه مكونا محلولا مركزا يجري بعدها إلى المولد بفعل الجاذبية. يوجد محبسان نونيان على شكل الحرف (U) في الدورة، الأول بين المكثف والمبخر والثاني بين وعاء الفصل ووعاء الامتصاص لغرض فصل جانب الضغط العالي عن جانب الضغط الواطئ[1].

4-3 منظومات التثليج الشمسية (Solar refrigeration system)

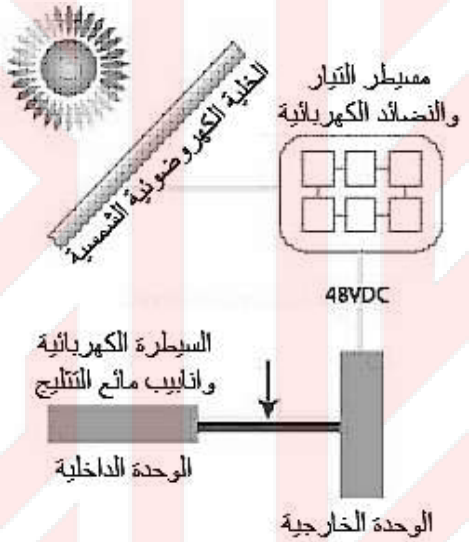
4-3/1 منظومات التثليج الشمسية مع منظومات التثليج الانضغاطية

(Solar vapor compression units)

تعد طريقة التحويل المباشر للطاقة الشمسية الى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الكهروضوئية من اكثر الطرائق استعمالا مع منظومات التثليج الانضغاطية. يتولد تيار كهربائي مباشر بعملية التأثير الكهروضوئي عند سقوط اشعة الشمس على خلية شمسية وبدون تدخل اية مولدات ميكانيكية. يعرف التأثير الكهروضوئي بأنه عملية توليد قوة دافعة كهربائية نتيجة امتصاص اشعاع ايوني في خلية كهروضوئية. ويحدث التأثير الكهروضوئي هذا في نقاط اتصال مادتين تختلفان بالموصلية الكهربائية، ومن افضل هذه المواد واكثرها استعمالا هي اشباه الموصلات.

يمكن ان تعمل مكيفات الهواء الصغيرة بسعة تصل الى طني تثليج اثنين بواسطة التيار المباشر الذي تولده خلية كهروضوئية شمسية ذات بطارية خزن الطاقة الاحتياطية(نضيدة). ومن الضواغط الاكثر استعمالا مع مكيفات الهواء الشمسية هو الضاغط الدوار الذي يعمل بالتيار المباشر وبسرعة دوران متغيرة.

تستعمل مكيفات الهواء الشمسية احياناً محول التيار المباشر الى تيار متناوب. وتمتاز مكيفات الهواء الشمسية بأنها ذات فعالية مرتفعة الا انها تتطلب مصدراً كهربائياً مساعداً وكما مبين في الشكل (4-3/1) [10,8].



الشكل 4-3/1: مكيف هواء من النوع المنفصل يعمل بالطاقة الشمسية.

4-3/2 منظومات التثليج الشمسية مع منظومات التثليج الامتصاصية

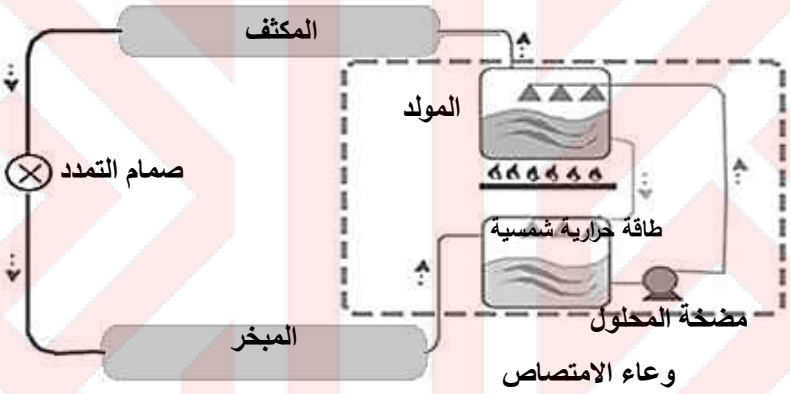
(Solar adsorption air condition)

يعد الامتصاص (absorption) من التقنيات الكيميائية التي تستعمل الحرارة الشمسية للحصول على التثليج. وتنقسم أنظمة الامتصاص إلى نوعين، الاول أنظمة تثليج تعتمد على المواد (الصلبة–الغازية) كما في منظومة التثليج الامتصاصية ذات بروميد الليثيوم– الماء. إن مائع التثليج في هذه المظومة هو الماء والمادة الماصة هو ملح بروميد الليثيوم. والثاني أنظمة تثليج تعتمد على المواد (السائلة–الغازية) كما في

منظومة التثليج الامتصاصية ذات الامونيا – الماء. إن الامونيا هي مائع التثليج في هذه المنظومة والماء هو المادة الماصة.

تتكون منظومة التثليج التي تعمل بالامتصاص من نفس الأجزاء الأربعة الرئيسة للمنظومة الامتصاصية الأساسية وهي المبخر ووعاء الامتصاص والمولد والمكثف. يقوم المولد ووعاء الامتصاص بعمل الضاغط في دورة التثليج الانضغاطية. يحدث امتصاص بخار مائع التثليج في وعاء الامتصاص من قبل المادة الماصة في حين يقوم المولد بتحرير بخار مائع التثليج من محلول المادة الماصة بتسخينه بواسطة الطاقة الحرارية من مجمعات الطاقة الشمسية كما مبين في الشكل (4-2/3).

تتراوح سعة المثلجات الامتصاصية المصنعة تجاريا بين 3 أطنان تثليج وحتى 1700 طن تثليج. يتكون نظام الامتصاص النموذجي للطاقة الشمسية من مجمعات الطاقة الشمسية وخزانات التخزين ووحدة التحكم ومضخة صغيرة وأنابيب ومثلج امتصاصي. تمتاز عملية التثليج بالامتصاص بالهدوء والخلو من الاهتزاز لذا فهي خيار مثالي للمستشفيات والمدارس ومباني المكاتب. وهي ذات موثوقية عالية وصيانة منخفضة مما يجعلها خيارا ممتازا لتلبية احتياجات تكييف الهواء. وللحصول على تفاصيل اكثر راجع الفصل (32) في مجلد الإستعمالات(applications) [6] لجمعية آشري لعام 1999 والفصل (33) في مجلد المنظومات (Systems) لجمعية آشري لعام 2000 [7].



الشكل 4-2/3: منظومة تثليج امتصاصية تعمل بالطاقة الشمسية.

4-3/3 منظومات التثليج الشمسية مع المواد الممتزة لبخار الماء

(Solar adsorption air conditioning with vapor adsorbent materials)

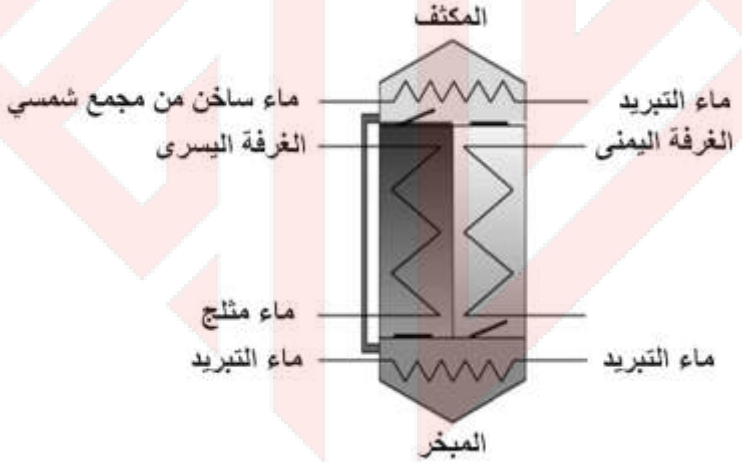
يعد التبريد الامتزازي (adsorption) تقنية فيزيائية يستفاد منها في تكييف البيئة الداخلية بدون استعمال المثلجات التقليدية. وذلك بازالة الرطوبة وتجفيف الهواء اولا (بالامتصاص او الامتزاز) نتيجة ذلك سترتفع درجة حرارته فيصبح بحاجة الى تبريده اولا بمبادلات حرارية فيغدو هواء جافا حارا قليلا ثم يبرد تبخيريا عدة مرات فيكون هواء باردا يجهز الى الحيز ويعمل على تهيئة ظروف الراحة باقل طاقة مستهلكة. يبرد الهواء الجاف عادة بواسطة المجففات ومن ثم باستعمال البريد التبخيري. إن عملية الامتزاز تعني إمكانية استيعاب بخار الماء على السطح الداخلي للمادة الصلبة ذات المسامية العالية. تجفف المواد التي تمتز الرطوبة لأجل إعادة تجديدها باستعمال الحرارة الشمسية.

هنالك نوعان من أنظمة المجفف هما نظام المجفف الصلب (الامتزاز) ونظام المجفف السائل. ومن الانواع شائعة الاستعمال لأنظمة التثليج الامتزازية التي تعمل بالمجفف الصلب هي المثلج الذي يعمل باستعمال (الماء- السيليكا جل) ومن امثلة النوع الثاني المثلج الذي يعمل باستعمال (الماء- الزيولايت). إن مائع التثليج في النوعين هو الماء والمادة الممتزة هي السيليكا جل او الزيولايت.

تتكون منظومة التثليج التي تعمل بالامتزاز من نفس الأجزاء الأربعة الرئيسة للمنظومة الامتصاصية الأساسية وهي المبخر وغرفة الامتزاز والمولد والمكثف. يقوم المولد وغرفة الامتزاز بعمل الضاغط في دورة التثليج الانضغاطية. يحدث امتزاز بخار الماء في غرفة الامتزاز من قبل المادة الصلبة الممتزة في حين يقوم المولد بتحرير بخار الماء من المادة الممتزة بتسخينها بواسطة الطاقة الحرارية من مجمعات الطاقة الشمسية كما مبين في الشكل (4-3/3).

ان السعات المتوافرة بصورة تجارية من مثلجات الامتزاز التي تستعمل (الماء- السيليكا جل) هي 70 كيلو واط عند درجة حرارة تشغيلية بين 60 الى 90 درجة مئوية مع معامل اداء مقداره 0.6.

يعمل مثلج الامتزاز بمبدأ الامتزاز بتفاعل بخار الماء مع المادة الصلبة (السيليكا جل) على وفق ما يلي: يرش اولا مائع التثليج (الماء) في المبخر وتبخيره بامتصاص الحرارة وحصول التأثير التبريدي. ثم يمتص بخار الماء بواسطة السيليكا جل في القسم الأيمن من مبرد الامتزاز الذي يعمل بالطاقة الشمسية. ومن ثم يطرد مائع التثليج الذي تم امتصاصه سابقا في القسم الأيمن من القسم الأيسر في مبرد الامتزاز بتسخينه بواسطة الطاقة الحرارية الشمسية. يتحقق تبادل العمل بين الأقسام دوريا لطرد الحرارة الصادرة نتيجة عملية الامتصاص والتي تسمى بحرارة الامتصاص. واخيرا يتكاثف بخار الماء في المكثف بطرد الحرارة بواسطة الماء المبرد في برج التبريد[8].

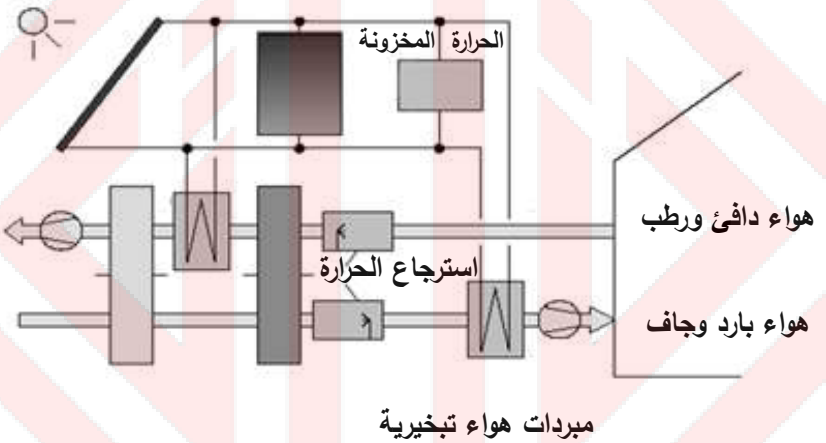


الشكل 4-3/3: مبرد امتزازي يعمل بالطاقة الشمسية.

بمقارنتها بالمثلجات الامتصاصية، تحتوي المثلجات الامتزازية على العديد من المزايا والعيوب هي:

المميزات	العيوب
– ذات درجات حرارة تشغيل منخفضة بين 60–90 °C – لا يوجد خطر من التبلور. – لا توجد مضخة داخلية.	– اسعارها مرتفعة لقلة انتاجها تجاريا. – الحاجة إلى تحسين في التصميم والتحكم. – عدد قليل من المصنعين متوافرون.

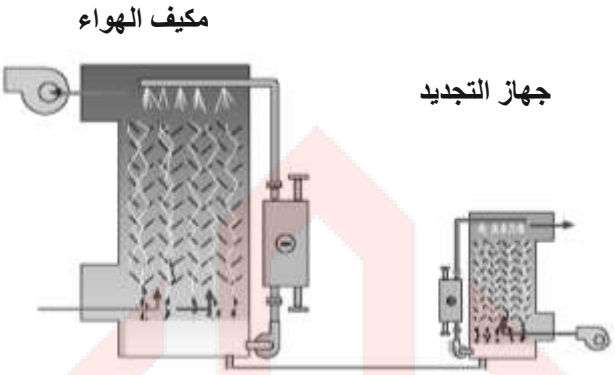
في نظام المجفف الصلب يمر الهواء الخارجي الحار والرطب من خلال عجلة امتصاص بخار الماء الدوارة المبينة في الشكل (4–4/3) [14].



الشكل 4–4/3: نظام تبريد امتزازي يعمل بالطاقة الشمسية.

يعد تبريد الهواء بالمواد الماصة السائلة تقنية تستعمل محلول كلوريد الليثيوم كمادة امتصاص. وتقوم هذه الأملاح المسترطبة بخفض ضغط بخار الماء في المحلول بدرجة كافية لاتمام امتصاص الرطوبة من الهواء. وعلى العكس مما في حالة المواد الممتزة الصلبة، فان آلية استيعاب الماء من قبل محلول كلوريد الليثيوم ليست آلية امتزاز وانما آلية امتصاص. يتميز تبريد المجفف السائل عن تبريد المجفف الصلب بارتفاع معدلات التجفيف عند درجات حرارة مماثلة وإمكانية تخزين الطاقة باستعمال محلول سائل مركز.

تتكون أنظمة الامتصاص المستعملة لتجفيف الهواء بصورة أساسية من الماص (المثلج) والمجدد. تستعمل حرارة الطاقة الشمسية في المولد لاغراض إعادة تجديد المحلول كما مبين في الشكل (4–5/3).



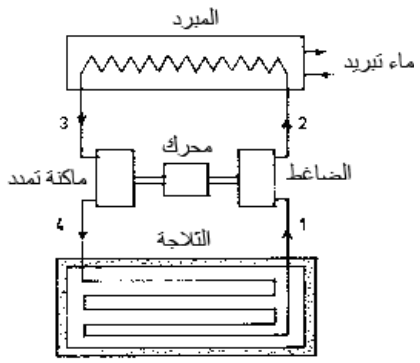
الشكل 4-3/5: نظام تبريد المجفف السائل.

4-4 منظومات تثليج أخرى غير تقليدية (Other untraditional refrigeration units)

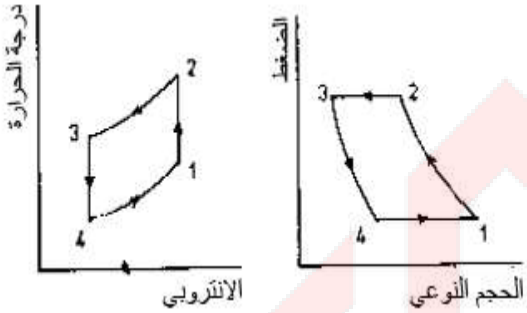
4-4/1 منظومة الهواء للتثليج (Air refrigeration cycle)

استعملت دورة الهواء المغلقة للتثليج وتكييف الهواء قبل ظهور موائع التثليج المهلجنة. ومنظومة الهواء للتثليج هي المنظومة الوحيدة التي تستعمل غازاً وهو الهواء في الدورة حيث لا يتكثف الهواء ولا يتبخر فيها وإنما يبقى على حالته الغازية. يبين الشكل (4-4/1) دورة هواء مغلقة حيث يضغط الهواء فيها بضاغط ترددي ثم يبرد الهواء المضغوط في المبرد بواسطة الماء بعملية تبريد محسوس. ويتمدد الهواء بعد تبريده بآلة تمدد حيث ينجز الهواء شغلا في أثناء تمدده يساعد في تقليل الشغل الصافي المبذول في الدورة. ثم يقوم الهواء البارد المتمدد بامتصاص حرارة من الحيز المراد تثليجه بعملية تسخين محسوسة. ويعود الهواء بعد امتصاص الحرارة من الثلاجة الى الضاغط لتستمر العملية من جديد [8,1]. وللحصول على تفاصيل اكثر راجع الفصل (9) في مجلد الإستعمالات (applications) لجمعية آشري لعام 1999 [6].

يمكن مقارنة دورة الهواء بدورة برايتون المعكوسة (reversed Brayton cycle) الموضحة على مخططي درجة الحرارة – الانتروبي والضغط –الحجم مع انضغاط وتمدد بانتروبي ثابت لكل منهما وهي مبينة في الشكل (4-4/2)، حيث يلاحظ أن كلا من عملية الانضغاط والتمدد عكوسية اديباتية وأن عمليتي التبريد والتسخين المحسوسين تنجزان بضغط ثابت.



الشكل 4-1/4: دورة هواء مغلقة.



الشكل 4-2/4: دورة برايتون المعكوسة.

4-2/4 منظومة التثليج بنفث البخار (Steam jet refrigeration system)

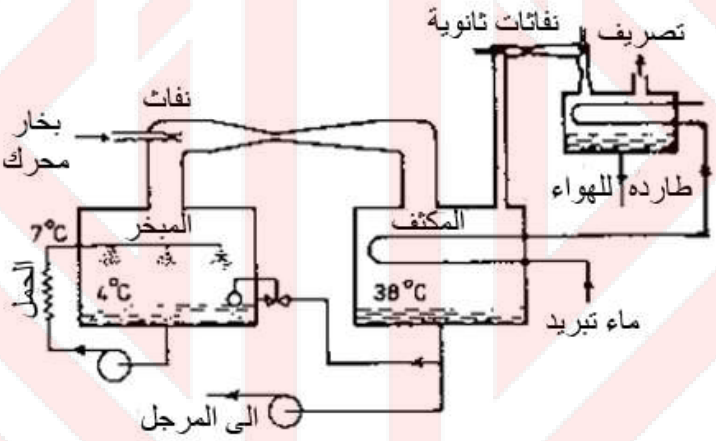
استعملت هذه المنظومة في مطلع ظهورها في الثلاثينات من القرن السابق في تكييف المباني. ولكن ظهور منظومات التثليج الانضغاطية والامتصاصية جعل استعمال منظومة نفاث البخار تنحصر تدريجيا بحيث لم تعد تستعمل لأغراض تكييف الهواء الا ما ندر. ولكنها تستعمل حيثما توافر بخار الماء بكثرة وبدون كلفة كبيرة مثل ما هو الحال في الصناعات الإنتاجية وخاصة الكيميائية منها.

الماء هو مائع التثليج في هذه المنظومة وتبخره يؤدي الى حصول فعل التثليج حيث يتبخر رذاذ من الماء في المبخر مسببا هبوط درجة حرارة بقية السائل في قعر المبخر. ويتبخر ما يكفي منه لتبريد الماء الراجع من حمل التثليج كما مبين في الشكل (4-3/4). وما دام الماء مائع التثليج لابد من أن تكون درجة حرارة المبخر بحدود 4 الى 8 درجة مئوية. أي ان ضغط المبخر سيكون بحدود 0.8 الى 1 كيلو باسكال ضغطا مطلقا. وبالطبع لابد من إزالة بخار الماء من المبخر بوسيلة ما لضمان استمرار العملية. وبإمكان نفاث البخار ضخ كمية كبيرة من بخار الماء بدون أي تلوث أو اختلاط غير مرغوب ما دام البخار المحرك بخار ماء ومائع التثليج هو الماء كذلك.

يعمل نفاث البخار بالأسلوب التالي: يجهز البخار الدافع إلى النفاث الرئيس بضغط بحدود 0.6 الى 10 كيلوباسكال وبسبب شكل النفاث فان البخار يخرج منه بسرعة أعلى من سرعة الصوت. ويمر هذا البخار السريع جدا في مقطع يتضيق ثم ينفرج (converging-diverging section) ساحبا معه بخار الماء من المبخر. ويسمى المبخر كذلك في هذه الحالة حجرة الترذيذ (flash chamber) وذلك لان الماء يترذذ بفعل نافثات رش المبخر ويتطاير الرذاذ إلى الأعلى مسحوبا ببخار النفاث الرئيس. ويقوم الجزء المنفرج من المقطع بتحويل جزء من طاقته الحركية إلى محتوى حراري مسبباً بذلك زيادة ضغط البخار الى ضغط المكثف. وعند تطاير او تبخر رذاذ الماء فانه يمتص الحرارة الكامنة للتبخر من بقية السائل مسببا هبوط درجة حرارته وادامة درجة حرارة المبخر عند الحد المطلوب. يتكثف بخار ماء النفاث الرئيس وبخار الماء المسحوب من المبخر في المكثف معا بدرجة حرارة بحدود 38 درجة مئوية حيث يكون مبردا بالماء ويكون ضغط المكثف بحدود 0.6 الى 8 كيلوباسكال. يقوم نفاث البخار الرئيس والمقطع المتضيق المنفرج بعمل

الضاغط في دورة التثليج الانضغاطية وبعمل المولد ووعاء الامتصاص في الدورة الامتصاصية. حيث ينتقل بخار مائع التثليج من المبخر إلى المكثف مع رفع ضغطه وإدامة فرق الضغط بينهما. ومن الملحقات الضرورية في دورة التثليج بنفث البخار وحدة طرد الهواء. حيث تقوم بطرد هواء المنظومة المتواجد فيها أساسا إضافة إلى ما يتسرب إلى داخلها في اثناء عملها عند وجود تسرب في اجزاء المنظومة.

تكون كلفة تشغيل منظومة التثليج بنفث البخار قليلة عند توافر البخار بكلفة قليلة كما إن كلفة إدامة المنظومة قليلة أيضا لخلوها من الأجزاء المتحركة عدا مضختين. أما مساويء المنظومة فهي عدم إمكانية استعمالها بدرجات حرارة دون الصفر المئوي وان الحرارة المطروحة من المكثف لحاصل التثليج نفسه تعادل ضعف الحرارة المطرودة في مكثف دورة التثليج الانضغاطية. لذا فهي كثيرة الاستعمال حيث يتوافر البخار لأغراض متعددة وبكلفة قليلة اعتياديا مع توافر ماء تبريد المكثف من برج تبريد [8,1].



الشكل 4-3/4: منظومة التثليج بنفث البخار.

4-3/4 منظومة التثليج بأنبوب الدوامة (Vortex tube refrigeration system)

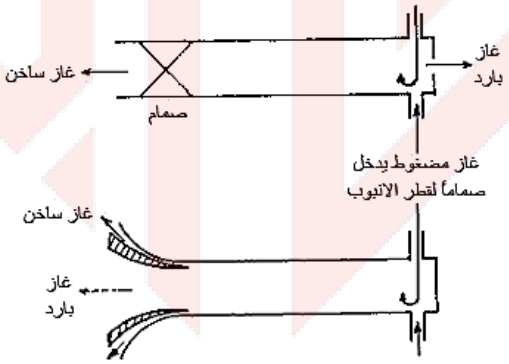
يتألف أنبوب الدوامة من طول قصير لأنبوب مستقيم يدخل اليه الهواء المضغوط من إحدى نهايتيه بصورة مماسة لقطر الأنبوب (tangentially). ويوجد في النهاية الأخرى صمام لتنظيم معدل تدفق الهواء. ونتيجة خنق التدفق بالصمام وضغط الهواء وحركته الدورانية ينفصل تيار الهواء الى جزأين، تيار مركزي وسطي (central core) وتيار طرفي قطري (peripheral). ويمكن إجراء ذلك بحيث يخرج كل تيار من إحدى نهايتي الأنبوب وهو الشائع، أو يخرجان سوية من نهاية واحدة كما مبين في الشكل(4-4/4). ونتيجة لانفصال التيار يكون الجزء الوسطي باردا والتيار الطرفي القطري ساخنا نسبة إلى درجة حرارة دخول الهواء المضغوط. وقد تحصلت درجة حرارة للهواء البارد بحدود 50 درجة مئوية وأكثر دون درجة حرارة الهواء المضغوط وبضغط ابتدائي معتدل. لايقتصر استعمال أنبوب الدوامة على الهواء المضغوط وإنما يمكن استعمال أي غاز لذلك الغرض. ان معامل الأداء المنظومة التلييج بأنبوب الدوامة قليل جدا وبحدود 0.1 إلى 0.15 لاحتياجها الى كميات كبيرة من الهواء المضغوط لذا لم تعط منظومة التثليج بأنبوب الدوامة كثيرا من الاهتمام. واقتصر استعمالها على إستعمالات محدودة معزولة مثل تبريد الأجهزة الكهربائية في بعض الأماكن.

يعتمد هبوط درجة حرارة الهواء البارد وارتفاع درجة حرارة التيار الساخن على الضغط الابتدائي وعلى ما يسمى نسبة معدل تدفق الهواء البارد (cold fraction) الى معدل التدفق الكتلي الكلي [8,1].

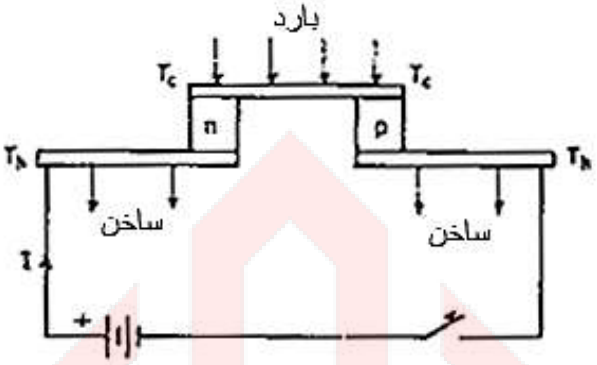
4/4-4 منظومة التثليج الكهروحرارية (Thermal-electric refrigeration system)

إن ظاهرتي سيبك وبلتير (seebeck & peltier effects) ظاهرتان كهروحراريتان متعاكستان. استغل تأثير سيبك في صناعة المزدوجات الحرارية (thermocouples) في حين استغل تأثير بلتير في التثليج الكهروحراري. وكثر الاهتمام بتأثير بلتير بعد اكتشاف أشباه الموصلات. وهنالك نوعان من أشباه الموصلات الأول يسمى n وله معامل سيبك سالب ويمتلك فائضا من الألكترونات والثاني نوع P وله معامل سيبك موجب وهو شحيح بالألكترونات. ولصنع ما يسمى وحدة كهروحرارية تجمع أعداد كبيرة منها ويوضع بينهما مادة عازلة. ويبين الشكل(4-4/5) وحدة كهروحرارية واحدة فيها قطب علوي بارد وقطب سفلي ساخن يطرح الحرارة إلى المحيط. وتوضع الوحدات (أي أزواج الأقطاب) مع بعضها وتربط على التوالي لتشكل صفا واحدا. ثم يمكن وضع صفوف متعددة إلى جانب بعضها البعض لتتكون صفيحة قادرة على امتصاص الحرارة في جانبها البارد منتجة بذالك فعل التثليج في حين يقوم الجانب الآخر بطرح الحرارة. وتوضع اعتياديا زعانف على الجانب الساخن لتشتيت الحرارة بفعالية اكبر. كما إن صانعي هذه الوحدات يستطيعون إنتاجها بأي شكل وهندسة مطلوبين لملاءمة إستعمال معين.

إن معامل أداء الثلاجة الكهروحرارية صغير جدا مقارنة مع دورة التثليج الانضغاطية مثلا، خاصة عند ازدياد الفرق بين درجات حرارة الجانبين البارد والساخن. كما ان كلفة أشباه الموصلات وصناعة وحدة كهروحرارية مرتفعة جدا مما جعل الثلاجة الكهروحرارية ضيقة الاستعمال محدودة التطبيق. ولكن لها من المميزات ما يجعلها ملائمة للاستعمال في تبريد الأجهزة الالكترونية وفي مركبات الفضاء وحاضنات الأطفال [8,1].



الشكل 4-4/4: منظومة التثليج بأنبوب الدوامة.



الشكل 4-4/5: وحدة تثليج كهروحرارية.

مراجع الباب 4

[1] Joudi, K. A., "***Principles of Air Conditioning & Refrigeration***", Iraq, 1988.

[2] Shan, K. W., "***Hand Book of Air Conditioning and Refrigeration***", McGraw-Hill, U.S.A., 2001.

[3] ASHRAE, "***1997 ASHRAE Handbook : Fundamentals***", The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A., 1997.

[4] Stocker, W.F. &Jones ,J. W., "***Refrigeration and Air Conditioning***", McGraw-Hill, U.S.A.,1988.

[5] ASHRAE, " ***1998 ASHRAE Handbook : Refrigeration***", The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A.,1998.

[6] ASHRAE, "***1999 ASHRAE Handbook : Applications***", The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A., 1999.

[7] ASHRAE, "***2000 ASHRAE Handbook : Systems***", The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A., 2000.

[8] Ibrahim, D. & Mehmet, K., ***"Refrigeration and Air Conditioning"*** , Wiley, U.S.A., 2010.

[9] Dorgan,C,.B. & Leight, S., "***Application Guide for Absorption Cooling / Refrigeration Using Recovered Heat*"**, ASHRAE, U.S.A., 1995.

[10] Soteris, A. & Kalogiron, C.,"***Solar Energy Engineering Systems and Applications***", Academic Press- Elsevier, U.S.A., 2009.

[11] ARI, "***The American Refrigeration Institute***", U.S.A.550/590, 1998.

[12] ANSI/ASHRAE 90.1-,"***The American National Standards Institute***", U.S.A., 1999.

[13] ARI, **"*The American Refrigeration Institute*"**, U.S.A.,1998.

[14] Collier R.K.,Desiccant, "***Dehumidification and Cooling System Assessment and Analysis***", Final.Report , U.S. Department of Energy, DE-AC06-76RLO, 1997.

الباب 5

مكونات منظومات التثليج (Refrigeration System Equipment)

5-1 انواع الضواغط واستعمالاتها (Types of compressors and its applications)

تعتبر الضواغط من اهم اجزاء منظومات التثليج، حيث تقوم بعملية ضغط مائع التثليج ميكانيكيا وهو في حالة البخار الى ضغط مرتفع فتزداد مع ارتفاع الضغط ودرجة حرارته. ثم يمرر فى المكثف لتحويله من حالة البخار إلى السائل مع تجميعه فى خزان سائل التثليج. يمر مائع التثليج إلى المبخرات (evaporators) من خلال صمام تمدد فينخفض ضغط ودرجة حرارة مائع التثليج بداخل المبخرات مما يسبب تبادل الحرارة بين مائع التثليج البارد وجو المخزن فى الثلاجات أو المياه المراد تحويلها إلى ثلج فى مصانع إنتاج الثلج، أو المادة المراد تبريدها. وبإنتقال الحرارة إلى مائع التثليج يتحول مرة أخرى إلى بخار ليصل إلى الضاغط ليعاد ضغطه مرة أخرى وتستمر الدورة. وتكون الضواغط بعدة انواع بحسب طريقة ضغط البخار، فمنها الترددي والطارد المركزي والدوار والحلزوني واللولبي او بحسب طريقة ربطه بالمحرك الكهربائي ووعاء احتوائه فهناك المحرك المغلق ونصف مفتوح والمفتوح.

5-1/1 ضواغط الازاحة الموجبة (Positive displacement compressors)

يعد الضاغط قلب دورة التثليج الانضغاطية. ولم تتسع وتتطور صناعة التثليج الا بعد تطور وتقدم صناعة الضاغط. وتسمى الضواغط بضواغط الازاحة الموجبة عندما تدفع ما بداخلها من بخار مائع التثليج في كل حركة مع استحالة رجوع هذا البخار بصورة معكوسة ابدا كما قد يحصل احيانا في الضاغط الطارد (الطارد) المركزي. ولذلك يصنف الضاغط الطارد المركزي انه ضاغط ازاحة موجبة. وهناك خمسة انواع رئيسة من الضواغط ذات الازاحة الموجبة في دورات التثليج الانضغاطية وهي [1،ص507] :-

5-1/1/1 الضواغط الترددية (Reciprocating compressors)

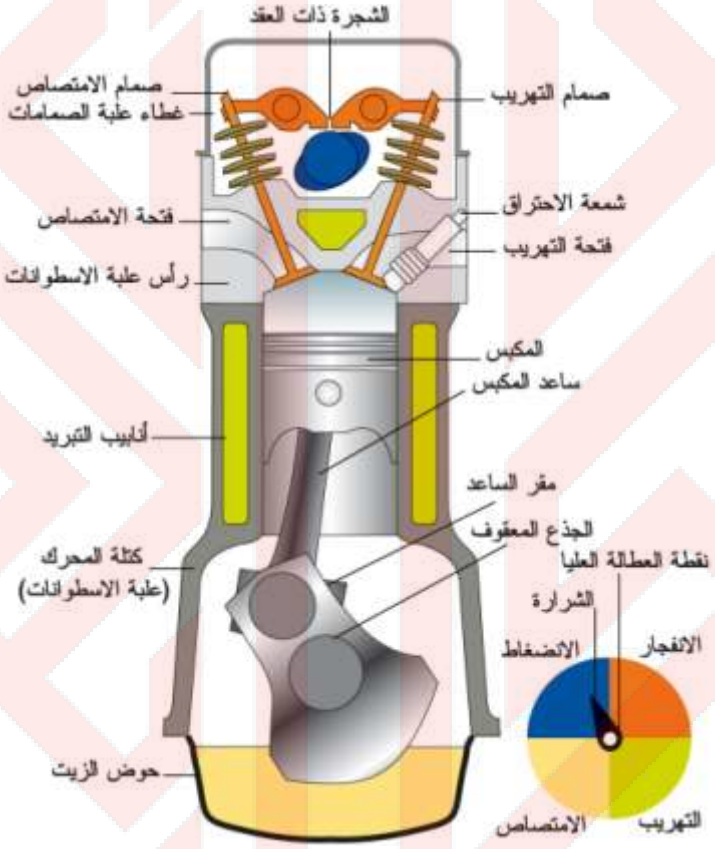
يعد الضاغط الترددي، يلاحظ الشكل (5-1/1) [3،ص2]، اكثر الضواغط انتشارا. وتتراوح قدرة هذا الضاغط بين جزء من طن تثليج الى بضعة مئات طن تثليج. يتألف الضاغط الترددي من مكابس تتحرك صعودا ونزولا (واحيانا بحركة افقية) داخل اسطوانات مجهزة بصمامات للسحب والدفع بحيث تتحقق حركة مستمرة لضخ بخار مائع التثليج وزيادة ضغطه. وقد يحتوي الضاغط على مكبس واحد او عدد منها قد يصل 16 او اكثر مرتبة اعتياديا على شكل الحرف (V) او الحرف (W) او ربما باستقامة مثل ما كان الحال مطلع تطور صناعتها. وجميع المكابس احادية الشوط اي انها تسحب بخار مائع التثليج البارد بضغط المبخر الواطئ في شوط السحب وتضغطه الى ضغط المكثف وتدفعه اليه بدرجة حرارة اعلى في شوط الدفع.

وعادة ما تدار هذه الضواغط بواسطة محركات كهربائية. وتكون طرائق اتصال محور الضاغط بمحور المحرك بواحد من الأساليب الآتية:

1 - النوع المفتوح (open type) ويكون فيه بدن الضاغط منفصلاً عن بدن المحرك والاتصال بينهما إما مباشراً (direct coupling) أو غير مباشر عن طريق الحزام الناقل (belt driven).

2 - النوع نصف المفتوح (semi hermetic) ويكون فيه الضاغط والمحرك الكهربائى داخل جسم واحد مصنع بطريقه تسمح بإجراء أعمال الصيانة للضاغط بوجود اغطية قابلة للفتح.

3 - النوع المغلق (hermetic) ويكون فيه الضاغط والمحرك داخل غلاف معدنى مغلق واحد ومحكم تماماً ولا يسمح بإجراء الصيانة.

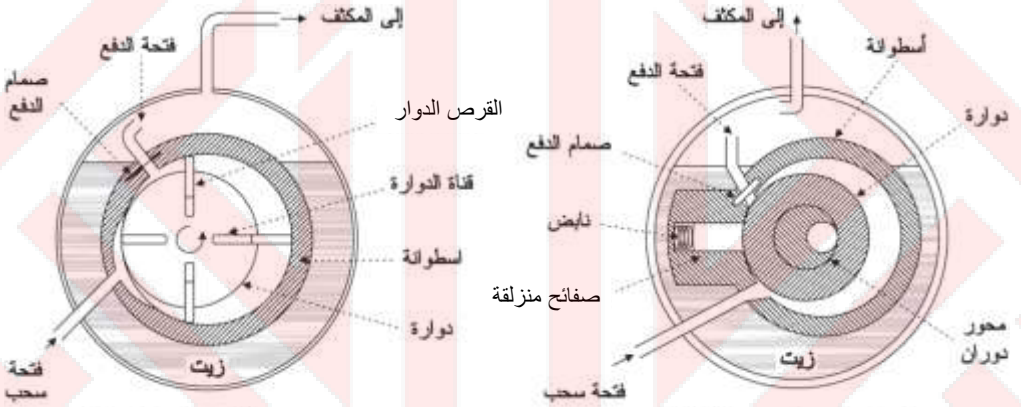


الشكل 5-1/1: الضاغط الترددي.

5-1/1/2 الضواغط الدورانية (Rotary compressors)

يقتصر انتاج الضواغط الدورانية على قدرات اقل من طن تثليج واحد اعتيادياً، ولكن هناك إستعمالات خاصة في مجال تكييف الهواء تحتاج لتوليد الضغط العالي بشكل متدرج على خطوتين او اكثر وبحسب متطلبات الحمل الحراري المطلوب، ومثل هذه الإستعمالات انتجت لها ضواغط دوارة بقدرة اكثر من 100 طن تثليج. وهناك نوعان اساسيان من الضاغط الدوار، الاول هو النوع ذو الصفائح المنزلقة (vane type)، كما في الشكل (5-1/2-أ) والثاني هو النوع ذو القرص الدوار (roller type) كما في الشكل (5-1/2-ب). ففي

النوع ذي القرص الدوار يكون مركز القرص الدوار ومركز الاسطوانة متطابقين ولكن المحور مرتبط بنقطة لاتمركزية مع القرص الدوار بحيث يتلامس القرص مع الاسطوانة عند دورانه. وهناك صفيحة فاصلة محملة بنابض لعزل حجرتي السحب والدفع.اما النوع ذو الصفائح المنزلقة فيمكن ان يحتوي صفيحتين منزلقتين او اربع او ست او ثمان. ويرتبط محوره الدوار بمركز القرص الحاوي على صفائح حيث يدور على مركزه. ولكن مركز القرص الدوار والاسطوانة لا يتطابقان. وتندفع الصفائح المنزلقة الى الخارج بفعل القوة الطاردة المركزية متماسة بذلك مع جدار الاسطوانة كما في الشكل (5-2/1-أ). وتستطيع الضواغط الدورانية دفع احجام كبيرة نسبيا من بخار مائع التثليج لكل كيلوواط تثليج مقارنة مع الضاغط الترددي ولكن دفعها اقل بكثير من الضاغط الطارد المركزي. لذا يمكن استعمال موائع التثليج ذات الحجم النوعي الكبير لحالة البخار مع الضاغط الدوار [1،ص 2].



أ - ذو الصفائح المنزلقة ب - ذو القرص الدوار

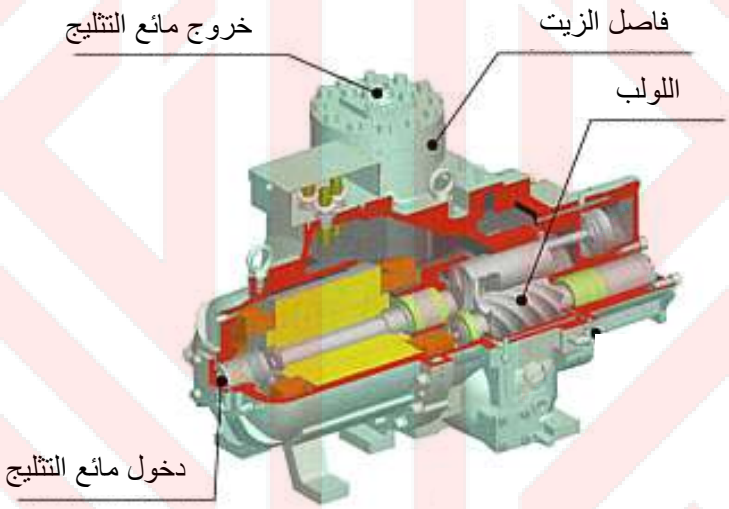
الشكل 5-2/1: الضاغط الدوراني.

5-1/1/3 الضواغط اللولبية (Screw compressors)

ان الضاغط اللولبي جهاز ازاحة موجبة يستعمل مع موائع التثليج بضغوط اعلى من الضغط الجوي لتثليج الماء في إستعمالات تكييف الهواء، ويستعمل اعتياديا مع مكثف مبرد بالماء. ويحتوي بيت الضاغط كما موضح في الشكل (5-1/3/) [1،ص 2] على لولبين متعشقين ببعضهما احدهما لولب ذكر والآخر لولب انثى. يتصل اللولب الذكر مباشرة بمحرك كهربائي باسلوب اتصال مفتوح، اي ان محور اللولب يمتد خلال بيت الضاغط. وليست هناك صمامات للسحب او الدفع وانما بدل ذلك ينتج دوران اللولبين حيزا متزايدا بالحجم في كل سن عند ترك اللولب الذكر اللولب الانثى في جهة السحب فيجري بخار مائع التثليج بين هذه الفراغات. ثم يبدأ اللولب الذكر وفي كل سن بعبور هذه الفراغات واغلاقها تدريجيا مع الدوران مسببا بذلك انضغاط البخار المحصور في الفراغات ما بين الاسنان. ان عملية الانضغاط عملية مستمرة تنتهي بخروج البخار الساخن المضغوط من النهاية البعيدة لبيت الضاغط عندما تنفتح الفراغات ما بين الاسنان اليها. ويحتوي كل لولب على اربعة اسنان. واذا كانت سرعة الدوران 48 دورة في الثانية فان 192 فراغا ستتعرض ما بين اللولبين الى جهتي السحب والدفع في كل ثانية، وهكذا سينتج دفق منتظم.

تتحقق السيطرة التدريجية على قدرة الضاغط بانتظام وسلاسة الى حوالي 10% من القدرة التصميمية بواسطة صمام منزلق في قاعدة بيت الضاغط. فعند زيادة هذه الفتحة تدريجيا يهرب البخار المسحوب بين اسنان اللولبين ويعاد تدويره بدون انضغاط. وبذلك تنخفض ازاحة الضاغط وتقل القدرة بخسائر ضئيلة. ويكون منحى الاداء للضاغط اللولبي تحت حمل جزئي مسطحا يمتد من 100% من القدرة المبذولة عند الحمل الكلي الى حوالي 20% من القدرة المبذولة عندما يصبح الحمل 10% من الحمل الاقصى.

ان الضاغط اللولبي مثل الضاغط الترددي جهاز ازاحة موجبة مصمم ليستمر في ضخ بخار مائع التثليج اذا ما اعطي الطاقة الكافية. واصبحت هذه النوعية من الضواغط سهلة الحصول وجيدة الاداء وتتوافر حاليا بقدرات من 350 كيلوواط تثليج الى اكثر من 2000 كيلوواط تثليج.



الشكل 5-1/3: الضاغط اللولبي.

5-1/1/4 الضواغط الحلزونية (Scroll compressors)

يتكون الضاغط الحلزوني كما في الشكل (5-1/4) [1،ص 2] من محورين مسننين (scrolls) معشقين فيما بينهما، أحدهما قائد (مسنن ثابت) والثاني مقاد (مسنن دوار)، يملأ مائع التثليج التجاويف بين المسننين وفي أثناء الدوران ينضغط وينتقل مائع التثليج من جزء السحب إلى جزء الدفع. تنجز عمليتا السحب والدفع لمائع التثليج في هذا النوع من الضاغط خلال دوران كامل للمسننين وبذلك له عنصر ضاغط واحد. ولا تستعمل الضواغط الحلزونية صمام السحب بل تحتوي على صمام دفع فقط لأجل الحصول على نسبة الضغط العالي حيث يحسن من فعاليتها على مجال واسع من ظروف التشغيل كما في انظمة التثليج. يكون حجم الضاغط صغيرا ويعمل عند الاحمال الجزئية من خلال نفث بخار مائع التثليج لتغيير الحمل ويتضمن عدداً قليلاً من الاجزاء المتحركة مقارنة مع الضواغط الاخرى، وبذلك يكون عمله اكثر هدوءاً وموثوقاً به مقارنة بالضواغط التقليدية الترددية [6،ص 3].

تستعمل الضواغط الحلزونية في الكثير من اجهزة تكييف الهواء المجمعة نظرا لما تمتاز به من مرونة في العمل وقلة الحاجة الى الصيانة.

الشكل 5-4/1: الضاغط الحلزوني.

5-5/1/1 ضواغط الطرد المركزي (Centrifugal compressors)

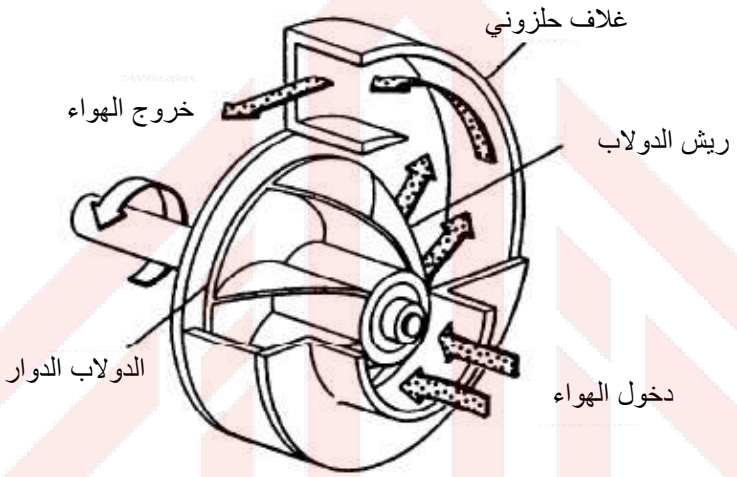
يتماثل عمل هذا الضاغط مع عمل مضخات الماء الطاردة المركزية. حيث يقوم الدولاب الدوار (impeller) للضاغط الطارد المركزي برفع ضغط الغاز الجاري عبر قنواته بفعل القوة الطاردة المركزية الناتجة من سرعته الزاوية. وتعطي ريش الدولاب سرعة عالية الى الغاز الذي يجري بعدها من الدولاب الى غلاف حلزوني يقوم بتحويل جزء من ضغطه الحركي او طاقته الحركية الى ضغط استاتي بفعالية عالية. ان الضاغط الترددي والضاغط الدوارني جهازا ازاحة موجبة في حين ان الضاغط الطارد المركزي ليس كذلك.فاذا تم خنق تدفق الغاز الى الضاغط الترددي فانه يستمر بالضخ ولكن بمعدل اقل مع بقاء سرعته ثابتة.

تتراوح قدرات الضاغط الطارد المركزي من حوالي 200 كيلو واط تثليج الى اكثر من 10000 كيلوواط تثليج. ولكنه يكون اكثر اقتصاديا في الكلفة الاساسية من الضاغط الترددي عندما تكون قدرته اكثر من 500 كيلوواط تثليج. وتدور هذه الانواع من الضواغط بسرع كبيرة جدا بواسطة توربين بخاري او محرك كهربائي. وتستعمل احيانا مجموعة تروس مابين المحرك والضاغط لزيادة سرعة دوران دولاب الضاغط. واكثر استعمالات هذا الضاغط في وحدات تثليج الماء (chillers) لاغراض تكييف الهواء. وتكون معظمها ذات مكثف مبرد بالماء ولكن هناك ما منه مبرد بالهواء. كما انها تعمل بضغط مبخر دون الضغط الجوي وضغط مكثف اعلى بقليل من الضغط الجوي. اي ان فرق الضغط بين المكثف والمبخر ضئيل جدا مقارنة بالضاغط الترددي. وهناك من الضواغط مايعمل بضغط مبخر اعلى من الضغط الجوي كما موضح في الشـــكل (5-5/1).

ان اكثر موائع التثليج استعمالا مع الضاغط الطارد المركزي هي R-11 ومائع التثليج R-113 وهما ذوا كثافة واطئة ويكونان بحالة سائلة في درجة حرارة الغرفة. اما حاليا فيستعمل R-134a بديلا لهذين المائعين.

تعد اهم ميزة في الضاغط الطارد المركزي على الضاغط الترددي امكانية السيطرة المتدرجة على قدرته. كما انه شبه خالٍ من الاهتزاز مقارنة بالضاغط الترددي واقل ضوضاء" خاصة ذا المرحلتين. وحقيقة الامر ان

الضاغط الترددي يكون افضل واكثر اقتصادا لغاية قدرة تصل الى 200 طن تثليج تقريبا. اما عند قدرات اكبر من هذه القدرة فلا بد من التحويل الى الضاغط الطارد المركزي لان الضاغط الترددي يصبح كبير الحجم، كثير الاسطوانات، كثير الضوضاء. وقد تضاهي كلفته كلفة الضاغط الطارد المركزي.



الشكل 5-5/1: ضاغط الطرد المركزي.

5-2 المكثفات (Condensers)

تطرح جميع الحرارة المكتسبة في منظومة التثليج في المكثف. ولازالة الحرارة منه لابد ان يكون مبردا بالماء او الهواء او الاثنين معا في المكثفات التبخيرية [4،ص32]. يتسلم المكثف بخار مائع التثليج المحمص القادم من الضاغط ويزيل تحميصه ثم يحوله الى سائل بالتكثيف. ويمكن تقسيم المكثفات عموما الى نوعين: المكثفات المبردة بالماء والمكثفات المبردة بالهواء. اما المكثفات التبخيرية (evaporative condensers) فيصنفها البعض الى نوع ثالث في حين يضمها آخرون الى تلك المبردة بالماء والحقيقة انها تشكل نوعا ثالثا.

5-2/1 المكثفات المبردة بالماء (Water-cooled condenser)

تضم المكثفات المبردة بالماء النوع ذا الاسطوانة والانابيب (shell and tube) والنوع ذا الاسطوانة والملف (shell and coil) والنوع ذا الانبوبين متحدي المركز (double pipe)، واكثر هذه الانواع استعمالا هو النوع الاول إذ أن جميع وحدات التثليج بقدرات اكبر من 15 طن تثليج تقريبا تستعمله حصرا[1,ص518] .

5-2/1/1 مكثف الإسطوانة والأنابيب (Shell and tubes condenser)

يدخل بخار مائع التثليج المحمص في مكثف الاسطوانة والانابيب من الاعلى ليشغل جوف الاسطوانة. ثم يتبرد عند ملامسته انابيب الماء البارد ويتكثف عليها، ثم يتجمع السائل المتكثف في قعر الاسطوانة ويخرج منها الى صمام التمدد او قد يذهب الى وعاء تسلم (receiver) قبل وصوله الى صمام التمدد. ووعاء التسلم عبارة عن اسطوانة صغيرة نسبيا لخزن سائل التثليج. اما الماء الذي يبرد المكثف فانه يدخل من احدى

نهايات الاسطوانة بانبوب رئيس ثم يتوزع على انابيب المكثف الكثيرة جدا. وقد يدخل الماء من احدى النهايتين ويخرج من الاخرى حيث يسمى المكثف حينئذ ذو ممر واحد (1 pass) او انه يدخل في نصف الانابيب التحتاني ويمر فيها الى النهاية المقابلة ثم يعود في النصف العلوي من الانابيب خارجا من المكثف من النهاية التي دخل منها نفسها حيث يسمى المكثف هنا ذو ممرين (2 passes). والمكثف ذو الممرين افضل من ذي الممر الواحد. وبالامكان رفع نهايتي الاسطوانة اعتياديا لتمكين تنظيف انابيب الماء من الاوساخ والترسبات التي تتجمع داخلها في اثناء موسم التشغيل. وتجري عملية تنظيف المكثفات موسميا اعتياديا في مثل اجوائنا.

5-2/1/2 مكثف الإسطوانة والملف (Shell and coil condenser)

في هذا النوع من المكثفات، يستعاض عن الانابيب المستقيمة بملف حلزوني داخل الاسطوانة. ويكون اعتياديا عند مكان دخول وخروج الماء في نهاية واحدة من الاسطوانة. ولا يفضل هذا النوع في المناطق التي يكون الماء فيها حاويا على الكثير من الاملاح والمواد العالقة (مثل العراق) التي تترسب وتتكلس داخل الملف تدريجيا. ولا يمكن تنظيفه مثل تنظيف الانابيب المستقيمة في مكثف الاسطوانة والانابيب. وطريقة التنظيف الوحيدة الممكنة هي بغسل الملف بتدوير مواد مزيلة للترسبات. ولكن هذه المواد لا تزيل التكلسات الشديدة. ففي الوقت الذي يمكن فيه ازالة مثل تلك التكلسات بفرش معدنية في الانابيب المستقيمة يستحيل ذلك مع الملف.

5-3/1/2 المكثف بأنابيب متحدة المركز (Concentric pipes condenser)

يتكون المكثف بانبوبين متحدي المركز من انبوبين احدهما داخل الاخر. ويجري ماء التبريد في الانبوب الداخلي في حين يتكثف بخار مائع التثليج في الفراغ الحلقي. ويكون معدل انتقال الحرارة في هذا النوع اوطأ مما هو عليه في الانواع الاخرى بسبب بطء تصريف سائل التثليج الذي يعيق تماس البخار الساخن مع الانبوب الداخلي البارد. وتعد مشكلة تنظيف هذا النوع من المكثفات مماثلة لما ذكر آنفاً عن المكثف باسطوانة وملف.

5-2/2 المكثفات المبردة بالهواء (Air-cooled condenser)

تطرح الحرارة من المكثف الى الهواء في النوع المبرد بالهواء بدلا من الماء. ولكن المكثفات المبردة بالماء افضل لان الحرارة النوعية للماء حوالي اربعة اضعاف الحرارة النوعية للهواء كما ان كثافة الماء تعادل الف ضعف تقريبا بقدر كثافة الهواء لذا فان معدل التدفق الحجمي اللازم للهواء لازالة كمية معينة من الحرارة يكون تقريبا بقدر اربعة الاف ضعف بقدر معدل التدفق الحجمي للماء على افتراض ان الارتفاع في درجتي حرارتيهما متساوٍ. ولكن هناك من الإستعمالات مالا يمكن تبريد المكثف فيه الا بالهواء. وهناك أمر آخر وهو ان المكثفات المبردة بالهواء تعمل بدرجة حرارة مكثف اعلى من تلك المبردة بالماء والسبب طبعا هو درجة حرارة وسيط التبريد. ففي الوقت الذي تكون فيه درجة حرارة البصلة الجافة للهواء العامل المسيطر في المكثفات المبردة بالهواء تكون درجة حرارة البصلة الرطبة العامل الاساس في المكثفات المبردة بالماء. لان

الماء يكون اعتياديا مبردا في برج تبريد ويعاد تدويره. وتجري عملية تبريد الماء الى درجة تفوق البصلة الرطبة ببضع درجات في برج التبريد. ولكن هناك ميزات للمكثف المبرد بالهواء وهي انه لا توجد مشاكل الحصول على الماء ولا مشاكل تنظيف انابيب المكثف ولا مشاكل انجماد الماء في الاجواء الباردة، اضافة الى انه يعمل في جميع الاجواء. وتجدر الاشارة هنا الى ان ابراج التبريد تصبح غير ذات جدوى عند ارتفاع الرطوبة النسبية فتغدو غير قادرة على تبريد الماء وذلك بسبب قلة الفرق بين درجتي حرارة البصلة الجافة والرطبة. وهذا طبعا يؤدي الى توقف وحدة التثليج عن العمل. وتحصل مثل هذه الحالات كثيرا من الاحيان في منطقة الخليج العربي وجنوب العراق. على الرغم من أن مثل تلك الظروف تحسن عمل المكثف المبرد بالهواء لازدياد حرارة الهواء النوعية قليلا مع ازدياد الرطوبة.

يتألف المكثف المبرد بالهواء من ملف بانابيب نحاسية مزعنفة برقائق الالمنيوم لزيادة المساحة السطحية لانتقال الحرارة. ويجهز المكثف بمروحة او عدد من المراوح لسحب الهواء عبر الانابيب المزعنفة وتبريد بخار مائع التثليج داخل الانابيب وتكثيفه. ويبرد المكثف ذو القدرة الصغيرة جدا مثل الثلاجات المنزلية بالحمل الطبيعي بدون مروحة. ولكن جميع وحدات التثليج الاخرى ذات القدرات الاكبر ابتداء من المكيف الجداري والمجمدة المنزلية تكون مجهزة بمروحة لدفع الهواء. وقد كانت المكثفات المبردة بالهواء الى وقت غير بعيد تقتصر على وحدات بقدرة بحدود 20 طن تثليج او اقل ولكن هناك الآن وحدات بقدرات اكبر من 100 طن تثليج بمكثفات مبردة بالهواء وتشمل مثلجات الماء ذات الضاغط الطارد المركزي. ولكن للاسباب التي ذكرت آنفاً حول معدل التدفق الحجمي للهواء، فان مساحة المكثف المبرد بالهواء تكون اكبر بكثير جدا من المساحة التي يشغلها المكثف المبرد بالماء. ولابد من تقسيم المكثفات الكبيرة جدا الى اجزاء يبرد كل منها بمروحة او اكثر وتكون متصلة ببعضها كوحدة واحدة بواسطة انابيب رئيسة توزع بخار مائع التثليج عليها وتجمع السائل منها مرة اخرى.

5-2/3 المكثفات التبخيرية (Evaporative condensers)

يجمع المكثف التبخيري بين برج التبريد والمكثف في وحدة واحدة [5,ص32]. يستعمل هذا النوع من المكثفات الهواء الجوى والمياه معا فى تبريد وتكثيف بخار مائع التثليج الخارج من الضاغط لتحويله مرة أخرى إلى سائل واستقباله فى وعاء التسلم.

ان عمليات انتقال الحرارة الجارية في المكثف التبخيري هي :-

- تكثف بخار مائع التثليج داخل الملف.
- انتقال الحرارة بالتوصيل من داخل انابيب الملف الى سطحه والزعانف.
- انتقال الحرارة بالتوصيل والحمل من سطح الملف الى غشاء الماء المغطي للملف.
- انتقال حرارة محسوس وكامن من السطح المبلل الى تيار الهواء.

وقد تعمل المكثفات التبخيرية في اثناء فترات هبوط الحمل وبرودة الهواء بدون الحاجة الى رش الماء وانما تعمل كانها مبردة بالهواء فقط. ومن المعلوم أن برج التبريد يفضل على المكثف التبخيري عند قدرات اكبر

من بضع مئات اطنان تثليج اذ يكون اكثر اقتصاديا مع مكثف مبرد بالماء في حين يتنافس الاثنان عند القدرات الاصغر وربما يفضل المكثف التبخيري للقدرات التي لا تتجاوز بضع عشرات من اطنان التثليج.
ومن مميزات هذا النوع من المكثفات أنها تؤدى إلى خفض ضغط الطرد حيث تقترب درجة حرارة الطرد من درجة حرارة الهواء الرطب مما يؤدى إلى تحسين أداء منظومة التثليج وتحقيق فعالية تشغيل عالية.
ويراعى عند تصميم المكثف التبخيرى أن فعاليته تتأثر تأثراً مباشراً بدرجة حرارة البصلة الرطبة، فاذا ما تساوت هذه الدرجة مع درجة حرارة البصلة الجافة (حالة التشبع) ستنعدم فعاليته في التبريد. ولذا فان المكثفات التبخيرية تصلح للاستعمال فى المناطق الجافة نسبياً. ويتكاثف البخار فيها عند درجة حرارة تتراوح ما بين 10− 15 درجة مئوية أعلى من درجة حرارة البصلة الرطبة للهواء الخارجي.

وللحصول على أقل تكلفة تشغيل يجب مراعاة أن يكون الفرق فى درجات الحرارة بمقدار لا يقل عن 10 درجات مئوية، في حين أن بالإمكان للحصول على خفض فى التكلفة الاستثمارية عندما يكون هذا الفرق لا يقل عن 15 درجة مئوية. وتعتمد فعالية المكثفات التبخيرية كثيراً على نقاوة وجودة المياه المستعملة فى عملية التبريد. فكلما كانت المياه نظيفة وخالية من الأملاح المذابة التى تسبب عسرته، قلت كمية المواد التى تترسب على سطوح انابيب ملفات التبريد والتى تؤثر على فعالية المكثف، وأمكن تشغيل المكثف لفترات طويلة من دون الحاجة إلى اجراء صيانة لملفات التبريد لإزالة المواد المترسبة.

أما إذا كانت المياه المستعملة فى عملية التبريد غير نظيفة ومن النوع العسر، ففى هذه الحالة يصبح من الضرورى معالجتها قبل أن تدخل دورة التبريد بواسطة وحدات معالجة خاصة تقوم بتنقيتها وازالة عسرتها وذلك فى ضوء التحليل المختبري للمياه للتعرف على نوعية المواد المسببة لعسرتها. وبقدر الإمكان يجب مراعاة أن تكون الوحدات المعالجة للمياه من النوع الذى يعمل تلقائيا (أوتوماتيكيا) وليس يدوياً، مع وجود مواد مقاومة للصدأ تمنع ترسب أى مواد على سطوح انابيب ملفات التبريد.

3−5 المبخرات (Evaporators)

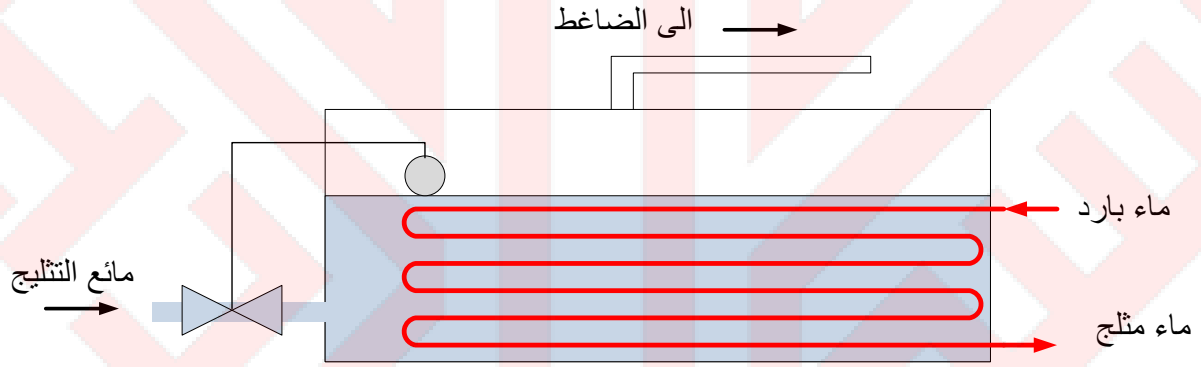
المبخر هو الجزء الرابع المتمم لدورة التثليج الانضغاطية. وهو مبادل حراري يأخذ الحرارة من المكان المثلج وينقله الى سائل التثليج الذي يتبخر بالغليان داخله. وتجري في المبخر العملية الاساسية لدورة التثليج، وهي ازالة الحرارة من مكان أو مادة معينة. وقد تكون المادة المثلجة الهواء أو الماء أو محلولاً ملحياً أو مادة صلبة. وفي جميع هذه الاحوال تنقل الحرارة من هذه المواد الى سائل التثليج الذي يغلي ويتبخر داخل المبخر ممتصا الحرارة الكامنة للتبخر من المادة المثلجة. ويصنع المبخر من الحديد كما في دورات تثليج الامونيا، ولكنه يصنع غالباً من النحاس والالمنيوم. ونظرا لتعدد وتشعب الاستعمالات فهناك اشكال لا حصر لها لانواع المبخرات يتلاءم كل منها مع نوع الاستعمال المطلوب [1,ص526].

5-3/1 مبردات السوائل (Liquid coolers)

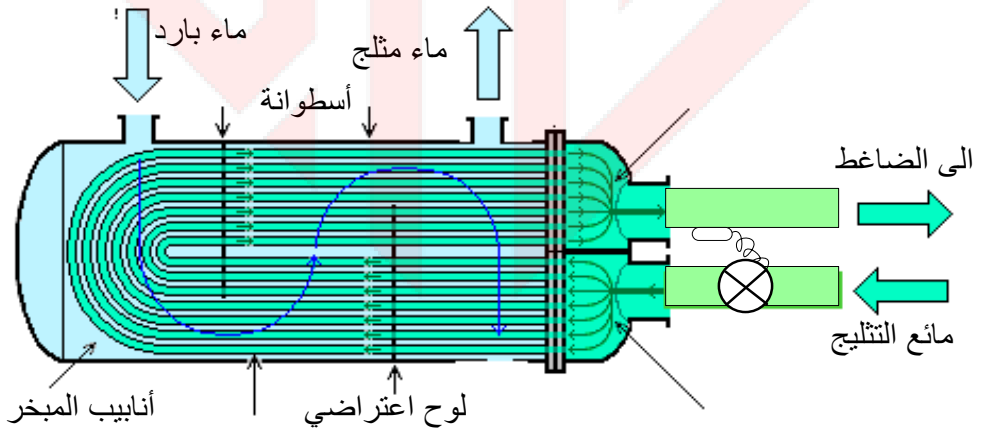
تستعمل فى تبريد المياه أو المحلول الملحى بواسطة ملفات تبريد يمرر داخلها مائع التثليج. وهذه السوائل تضخ بواسطة مضخات إلى نافخات هواء لتنجز عملها فى تكييف الهواء وبعض الأغراض الأخرى مثل عمليات تبريد وبسترة الألبان وتبريد أجزاء الآلات وغير ذلك.

5-3/1/1 الاسطوانة والانابيب (Shell and tubes)

ان غالبية مثلجات الماء من نوع الاسطوانة والانابيب، وهناك شكلان لهذا النوع اولهما ان يكون مائع التثليج في الاسطوانة والماء المثلج في الانابيب كما في الشكل (5-3/1-أ) للمبخر المطفح او قد يكون مائع التثليج في الانابيب والماء المثلج في الاسطوانة كما في الشكل (5-3/1-ب). ومعظم وحدات تثليج الماء الحديثة من النوع الثاني. ويتضح من الشكل ان النوع الاول يستعمل مع صمام تمدد بطوافة تحافظ على مستوى مائع التثليج فوق انابيب الماء مع ترك عدة سنتيمترات اسفل قمة الاسطوانة لكي ينعزل البخارعن السائل. وهذه ميزة المبخر المطفح وهي ان مائع التثليج يغمر سطح انتقال الحرارة كاملا، أما في الحالة الثانية فان مائع التثليج يغلي داخل الانابيب ويخرج من المبخر محمصا قليلا ولذا فانه يسمى احيانا بالنوع الجـــاف [1, ص528].



(أ)



(ب)

الشكل 5-3/1: مثلجات الماء.

5-3/1/2 الإسطوانة والملف (Shell and coil)

في هذا النوع من المبخرات، يستعاض عن الانابيب المستقيمة بملف حلزوني داخل الاسطوانة. ويكون مكان دخول وخروج الماء عادةً في نهاية واحدة من الاسطوانة. ولا يفضل هذا النوع في المناطق التي يكون الماء فيها حاويا على الكثير من الاملاح والمواد العالقة التي تترسب وتتكلس داخل الملف تدريجيا. ولا يمكن تنظيفه مثل تنظيف الانابيب المستقيمة في نوع الاسطوانة والانابيب. وطريقة التنظيف الوحيدة الممكنة هي بغسل الملف بتدوير مواد مزيلة للترسبات. ولكن هذه المواد لا تزيل التكلسات الشديدة. ففي الوقت الذي يمكن فيه ازالة مثل تلك التكلسات بفرش معدنية في الانابيب المستقيمة يستحيل ذلك مع الملف.

5-3/1/3 الأنابيب متحدة المركز (Concentric tubes)

يتكون المبخر متحد المركز من انبوبين احدهما داخل الاخر. ويجري ماء التبريد في الانبوب الداخلي في حين يتبخر سائل مائع التثليج في الفراغ الحلقي. ويكون معدل انتقال الحرارة في هذا النوع اوطأ ما هو عليه بسبب بطء تصريف سائل التثليج. وتعد مشكلة تنظيف هذا النوع من المبخرات مماثلة لما ذكر آنفاً عن المبخر ذي الاسطوانة والملف.

5-3/2 مبردات الهواء (Air coolers)

5-3/2/1 ملفات المائع المثلج (Refrigerated fluid coils)

وهى الجزء الذى يمر داخله مائع التثليج عند درجة الحرارة المناسبة لظروف الاستعمال. وتصنع عادة من انابيب صلب لا يصدأ أو صلب كاربوني لتستعمل مع مائع التثليج R- 717 (النشادر). كما تصنع غالبا من انابيب النحاس لتستعمل مع موائع التثليج الاخرى. وتصمم الملفات من مجموعة انابيب بأقطار وأطوال مناسبة للحصول على مساحة سطحية للتبريد اللازم لتحقيق درجة الحرارة المناسبة وحمل التبريد المطلوب، وتجهز انابيب هذه الملفات بزعانف خارجية (fins) لزيادة مساحة انتقال الحرارة فى حالة استعمالها لتبريد الهواء.

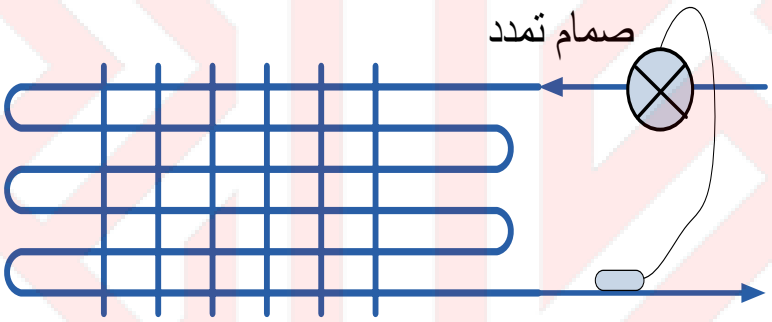
5-3/2/2 ملفات التمدد المباشر (Direct expansion-Dx- coils)

تستعمل ملفات التمدد المباشر(Dx-coil) لتبريد أو تثليج الهواء عموما أو اي غاز آخر عند الطلب. وتسمى بهذه التسمية لانها تبرد الهواء مباشرة وليس مثل مثلج الماء حيث يثلج الماء اولا ثم يقوم الماء بتبريد الهواء في ملفات اخرى لتبريد الهواء. ويوضع ملف التمدد المباشر داخل وحدة مجمعة لتبريد الهواء أو يوضع في مجرى هواء رئيس يوزع بعده الى مناطق عدة، أو انه يوضع مباشرة داخل المكان المثلج كما هو الحال في المخازن المبردة والمجمدة. ويبين الشكل (5-3/2) تخطيطيا ملف تمدد مباشر، حيث يتألف من انابيب نحاسية بعدة صفوف اعتياديا. وتكون الانابيب مزعنفة دائما بزعانف رقائقية صفيحية أو حلزونية. واذا كان الملف لتبريد الهواء، يفضل عدد الزعانف بحدود 5 لكل سنتمتر، أما اذا كان لتثليج مواد غذائية او غيرها ولدرجات حرارة دون الصفر المئوي، فيفضل ان تكون الزعانف بحدود واحد او اثنين لكل سنتمتر. وسبب ذلك هو لأجل استمرار عمل الملف واندفاع الهواء خلاله مع حصول تجميد قليل على الزعانف. أما اذا كان

عدد الزعانف كبيرا فسرعان ما يغلق الجليد المتجمد عليها المسافات ما بينها ولن يستطيع الهواء المرور فيتعطل عمل الملف.

عند استعمال ملفات التمدد المباشر لدرجات حرارة دون الصفر المئوي لا بد من أن تتوافر وسيلة لاذابة الثلج المتجمد على سطحها دوريا لضمان استمرار عملها بفعالية. وهناك طرائق عدة، منها استعمال المسخنات الكهربائية، ومنها امرار الغاز الساخن من الضاغط مباشرة الى الملف بواسطة انابيب فرعية، ومنها ان تعمل المروحة مع توقف الضاغط عن العمل. وتجهز هذه الوحدات اعتياديا بوعاء مسطح (صينية) لتجميع ماء الثلج الذائب واخراجه من المخزن المجمد. كما ان منظومة تصريف هذا الماء يجب ان تعالج بطريقة او اخرى لمنع تجمد الماء داخلها. اذ انه اذا تجمد فان الماء الجديد لن يمر وبالتالي يطفح الى داخل المخزن مسببا اشكالات اخرى.

قد تجهز وحدات ملف التمدد المباشر بمروحة واحدة او اثنتين او ثلاث او حتى اربع مراوح بحسب حجم المبخر. وقد تعمل جميعها او بعضها بحسب متطلبات المكان المثلج. وينطبق هذا الكلام على المبخرات في المخازن المثلجة والمجمدة والتي قد تكون التسمية (blast coils) خاصة بها. وتتراوح سرعة دفع او سحب الهواء على الملف بحدود 1.5 الى 3 امتار/ثا على وجه الملف. ولكن سرعة وجه الملف، المعتادة تقع بين 2 الى 2.5 متر/ثا. وبالطبع تستعمل صمامات التمدد الحراري حصرا مع ملفات التمدد المباشر التي يكون معظمها مجهزاً بموزع بعد الصمام مباشرة لتغذية انابيب الملف العديدة بالسائل بانابيب فرعية صغيرة قصيرة [1, ص528].



الشكل 5-2/3: ملف تمدد مباشر.

5-4 أدوات التمدد (Expansion tools)

تتلخص وظيفة ادوات التمدد بتقليل الضغط في منظومة التثليج من الضغط العالي في المكثف الى الضغط الواطئ في المبخر والمناظر لدرجة حرارة المبخر المطلوبة. وهناك خمسة انواع رئيسة من ادوات التمدد هي:-

5-4/1 الأنابيب الشعرية (Capillary tubes)

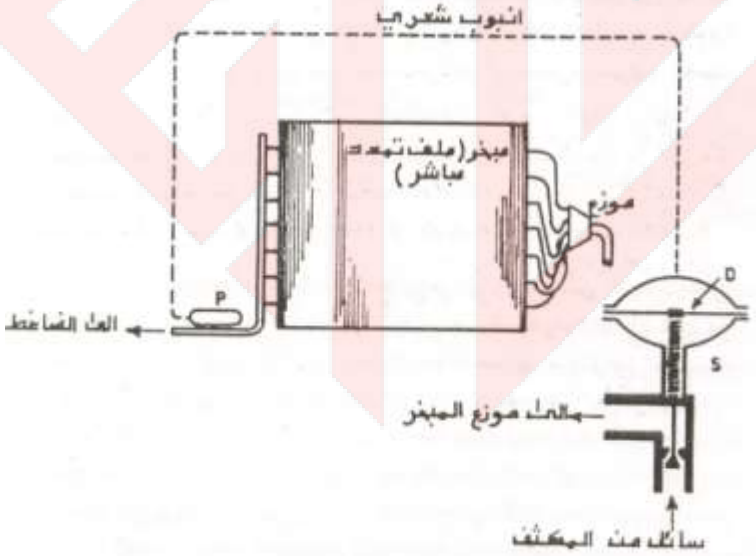
يستعمل الانبوب الشعري في وحدات التثليج صغيرة القدرة (ما دون 3 طن تثليج) في أجهزة مثل الثلاجات والمجمدات المنزلية ومكيفات الهواء الجدارية. والانبوب الشعري انبوب بطول اقل من متر الى حوالي ستة امتار وبقطر من 0.6 ملم الى حوالي 2.3 ملم. وتسمية الانبوب بأنه شعري فيها عدم دقة اذ لا

تنطبق عليه الخاصية الشعرية لكبر قطره الداخلي. وينخفض الضغط في الانبوب نتيجة الاحتكاك وتسارع السائل فيه بسبب قطره الصغير. وهناك خيارات عدة ما بين طول الانبوب وقطره للحصول على هبوط الضغط المطلوب. وتوجد طرائق عدة، نظرية وعملية، لاختيار طول وقطر الانبوب الشعري المناسب لوحدة تثليج معينة ولكن في النهاية يكون اختيار طوله بالتجربة المتكررة لحين الحصول على الضغط الواطئ المطلوب. ومن مميزات الانبوب الشعري انه لا يحتوي على اية أجزاء متحركة وسهل الاستعمال ورخيص الثمن. ولكن صفته غير الجيدة انه لا يتماشى مع تغيرات حمل الجهاز وهناك احتمال انسداده بالمواد العالقة. وعند اختيار الانبوب الشعري لظروف عمل معينة فان تغير تلك الظروف من حمل تثليج او ضغط تكثيف عن الظروف التصميمية يؤدي الى تقليل فعالية عمله بالرغم من انه يبقى عاملا.

2/4-5 صمام التمدد الحراري (Thermostatic expansion valve)

يعد صمام التمدد الحراري اكثر ادوات التمدد استعمالا خاصة مع منظومات الضاغط الترددي. وله ميزة ثابتة اضافة الى خفض الضغط وهي تنظيم معدل تدفق سائل التثليج الى المبخر بحيث يكون البخار الخارج من المبخر محمصا دائما. وهذا امر ضروري جدا خاصة مع الضاغط الترددي.

يعتمد هبوط الضغط عبر صمام التمدد على معدل تدفق مائع التثليج وحجم الصمام. ويجب اختيار صمامات التمدد بحيث تتناسب مع قدرة المبخر. وتعاير صمامات التمدد اعتياديا لدرجات حرارة تكثيف معينة ودرجة أو اكثر للتبخر. وقد يستعمل احيانا انبوب آخر مع صمام التمدد الحراري لموازنة الضغط بين مخرج المبخر والجانب السفلي من الرق D (diaphragm) (مدخل المبخر) يسمى انبوب الموازنة الخارجي (external equalizer) وكما موضح في الشكل (5-1/4) حيث P يمثل القارورة الحسية (البصيلة)، و S يمثل النابض. ويستعمل هذا الانبوب لضمان ان الجانب السفلي من الرق المعرض لضغط المبخر يتحسس بضغط مساوٍ للضغط في الانبوب الخارج من المبخر قرب القارورة.



الشكل 5-1/4: صمام تمدد حراري.

ويستعمل صمام التمدد الحراري مع جميع الاجهزة التي يكون هبوط الضغط في مبخرها ذا قيمة لايستهان بها مثل المبخر الذي يدخل اليه السائل عن طريق موزع وانابيب فرعية صغيرة مسببة هبوط الضغط [1, ص524].

5-4/3 صمام التمدد الألكتروني (Electronic expansion valve)

يعمل هذا الصمام عن طريق مجسين، أحدهما لدرجة الحرارة والآخر للضغط. وعن طريق جهاز الكتروني يمكن التحكم بدقة في درجة تحميص مائع التثليج عند مخرج المبخر، وبالتالي يتشابه عمله مع عمل صمام التمدد الحراري.

5-4/4 صمامات الصفيحة المثقوبة (Orifice plate valves)

تستعمل الصفيحة المثقوبة مع وحدات التثليج بالضاغط الطارد المركزي والضاغط الدوار حيث تكون معدلات تدفق مائع التثليج كبيرة جدا. وقد تستعمل صفيحة واحدة داخل أنبوب السائل الموصل بين المكثف والمبخر أو ربما مجموعة متتالية من الصفائح متقاربة من بعضها داخل طول قصير من الانبوب لبلوغ هبوط الضغط المطلوب. وبالطبع ليس للصفيحة المثقوبة قابلية السيطرة على معدل تدفق سائل التثليج وانما تتحقق السيطرة على معدل تدفق مائع التثليج في مثل هذه الوحدات بصفائح توجيه دخول بخار مائع التثليج الى الضاغط او بتغيير سرعة دوران دولاب الضاغط.

5-4/5 الصمام بطوافة (Float valve)

يستعمل الصمام بطوافة بصورة اساسية مع نوع من المبخرات يسمى المبخر المطفح (flooded evaporator). حيث يحتوي المبخر في هذه الحالة وهو غالبا على شكل اسطوانة وانابيب على سائل التثليج داخل الاسطوانة بمستوى معين. ويقوم الصمام بطوافة بالحفاظ على مستوى السائل ثابتا داخل المبخر. ويستعمل هذا النوع من الصمامات لموازنة المنظومة بسرعة عند تغير الاحمال وبدون خسائر تذكر. فعند ازدياد حمل التثليج مثلا يتبخر السائل من المبخر بصورة اسرع ويبدأ الضاغط بضخ معدل اكبر من البخار ويستجيب الصمام بفتح فوهته اكثر للسماح بتدفق سائل التثليج من المكثف بمعدل متناسب مع الظرف الجديد. وتستعمل المبخرات المطفحة والصمامات بطوافة في أجهزة التثليج ذات القدرة الكبيرة فقط.

5-5 ملحقات منظومات التثليج (Refrigeration system accessories)

5-5/1 صمامات التنفيس (Relief valves)

يستعمل هذا الصمام لغرض التأمين ضد ارتفاعات الضغط غير المرغوب فيها في منظومة التثليج لأي سبب من الأسباب. ويوضع اعتياديا في اعلى المكثف وينفتح عند ضغط اعلى من ضغط عمل المكثف اعتياديا.

5-5/2 فواصل زيت خط الدفع (Discharge line oil separators)

تمتص الهالوكاربونات بكميات كبيرة في أثناء مرورها على الزيت بالضاغط فى ظروف درجات الحرارة المرتفعة وعند مرور هذا الخليط داخل المبخرات ذات درجة الحرارة المنخفضة ينفصل الزيت عن مائع التثليج ويتراكم داخل المبخر شاغلاً حيزا كبيراً منه مما يؤدى الى خفض فعالية المبخر. لذلك يجب استعمال

فواصل الزيت فى دوائر الهالوكاربونات لفصل الزيت عن الهالوكاربونات وإرجاعه إلى مكانه الأصلى بالضاغط كما يجب أن تتوافر وسيلة مناسبة لتخليص المبخر من الزيوت التى لم تنفصل بالكامل فى فاصل الزيت وتتراكم داخله بمرور الوقت.

5-5/3 اوعية تجميع (تراكم) البخار(مجمعات البخار) (Accumulators)

تستعمل مجمعات البخار او اوعية التراكم كحماية للضواغط وذلك من خلال جمعها كميات قليلة من الزيت وسائل مائع التثليج قبل انبوب السحب للضاغط. وتعمل على خزن مائع التثليج والزيت اللذين لم يتبخرا في المبخر. يصطدم مائع التثليج والزيت عند دخولهما المجمع بلوح سائل يسبب استقرار السائل في خزان المجمع و مرور البخار الى الضاغط. اما سائل مائع التثليج المتراكم في هذا الوعاء فيتبخر تدريجيا واما الزيت فيعاد الى الضاغط بواسطة انبوب.

5-5/4 مستقبلات (مستلمات) السائل (Liquid receivers)

تطلق على مستقبلات (مستلمات) السائل أسماء أُخرى مثل: المجمِّع والمستلم. ويعتمد تقدير مقاس مستقبلات السائل على حجم السائل المطلوب احتباسه، والسرعة المسموح بها لبخار مائع التثليج. لذلك فان وعاء المستقبل يفترض ان يستوعب حجم تذبذب مستوى السائل في المبخرات وخطوط الارجاع الذي ينجم عن تغيير الأحمال وفترات إذابة الصقيع. وتجدر الإشارة إلى انه عند تحديد حجم الوعاء يجب أن يؤخذ بنظر الإعتبار كل من الانتفاخ (swelling) وتكوين الرغاوي اللذين يحدثان لشحنة السائل في مستقبلات السائل، كنتيجة مصاحبة لارتفاع درجة الحرارة أو إنخفاض الضغط. ويكون مستقبل السائل اعتياديا اسطوانة عمودية يدخلها سائل التثليج (مع البخار ان وجد) من الاعلى ويخرج سائل التثليج فقط من اسفل الاسطوانة الى اداة التمدد. ولابد من الاخذ بنظر الاعتبار أن يتوافر حجم كافٍ للسائل، وفراغ للبخار فوق مستوى الحد الأدنى للسائل.

5-5/5 فواصل السائل (Liquid separators)

يستعمل هذا النوع من الصمامات للتحكم في تدفق مائع التثليج في منظومة التثليج سواء في الجانب ذي الضغط العالي من الدورة أو الجانب ذي الضغط الواطئ منها كما هو في صمام التمدد. يكون اداء فواصل السائل على النحو التالي:

(أ) الجانب ذو الضغط العالي من الدورة

يتحكم الصمام في مستوى مائع التثليج في المكثف بحيث لا يزيد على مستوٍ معين، حيث يعمل هذا الصمام على حقن مائع التثليج مباشرة الى خارج المكثف في حالة ارتفاع مستواه عن هذا الحد.

(ب) الجانب ذو الضغط الواطئ من الدورة

يتحكم الصمام في مستوى مائع التثليج في المبخر بحيث لا يقل عن مستوٍ معين حيث يعمل هذا الصمام على حقن سائل مائع التثليج مباشرة الى المبخر في حالة انخفاض مستواه عن هذا الحد.

6/5-5 المرشحات والمجففات (Filters and dryers)

تحتوي منظومات التثليج اعتياديا على مجفف في دورة مائع التثليج لامتصاص الرطوبة منه. وقد تدخل الرطوبة (بخار الماء) في اثناء عملية شحن المنظومة لاول مرة او عند اجراء الصيانة وتعرض جزء من المنظومة الى الهواء المحيط الرطب. وتسبب الرطوبة، عند اختلاطها بزيت الضاغط، تحلل الزيت وتكوين جزيئات حامضية تكون سببا للتآكل وتلف عازل ملفات محرك الضاغط. اما المرشحات فتوضع اعتياديا في الدورة لمسك الملوثات والشوائب التي قد تتواجد أو تتكون في اثناء عمل المنظومة. وغالبا ما تجمع اداة واحدة اسطوانية الشكل وظيفتي الترشيح والتجفيف. وتحتوي جميع منظومات التثليج ذات ضواغط الازاحة الموجبة وموائع التثليج الهيدروكاربونية والكاربونية على هذه الادوات سواء كانت صغيرة أو كبيرة السعة. وتستبدل هذه المجففات والمرشحات عند اجراء عمليات استبدال المائع أو شحن المنظومة بعد فتحها لاغراض الصيانة.

مراجع الباب 5

[1] د .الجودي، خالد احمد، "***مبادئ هندسة تكييف الهواء والتثليج***"، جامعةالبصرة، الطبعةالثانية،1996 .

[2] "***هيئة الموسوعة العربية السورية***"، المجلد الثاني عشر، صفحة 370، 2011.

[3] "***العلوم الهندسية، محاضرات في تكنولوجيا تدريب الورش (1)***"، صفحة 2، 2008.

[4]"***الكود العربي للتكييف والتبريد***"، 2008.

[5] "***المبادئ الاساسية للكود المصري***"، 2009.

[6] ASHRAE ***,"2004 ASHRAE Handbook : Fundamentals (SI)",*** Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A.,2009.

[7] "***Scroll Compressor***", Carrier Corporation, New York, 2004.

[8] Elson, J., Hundy, G., and Monnier, K., "***Scroll Compressor Design and Application".***

[9] ***"Characteristics for Air Conditioning",*** Proceedings of the Institute of Refrigeration, 91.2.1-10, 1990.

الباب 6

حمل التثليج (Refrigeration Load)

6-1 حمل التثليج وحمل التبريد (Cooling and freezing load)

6-1/1 حمل التثليج (Refrigeration load)

يراد بحمل التثليج أنه الحمل الحرارى لمخازن التبريد والتجميد، أو تحديد السعة التبريدية المطلوب أن تحققها منظومة التثليج ليمكن بلوغ درجات الحرارة المناسبة لتخزين المنتج بمخازن التبريد أو التجميد. إن التقدير السليم لهذا الحمل الحرارى ذو أهمية أساسية، حيث أن تقديره بالنقص يؤدى إلى عدم تحقيق درجات الحرارة المطلوبة داخل المخزن المبرد، كما أن تقديره بالزيادة يؤدى إلى زيادة التكلفة الإستثمارية لأغلب الأجهزة بدون عائد مقابل.

تنقسم الأحمال الحرارية لمخزن التجميد إلى اربعة أقسام هي :

1. الأحمال الإنتقالية أو أحمال التوصيل الحرارية خلال الجدران والسقوف والأرضية لمخزن التبريد مع الأخذ في الإعتبار الحرارة بالإشعاع في بعض الحالات (transmission load Q_{Tr})
2. أحمال تسرب الهواء خلال الفتحات أو عند فتح أبواب مخزن التبريد (infiltration load Q_{in})
3. أحمال المنتج المُخَزَّن وتشمل أيضاً أحمال التغليف (product load Q_{Pr})
4. أحمال إضافية ومن أهمها الإضاءة والأشخاص والأجهزة (miscellaneous loads) [1].

6-1/2 حمل التبريد (Cooling load)

هو الحمل المطلوب لإزالة الكسب الحراري من حيز مكيف الهواء للمحافظة على درجة حرارة الحيز ورطوبته بحيث يدوم ظرفاً داخلياً ملائماً لمتطلبات الحيز. إن حمل التبريد لايساوي الحرارة المكتسبة لأن جزءاً من الحرارة المكتسبة يمتصها المبنى ومشتملاته ويختزنها ثم يعطيها للهواء في وقت لاحق.

ويمكن تقسيم مصادر الكسب الحراري إلى تلك الواردة من خارج الحيز المكيف وتسمى مصادر خارجية وتشمل:

- إنتقال الحرارة خلال الجدران الخارجية والسقوف.
- تأثير أشعة الشمس على الجدران الخارجية والنوافذ والسقوف.
- الحرارة المحمولة مع هواء التهوية والهواء المتسرب إلى غرف المبنى.

وتلك الناجمة عن داخل الحيز المكيف وتسمى المصادر الداخلية وتشمل:

- الحرارة الصادرة عن شاغلي المبنى.
- الحرارة الناتجة من الإضاءة.
- الحرارة الناتجة من الأجهزة الحرارية والكهربائية المتواجدة داخل المبنى.[2]

2-6 مكونات حمل التثليج (Components of cooling load)

1/2-6 الأحمال الإنتقالية (Transmission loads, Q_{Tr})

تنتقل الحرارة خلال السطوح المكونة لمخزن التبريد من الحيز الخارجي (الذي تكون درجة حرارته عالية) إلى مخزن التبريد. ويعتمد معدل إنتقال الحرارة على الآتي:

1. نوع الإنشاء.
2. الفرق في درجات الحرارة بين الحيز الخارجي ودرجة الحرارة داخل مخزن التبريد.
3. مساحة السطوح الخارجية بما في ذلك الأرضية.

ويمكن حسابه بالمعادلة الآتية:

$$Q_w = U \times A \times (T_o - T_i) \times (24 \times 3600/1000) \qquad (1/2-6)$$

أو

$$Q_w = U \times A \times (T_o - T_i) \times 86.4 \qquad (kJ / day) \qquad (2/2-6)$$

حيث أن:

Q_w : مجموع الحمل الحراري للجدران والسقوف والأرضية، (W)

U : معامل إنتقال الحرارة الكلي لكل جدار، ($W/m^2\ ^oC$)

A : مساحة السطح، (m^2)

T_o : درجة الحرارة الخارجية، (^oC)

T_i : درجة الحرارة الداخلية، (^oC)

ويحسب معامل إنتقال الحرارة الكلي U لكل من الجدران والسقف والأرضية بالمعادلة الآتية:

$$U = 1 / \{(1 / h_i) + (x_1 / k_1) + (x_2 / k_2) + ... + (1/h_o)\} \qquad (3/2-6)$$

حيث يرمز كل من x_1 و x_2 إلى سمك المكون الاول والثانى،...,, للجدار أو السقف أو الأرضية (m)، ويرمز كل من k_1 و k_2 إلى معامل التوصيل الحراري للمكون الأول والثانى، ...، ($W/m.^oC$) للحائط أو السقف أو الأرضية، وكذلك يرمز كل من h_i و h_o إلى معامل إنتقال الحرارة الغشائي بالحمل للهواء الداخلى والخارجى على التوالي ($W/m^2.^oC$).

وفي حالة تعرض سطح المخزن للهواء الساكن، تكون قيمة معامل إنتقال الحرارة الغشائي للهواء الملامس للجدار بالداخل أو بالخارج بمقدار $9.37\ W/m^2.^oC$. أما اذا كان السطح الخارجى معرضاً لرياح سرعتها حوالي 12 km/hr فإن قيمة h_i تكون $22.7\ W/m^2.^oC$ وإذا كانت سرعة الرياح الخارجية 24 km/hr شتاءً فإن قيمة h_i تكون $34.1\ W/m^2.^oC$ [1].

يبين الجدول (6-1/2) قيمة معامل إنتقال الحرارة التى يجب ألا تقل عنها الأصناف الشائعة من المواد العازلة المستعملة فى عزل جدران وسقوف وأرضيات المخازن المبردة والمجمدة.

الجدول 6-1/2: معامل التوصيل الحراري للمواد العازلة الشائعة والمستعملة فى عزل جدران وسقوف وأرضيات المخازن المبردة [2].

العازل	بولى يوريثين (متمدد)	بولى يوريثين (الواح)	بولي ستايرين (مبثوق)	بولي ستايرين (متمدد)	ألياف زجاج
معامل التوصيل الحراري (k) (W/m.°C)	0.023	0.026	0.035	0.037	0.044

كذلك يبين الجدول (6-2/2) الحد الأدنى، الذى يجب الالتزام به لسمك المادة العازلة من البولى ستايرين المتمدد منسوبا إلى درجات الحرارة الداخلية. ويمكن التوصل إلى الحد الأدنى لسمك الطبقة العازلة التي تختلف نوعيتها عن البولى ستايرين المتمدد عن طريق نسبة معامل إنتقال الحرارة لهذه المادة العازلة إلى معامل إنتقال الحرارة للمادة العازلة المذكورة فى الجدول (6-2/2) في السمك الأدنى المحدد في نفس الجدول.

الجدول 6-2/2: الحد الأدنى لسمك المادة العازلة (بولى ستايرين متمدد)[2].

درجة حرارة الحفظ (°C)	الحد الأدنى للسمك (mm)
8 إلى 10	50
0 إلى 4-	75
12- إلى 24-	100

يراعى عند حساب فرق درجات الحرارة ΔT المذكور بالمعادلة (6-1/2) للجدران الخارجية والسقوف التى تسقط عليها أشعة الشمس المباشرة، أن يضاف التصحيح اللازم لإدراج تأثير التعرض لأشعة الشمس المباشرة، وذلك من الجدول (6-3/2).

الجدول 6-3/2: درجة الحرارة (°C) التى تضاف إلى فرق درجات الحرارة للجدران الخارجية والسقوف المعرضة لأشعة شمس مباشرة في النصف الشمالي من الكرة الأرضية[2].

	إتجاه السطح	سطح مواجه للشرق	سطح مواجه للجنوب	سطح مواجه للغرب	سقف
لون السطح	سطح غامق اللون	5	3	5	11
	سطح متوسط اللون	4	3	4	9
	سطح فاتح اللون	3	2	3	5

وبتطبيق المعادلة (6−2/1) على كل من الجدران والسقف والأرضية فإن كمية الحرارة الداخلة إلى المخزن هى حاصل مجموع كميات الحرارة من الجدران الخارجية $Q_{Tr,we}$ والجدران الداخلية المجاورة لحيز غير مكيف $Q_{Tr,wi}$ والسقف $Q_{Tr,ce}$ والأرضية $Q_{Tr,fl}$ ويكون مجموعها Q_{Tr} هو:

$$Q_{Tr} = \Sigma\, Q_{Tr,we} + \Sigma\, Q_{Tr,wi} + Q_{Tr,ce} + Q_{Tr,fl} \qquad (6-2/4)$$

ويلاحظ انه عند تطبيق المعادلة الخاصة بأرضية مخزن التبريد، وإذا كان المخزن قائماً على أرضية مرصوصة أو على الأرض مباشرة، فإن فرق درجات الحرارة ΔT يحسب باعتبار درجة حرارة الارض t_{so} كما في الجدول (6−2/4):

الجدول 6−2/4: درجات حرارة الأرض تحت مخزن التبريد [1].

نوع الاستعمال	درجة حرارة الارض، t_{so} (^oC)
مخازن التجميد	10
مخازن التبريد	18

أما إذا كانت أرضية المخزن مرتفعة فوق حيز (يشغله الهواء) فتؤخذ درجة الحرارة لهذا الحيز على أنها درجة الحرارة عند حدوث الإتزان الحرارى على الأمد الطويل.

6−2/1/1 معاملات إنتقال الحرارة للمخازن المبردة والمجمدة

6−2/1/1/1 العوازل الرئيسة (Main insulations)

يُعرف العازل الحراري بأنه المادة أو تشكيلة المواد التي إذا إستعملت بطريقة مناسبة يمكن أن تمنع أو تقلل من إنتقال الحرارة بوسائل الانتقال الحراري المختلفة (التوصيل – الحمل – الإشعاع)، وذلك من خلال كل أو بعض الوظائف الآتية:

1. المحافظة على الطاقة بالإقلال من الفقدان أو الكسب الحراري.
2. التحكم في درجات حرارة السطح للحماية.

وعادة ما تقاس قدرة المادة على العزل الحراري بدلالة توصيلها الحراري فكلما قل التوصيل دَلَّ ذلك على زيادة مقاومة المادة للإنتقال الحراري. فالمقاومة الحرارية تتناسب عكسياً مع معامل التوصيل الحراري خلال المادة العازلة. وغالباً ما تكون المادة العازلة متكاملة مع الجدران والسقوف. ولمعرفة المقاومة الكلية للإنتقال الحراري لابد من جمع المقاومات المختلفة لطبقات الحائط أو السقف بما فيها مقاومة الطبقة الهوائية الملاصقة للسطوح الداخلية أو الخارجية، وجمع هذه المقاومات يشابه تماماً جمع المقاومات الكهربائية، فهي إما أن تكون على التوازي أو التوالي ويعتمد هذا على تركيبة المواد في الحائط أو في السقف.

وإضافة إلى ماذكر من خصائص حرارية فإن هناك خصائص أخرى كالحرارة النوعية والسعة الحرارية ومعامل التمدد والإنتشار والتي لابد من معرفتها لكل مادة عازلة. يوضح الجدول (6-5/2) معامل التوصيل الحراري لأنواع العوازل الحرارية المستعملة في مخازن التبريد.

الجدول 6-5/2: معامل التوصيل الحراري لعوازل مخازن التبريد[2].

المادة (Material)		معامل التوصيل الحراري (k) (W/m.°C)
طبقات الألياف الزجاجية أو المعدنية (Mineral or glass fiber blanket)		0.039
الزجاج السيليلوزي (Cellular glass)	الألواح أو الشرائح (Boards or Slabs)	0.058
لوح الفلين (Cork board)		0.043
الليف الزجاجي (Glass fiber)		0.036
بولي ستايرين (متمدد)- ناعم		0.029
بولي ستايرين (متمدد)- خلوي		0.036
الورق أو الخشب (Paper or wood pulp)	الحشو السائب (Loose Fill)	0.039
نشارة الخشب (Sawdust or shavings)		0.065
ألياف صناعية (Minerals wool (rock, glass, slag))		0.039
الألياف الخشبية (Wood fiber (soft))		0.043

يستعان بفكرة المقاومة الحرارية لإيجاد إنتقال الحرارة عبر الجدران المركبة التي تتألف إنشائياً من عدة مواد، وكلما إزدادت قيمة المقاومة الحرارية لجدران مخازن التبريد والتجميد ازدادت تكلفة المُنشأ وانخفضت تكلفة التشغيل. ويراعى عدم إستعمال عوازل ذات قيم للمقاومة الحرارية أقل من المذكورة في الجدول (6-6/2).

الجدول 6-6/2: قيم المقاومة الحرارية الموصى باستعمالها[2] .

نوع التشغيل	حدود درجة الحرارة (°C)	المقاومة الحرارية ($m^2.°C/W$)		
		الأرضية	الجدران / السقف المعلق	السطح
تبريد (cooler)	4 إلى 10	عزل المحيط فقط	4.4	5.3 إلى 6.2
تبريد قريب من الصفر (chill cooling)	4- إلى 2	3.5	4.2 إلى 5.6	6.2 إلى 7.0
مجمدة حفظ (holding freezer)	23- إلى 29-	4.8 إلى 5.6	6.2 إلى 7.0	7.9 إلى 8.8
مجمدات لافحة (blast freezer)	40- إلى 46-	5.3 إلى 7	7.9 إلى 8.8	0.6 إلى 8.8

يتضح من الجدول (6-7/2) أن معدل إنتقال الحرارة خلال الجدران يقل مع زيادة سمك العازل ولذا يقلل إستهلاك الطاقة المستهلكة بواسطة أجهزة التبريد وعليه يصبح من المحبذ إستعمال كمية أكبر من العزل مع مراعاة التكلفة المتزايدة للعوازل.

الجدول 6-7/2: معامل إنتقال الحرارة الكلي للعوازل ومكونات البناء المستعملة في مخازن التبريد[1].

نوع العازل	سمك العازل (mm)	معامل إنتقال الحرارة الكلى (U) ($W/m^2.^oC$)
ألواح فلين (Cork board)	100	0.428
	150	0.285
	200	0.217
البوليستايرين (Polystyrene)	25	1.368
	50	0.684
	75	0.457
	100	0.342
	150	0.228
	200	0.171
البولي يوريثين (Polyurethane)	50	0.456
	75	0.302
	100	0.228
	150	0.154
خرسانة (Concrete floor)	-	1.2
زجاج مفرد (Single glass)	-	6.4
زجاج مزدوج (Double glass)	-	2.6
زجاج ثلاث طبقات (Triple glass)	-	1.7

ومن أهم العوامل التي تؤثر على إختيار مواد العزل الحراري المناسبة هي:

1. أن تكون المادة العازلة ذات معامل توصيل حراري منخفض.
2. أن تكون المادة العازلة ذات مقاومة عالية لنفاذ الماء والإشعاع.
3. أن تكون المادة العازلة ذات مقاومة عالية لإمتصاص بخار الماء.
4. أن تكون المادة العازلة ذات مقاومة عالية للإجهادات الناتجة من الفروق الكبيرة في درجات الحرارة.

5. أن تكون المادة العازلة ذات مقاومة عالية ضد الإشتعال.

ويمكن تقسيم مواد العزل الحراري بحسب مصادرها إلى أربعة أقسام :

1. المواد العازلة من أصل حيواني: مثل الصوف وشعر الحيوانات، ويعتبر إستعمالها محدوداً.
2. المواد العازلة من أصل نباتي: وتشمل الألياف والمواد السيلولوزية مثل القصب والقطن.
3. المواد العازلة من أصل جمادي: كالصوف الزجاجي، وهو من أفضل مواد العزل الحراري.
4. المواد العازلة صناعياً: وتشمل المطاط والبلاستيك الرغوي، والأخير هو الأكثر شيوعاً، وأكثر ما يستعمل منها نوع البولي ستارين والبولي يوريثين الرغوي بأشكالهما المختلفة.

ويمكن تقسيم المواد العازلة إلى الأصناف الآتية كذلك:

1. مواد عازلة غير عضوية تتركب من ألياف أو خلايا كالزجاج والاسبستوس والصوف الصخري وسيلكات الكالسيوم والبيرلايت والفيرميكيولايت.
2. مواد عازلة عضوية ليفية مثل القطن وأصواف الحيوانات والقصب أو خلوية مثل الفلين والمطاط الرغوي أو البولي يوريثين أو البولي ستايرين.
3. مواد عازلة معدنية كرقائق الألمنيوم والقصدير العاكسة.

وتُصنع المواد العازلة بالأشكال الآتية:

1. مواد عازلة سائبة: وتكون عادة بصورة حبيبات أو مسحوق تصب عادة بين الجدران أو في أي فراغ مغلق كما يمكن أن تُخلط مع بعض المواد الأخرى وهي تُستعمل بصورة خاصة في ملء الفراغات غير المنتظمة.
2. مواد عازلة مرنة الشكل: وهي تختلف في درجة مرونتها وقابليتها للثني أو الضغط. وتوجد عادة على شكل قطع أو لفات وتُثبت عادة بمسامير ونحوها. وهي تشمل الصوف الزجاجي والصخري ورقائق الألمنيوم ونحوها.
3. مواد صلبة: وتوجد على شكل ألواح بأبعاد وأسماك محدودة كالبولي يوريثين والبولي ستايرين.
4. مواد عازلة سائلة تُصب أو تُرش في المكان المطلوب أو عليه لتكوين طبقة عازلة مثل البولي يوريثين الرغوي.

(أ) سيليكات الكالسيوم (Calcium silicate)

هي مادة عازلة من الحبيبات مكونة من الجير (lime) والرمل (silica) مقواة بألياف صناعية وغير صناعية تسبك بشكل متماسك. ويستعمل هذا العازل في المجال الحراري 30 ^{o} C إلى 650 ^{o} C. تمتص سيليكات الكالسيوم الماء وهي غير قابلة للإشتعال وتستعمل عادة في عزل مواسير المياه والسطوح الحارة.

(ب) الزجاج (Glass)

(1) النوع الليفي (Fibrous)

موجود في اشكال متعددة منها ألواح صلبة (rigid board) ولفائف (blankets) واشكال أخرى، يستعمل هذا النوع من العازل في المجال الحراري 30 ^{o}C- إلى 40 ^{o}C ، علماً أن هذا العازل لا يخترق وله قابلية جيدة في عزل الصوت.

(2) النوع السليلوزي (Cellular)

يتواجد في أشكال لوحية (board form) مع إمكانية تشكيله لعزل المواسير والأشكال الأخرى. يستعمل هذا النوع من العازل في المجال الحراري 260 ^{o}C− إلى 500 ^{o}C، وله قوة إنشائية كبيرة ومقاوم للحريق، وغير قابل لإمتصاص الماء ومقاوم لكثير من المواد الكيميائية.

(ت) الليف المعدني (الصخري واللوح الصوفي) ((Mineral fiber (rock and slag wool)

يدمج الصخر(و/أو) اللوح الصوفي مع بعضهما بواسطة رابط حراري لإنتاج الليف الصناعي. الحد الأعلى لدرجة الحرارة التي يتحملها قد يصل إلى 1040 ^{o}C . ومن مميزاته مقاومته للإشتعال مع تحكم عالٍ في شدة الضوضاء.

(ث) السيليكا المتمددة (Expanded silica or perlite)

هذا العازل عبارة عن مكونات صخرية بركانية رملية تخلط بالماء ثم تعامل حرارياً، وهو مقاوم للتمدد والتآكل والحريق ويستعمل عند مجال درجات الحرارة المتوسطة يتراوح بين 90 ^{o}C إلى 325 ^{o}C والعالية (أعلى من 325 ^{o}C). يوجد بأشكال معينة.

(ج) البلاستيك الرغوي (Foamed plastic)

هو العازل الذي ينتج من راتنج البلاستيك، وهو خفيف الوزن مع خصائصه الممتازة للقطع ولتسريب المياه. يوجد على شكل ألواح وأشكال أخرى. يستعمل هذا العازل للدرجات الدنيا ومجال إستعماله الحراري يتراوح بين 180 ^{o}C− إلى 150 ^{o}C.

(ح) الليف الحراري (Refractory fiber)

عازل الليف الحراري عبارة عن ألياف معدنية أو خزفية (mineral or ceramic fibers) تحتوي على أوكسيد الألمنيوم والرمل، وينتج على شكل طبقات أو أشكال صلبة. يمكن أن يستعمل حتى درجة حرارة 1650 ^{o}C وهو مقاوم للإشتعال.

(خ) البولي ستايرين المتمدد (Expanded Polystyrene, EPs)

هذا العازل خالٍ من مكونات الكلوروفلوركاربونات أو الهايدروفلوركاربونات (CFC or HCFC free). وهو يتكون من مكونات صلبة رغوية ويمكن تشكيله على أشكال عدة. وهو يوجد عادة في شكل كتل كبيرة الحجم ويمكن قطعها إلى شرائح ويكون خفيف الوزن (الكثافة $120\text{-}150\ kg/m^3$). وبعض الشركات تطلق عليه إسم الستايروفوم (Styrofoam). ومن خصائصه:

- يتوافق مع متطلبات درجات حرارة التبريد مع مقاومة الرطوبة
- يقاوم التلف
- لا يجذب الحشرات
- يقاوم التغيير في درجات الحرارة

(د) البولي يوريثين (Polyurethane)

- يعطي عزلاً جيداً صيفاً وشتاءً. إن 4 cm من عازل (Polyurethane) تعادل سمكاً من الخشب مقداره 15 cm .
- خفيف الوزن (الكثافة = $15\text{-}25\ kg/m^3$)
- يوجد بعدة أشكال
- سهل التركيب
- لا يمتص الرطوبة ولا يساعد على نمو الفطريات
- عند إحتراقه ينتج دخاناً ساماً

(ذ) العازل السمنتي (Insulating cement)

السمنت البورتلاندي يمكن إستعماله لدرجات الحرارة العالية، وكذلك عند درجات الحرارة الدنيا. وقد يستعمل السمنت مع العوازل الأخرى.[1]

6−2/2 حمل التسرب (Infiltration load, Q_{in})

عند فتح باب بين حيزين لهما درجتا حرارة مختلفتان، ينتقل الهواء من الغرفة الباردة خلال الجزء الأسفل للباب ويمر الهواء الساخن عبر الجزء العلوي للباب. وعملية تسرب الهواء هذه تكون نتيجة الفرق بين كثافة هواء الحيزين مما يتسبب في حدوث فرق في ضغط الهواء. يزداد معدل تسرب الهواء مع زيادة فرق الضغط بين الحيزين.

تحسب كمية الحرارة المنتقلة إلى داخل مخزن التبريد عن طريق تسرب الهواء من باب المخزن، Q_{in}، من المعادلة الآتية :

$$Q_{in} = Q_{ref}\ D_f\ D_t\ (1-E) \qquad (5/2-6)$$

حيث ترمز Q_{ref} لكمية الحرارة الإجمالية (المحسوسة والكامنة) المنتقلة من خلال الباب المفتوح بصورة مستمرة، وترمز D_f إلى رقم لا بعدى، وترمز D_t إلى زمن وجبة العمل بالساعة، وترمز E (%) إلى فعالية جهاز حماية الباب من تسرب الهواء (ان وجد)، وتحسب هذه الكميات باستعمال المعادلات الآتية:

$$Q_{ref} = 0.221\, A\, (h_i - h_r)\, \rho_r\, (1 - \rho_i/\rho_r)^{0.5}\, (gH)^{0.5}\, F_m \qquad (6/2-6)$$

$$F_m = (2/(1 + \rho_i/\rho_r)^{1/3})^{1.5} \qquad (7/2-6)$$

حيث ترمز A إلى مساحة فتحة الباب بالمتر المربع وترمز H إلى إرتفاع الباب بالمتر وترمز g إلى التعجيل الأرضي ($9.8\ m/s^2$) ، كذلك فان كلاً من ρ_i , ρ_r و h_i , h_r هما الكثافة (kg/m^3)، وكمية المحتوى الحراري (kJ/kg) للهواء المتسرب إلى مخزن التبريد والمعطى الرمز (i) وللهواء داخل مخزن التبريد والمعطى الرمز (r) على الترتيب. وبفرض أن باب مخزن التبريد يعمل لمدة وجبة عمل واحدة (أو أكثر) مدتها N ساعة، يفتح ويغلق الباب خلالها بطريقة شبه منتظمة.[2]

عند الاستعمال الدوري غير المنتظم والثابت للأبواب، يمكن حساب D_t من المعادلة الآتية:

$$D_t = \frac{(P\theta_p + 60\theta_o)}{3600\ \theta_d} \qquad (8/2-6)$$

حيث:

D_t = جزء عشري من الوقت الذي يكون فيه الباب مفتوحا

P = عدد المرات التي يفتح فيها الباب

θ_p = الوقت اللازم لفتح وغلق الباب، ثانية

θ_o = الوقت الذي يبقى فيه الباب مفتوحا، دقيقة

θ_d = وجبة العمل اليومية، ساعة

العامل D_f هو نسبة تبديل الهواء الفعلي إلى الهواء المتدفق الكلي خلال 24 ساعة، وهو يحدث فقط في الحالات غير الإعتيادية عندما يكون المدخل مفتوحا على غرفة لغرفة كبيرة أو مفتوحا للهواء الطلق. في ظل هذه الظروف، فإن مقدار D_f يكون 1.

ويلاحظ أن قيمة فعالية جهاز حماية الباب من تسرب الهواء E (ويستعمل على أبواب مخازن التبريد، وهو إما ستارة من شرائح البلاستك الشفاف أو ستارة هواء) قد تصل إلى90% أو أكثر فى بعض الحالات نظرياً، أما القيمة العملية لفعالية هذه الأجهزة فهى لا تتعدى أكثر من 25% فى أغلب الأحوال، حيث كثيراً ما ينقطع من ستائر حماية الأبواب شرائح كاملة. وكثيرا ما ترفع هذه الستائر (من قبل العاملين) على جوانب باب المخزن لتسهيل الحركة وزيادة مجال الرؤية لرافعات نقل البضائع. وعلى هذا فإن قيمة (1-E) فى المعادلة (5/2-6) يجب ألا تقل عن 0.75 وذلك لإعتبارات الأمان.

وحيث أن طريقة الحساب بإستعمال المعادلات المذكورة آنفاً مطولة، يمكن إستعمال طريقة معدل تغيير الهواء.

عندما يكون باب مخزن التبريد مفتوحاً فإن جزءاً من الهواء الساخن يدخل إلى غرفة التبريد. هذا الهواء يسبب زيادة في الكسب الحراري لذا يجب تبريده ليصل إلى درجة حرارة هواء مخزن التبريد. هذا الحمل يطلق عليه أحياناً حمل التخلل. ان عدد مرات تبديل الهواء باليوم ومقدار الحرارة التي يجب أن تزال من كل متر مكعب من هواء التخلل مبينة في جداول مبنية على الخبرة العملية (يلاحظ الجدولان (6-8/2) و(6-9/2)). في حالة استعمال الكثير فإن هواء التخلل يمكن أن يتضاعف أو أكثر من ذلك، كما مشار اليه في الجدولين[2].

يمكن حساب الحمل الحراري نتيجة تسرب الهواء من المعادلة الآتية:

$$Q_{inf} = \frac{10^6 \times V \times N \times \Delta h}{24 \times 3600} \quad \text{(W)} \qquad (6-9/2)$$

$$Q_{inf} = 1000 \times V \times \Delta h \quad \text{(kJ / 24hr)} \qquad (6-10/2)$$

حيث أن :

Q_{inf}: حمل التسرب، (kJ /day) أو (W)

V: حجم مخزن التبريد الداخلي، (m^3)

N: معدل تغيير الهواء لكل 24 ساعة، ويوجد باستعمال الجدولين (6-8/2) و(6-9/2)

Δh: المحتوى الحراري للهواء الداخل الى مخزن التبريد (kJ/L) = Δh ويوجد من الجدول (6-10/2)

الجدول 6-8/2: متوسط معدل تغيير الهواء في اليوم نتيجة لفتح الأبواب وتسرب الهواء لمخازن التبريد فوق درجة الصفر المئوي[2].

حجم مخزن التبريد (m^3)	معدل تغيير الهواء خلال 24 ساعة	حجم مخزن التبريد (m^3)	معدل تغيير الهواء خلال 24 ساعة
5.66	44.0	226.4	5.5
7.15	38.0	283	4.9
8.49	34.5	424.5	3.9
11.32	29.5	566	3.5
14.15	26.0	707.5	3.0
16.98	23.0	849.0	2.7
22.64	20.0	1132.0	2.3
28.3	17.5	1415.0	2.0
42.45	14.0	2122.5	1.6
56.6	12.0	2830.0	1.4
84.9	9.5	4245.0	1.2
113.2	3.2	5660.0	1.1
141.5	7.2	8490.0	1.0
159.8	6.5	14150	0.9

ملحوظة: في حالة الاستعمال المتكرر (frequent use) يجب ضرب القيم المذكورة آنفا في 2.

الجدول 6-9/2: متوسط معدل تغيير الهواء في اليوم نتيجة لفتح الأبواب وتسرب الهواء لمخازن التبريد تحت درجة الصفر المئوي[2].

حجم مخزن التبريد (m^3)	معدل تغيير الهواء خلال 24 ساعة	حجم مخزن التبريد (m^3)	معدل تغيير الهواء خلال 24 ساعة
5.66	33.5	226.4	4.3
7.15	29.0	283	3.8
8.49	26.2	424.5	3.0
11.32	22.5	566	2.6
14.15	20.0	707.5	2.3
16.98	18.0	849.0	2.1
22.64	15.3	1132.0	1.8
28.3	13.5	1415.0	1.6
42.45	11.0	2122.5	1.3
56.6	9.3	2830.0	1.1
84.9	7.4	4245.0	1.0
113.2	6.3	5660.0	0.9
141.5	5.6	8490.0	0.85
159.8	5.0	14150	0.8

ملحوظة: في حالة الاستعمال المتكرر (frequent use) يجب ضرب القيم المذكورة آنفا في 2.

الجدول 6−2/10: كميات الحرارة المفقودة نتيجة تسرب الهواء (kJ/L) [2].

درجة حرارة الغرفة (°C)	درجة حرارة الهواء الخارجي (°C)													
	5	5	10	10	25	25	25	30	30	30	35	35	40	40
	الرطوبة النسبية داخل المخزن (%)													
	70	80	70	80	50	60	70	50	60	70	50	60	50	60
15	-	-	-	-	0.0128	0.0186	0.0246	0.0281	0.0375	0.0441	0.0500	0.0563	0.0663	0.0795
10	-	-	-	-	0.0266	0.0323	0.0382	0.0319	0.0491	0.0574	0.0591	0.0694	0.0792	0.0992
5	-	-	-	-	0.0388	0.0445	0.0502	0.0536	0.0610	0.0693	0.0708	0.0810	0.0906	0.1036
0	--	-	-	-	0.0493	0.0550	0.0606	0.0639	0.0713	0.0794	0.0808	0.091	0.1003	0.1141
-5	0.0193	0.021	0.0235	0.0247	0.0592	0.0649	-	0.0736	0.0809	-	0.903	0.1004	-	-
-10	0.0271	0.0288	0.0309	0.0321	0.0662	0.0719	-	0.0805	0.0877	-	0. 97	0.1071	-	-
-15	0.035	0.0367	0.0383	0.0395	0.0732	0.0788	-	0.0873	0.0945	-	0.1037	0.1137	-	-
-20	0.0427	0.0444	0.0456	0.0468	0.0801	0.087	-	0.0941	0.1013	-	0.1102	0.1203	-	-
-25	0.0501	0.0523	0.0525	0.0537	0.0866	0.0922	-	0.0998	0.1077	-	0.1165	0.1265	-	-
-30	0.0571	0.0588	0.0591	0.0604	0.0929	0.0985	-	0.1067	0.1138	-	0.1225	0.1325	-	-
-35	0.064	0.0657	0.0656	0.0668	0.0989	0.1045	-	0.1126	0.1197	-	0.1283	0.1382	-	-
-40	0.0708	0.0725	0.072	0.0732	0105	0.1106	-	0.1185	0.1256	-	0.1341	0.1440	-	-

6−2/3 حمل المنتج (Product load, Q_{Pr})

تعتمد كمية الحرارة التي يضيفها المنتج لمخزن التبريد على العوامل الآتية:

1. زمن تبريد المنتج (pull-down time)
2. معدل إدخال المنتج
3. درجة حرارة دخول وخروج المنتج
4. نوع المنتج

6−2/3/1 زمن تبريد/تجميد المنتج (Pull-down time)

من المهم تحديد زمن تبريد/تجميد المنتج بصورة دقيقة للحصول على حسابات دقيقة وإختيار سليم والأجهزة. والعوامل الآتية ذات أهمية للتحديد الدقيق لزمن تبريد/تجميد المنتج عند إجراء الحسابات:−

أ- درجة حرارة وسرعة الهواء حول المنتج.

ب- طريقة تغليف المنتج.

ج - شكل وحجم المنتج.

أ- درجة حرارة وسرعة الهواء حول المنتج (Temperature and velocity of air around the product)

كلما إنخفضت درجة حرارة مخزن التبريد، أمكن تبريد المنتج في زمن قصير مما يزيد من تكلفة إستهلاك طاقة تبريد المنتج نتيجة للتشغيل عند درجات حرارة منخفضة وزيادة زمن إذابة الصقيع. لذا فان درجات حرارة التصميم يجب ألا تكون منخفضة أكثر من اللازم. وكلما زاد معدل دفع الهواء فوق المنتج، زادت سرعة طرد الحرارة من سطحه.

طريقة تغليف المنتج (Product packing)

إن زيادة حجم التغليف للمنتج تؤدي إلى زيادة زمن تبريد المنتج. فتغليف المنتج بصناديق الورق المقوى المثقب مثلا، يحتاج إلى زمن أقل لتبريده مقارنة بمنتج مغلف بالورق المقوى غير المثقب، وكذلك ترك فراغات بين صناديق التغليف للمنتج يساعد على تقليل زمن تبريد المنتج.

شكل وحجم المنتج (Shape and volume of product)

تزداد سرعة تبريد المنتج كلما زادت مساحة السطح المعرض لهواء التبريد، وكذلك تقل مدة تبريد المنتج كلما وضعت نفس الكمية في أطباق (trays) وبينها مسافات تقدر بحوالي 150 mm.

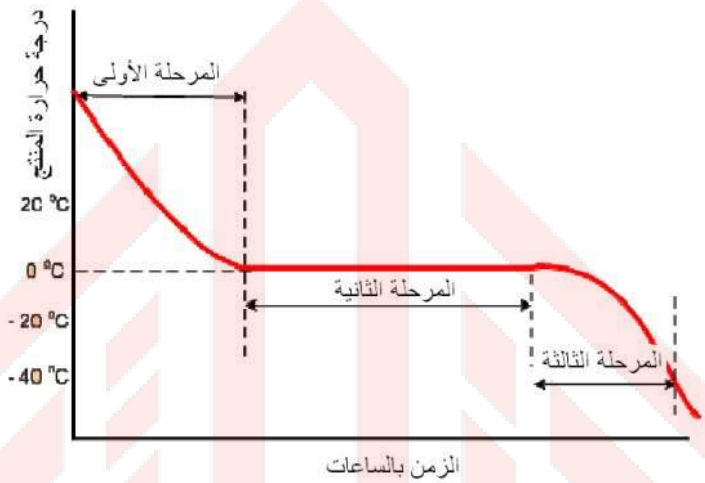
6-2/3/2 معدل إدخال المنتج والكتلة المكافئة (Rate of product entry and equivalent mass)

إن كمية المنتج التي تحمل وتدخل إلى مخزن التبريد مقسومة على عدد ساعات التحميل الفعلية تعطي معدل إدخال عدد كيلوغرامات المنتج المكافئة المحملة في الساعة. عليه فإن كمية الحرارة (المكافئة لهذه الكتلة) التي يضيفها المنتج إلى وحدة التبريد يمكن تحديدها بقسمة كيلوغرامات المنتج المحملة في الساعة على زمن التبريد للمنتج (pull-down).

6-2/3/3 درجة حرارة دخول وخروج المنتج (Entering & leaving temperatures)

درجات حرارة دخول وخروج المنتج تحدد أنواع الحمل الحراري لأطوار أو مراحل تبريد المنتج المختلفة داخل غرفة التبريد.

ويوضح الشكل (6-1/2) المراحل الثلاث التي يمر بها المنتج خلال هذه العملية. عندما تكون درجة حرارة التجمد 0 ^{o}C فالمرحلة الأولى هي إزالة الحرارة المحسوسة من 20 ^{o}C إلى 0 ^{o}C. والمرحلة الثانية هي إزالة الحرارة الكامنة للتجميد عند الصفر المئوي (درجة حرارة تجمد المادة الغذائية التي يمكن أن تكون أقل من الصفر المئوي). وفي المرحلة الثالثة تتحقق إزالة الحرارة المحسوسة لمنتج متجمد وهي ما يعرف بعملية التجميد العميق (deep freezing).



الشكل 6-1/2: المراحل الثلاث التي يمر بها المنتج خلال عملية التجميد.

6-2/3/3/1 المرحلة الأولى: تبريد المنتج فوق درجة حرارة التجمد

(First stage cooling of product above freezing point)

يجب أخذ فرق درجات الحرارة بين الدخول والخروج للمنتج فقط (ΔT) عند حساب حمل المنتج فوق درجة حرارة التجمد.

ويمكن حساب المنتج فوق درجة حرارة التجمد بالمعادلة الآتية:

$$Q_{above} = m_{equivalent} \times C_{p_{above}} \times \Delta T \times 24hr \quad \left(\frac{kJ}{day}\right) \qquad (6-2/11)$$

$$Q_{above} = \frac{m \times C_{p_{above}} \times \Delta T \times 1000}{3600 \times N} \quad (W) \qquad (6-2/12)$$

حيث أن :

Q_{above} : حمل تبريد المنتج فوق درجة حرارة التجمد، (kJ /day) أو (W)

$m_{equivalent}$: معدل تحميل المنتج في الساعة، (kg)

$C_{p_{above}}$: الحرارة النوعية للمنتج فوق درجة حرارة إنجماده، $\left({}^{kJ}/_{kg\ C}\right)$

6-2/3/3/2 المرحلة الثانية: الحرارة الكامنة للتجميد (Latent heat of freezing)

عندما يبرد المنتج إلى درجة التجمد، فإن الحرارة الكامنة للمنتج يجب طردها ليجمد المنتج. ويمكن حساب حمل المنتج في أثناء التجمد بالمعادلة الآتية:

$$Q_{freezing} = m_{equivalent} \times L \times 24hr \quad \left(\frac{kJ}{day}\right) \qquad (13/2-6)$$

أو

$$Q_{freezing} = \frac{m \times L \times 1000}{3600 \times N} \quad (W) \qquad (14/2-6)$$

حيث:

L : الحرارة الكامنة للمنتج، (kJ/kg K)

$Q_{freezing}$ حمل المنتج في أثناء التجمد، (W)

6-2/3/3/3 المرحلة الثالثة: تبريد المنتج المجمد (Cooling a frozen product)

يجب أخذ فرق درجات الحرارة بين درجة حرارة التجمد (أو درجة حرارة دخول المنتج إذا كانت درجة حرارة دخول المنتج أقل من درجة حرارة التجمد) ودرجة حرارة خروج المنتج.

ويمكن حساب حمل المنتج تحت درجة التجمد بالمعادلة الآتية:

$$Q_{below} = \frac{m \times C_{p_{below}} \times \Delta T \times 1000}{3600 \times N} \quad (W) \qquad (15/2-6)$$

أو

$$Q_{below} = m_{equivalent} \times C_{p_{below}} \times \Delta T \times 24hr \quad \left(\frac{kJ}{day}\right) \qquad (16/2-6)$$

حيث:

Q_{above} : حمل المنتج فوق درجة حرارة التجمد، (W)

$Q_{freezing}$: حمل المنتج في أثناء التجمد، (W)

Q_{below} : حمل المنتج تحت درجة حرارة التجمد، (W)

$m_{equivalent}$: معدل تحميل المنتج في الساعة، (Kg)

$C_{p_{above}}$: الحرارة النوعية للمنتج فوق درجة حرارة إنجماده، $\left({}^{kJ}/_{kg\ C}\right)$

$C_{p_{below}}$: الحرارة النوعية للمنتج تحت درجة حرارة إنجماده، $\left({}^{kJ}/_{kg\ C}\right)$

يمكن إستعمال الجداول (6-2/11) و(6-2/12) و(6-2/13) لإيجاد القيم المذكورة للمنتجات الغذائية المختلفة من خضراوات وفواكه ولحوم.

6-2/3/4 نوع المنتج (Product type)

هناك بعض المنتجات(من خضراوات وفواكه)، تستمر في أثناء إعطاء طاقة حرارية في أثناء الخزن نتيجة للنشاط الكيميائي لها بعد حصادها]. ويحسب الحمل الحراري لهذه المنتجات بناءً على الكمية القصوى للمنتج المُخَزن مضروبةً في حرارة التنفس (heat of respiration) عند درجة الحفظ في حالة دخول المنتج مبرداً.

أما في حالة وصول المنتج إلى مخزن التبريد في درجة حرارة أعلى من درجة حرارة التخزين (مثلاً من المزرعة مباشرة)، فيحسب حمل التنفس بضرب معدل تحميل المنتج لمخزن التبريد في متوسط حرارة التنفس بين درجة الحرارة العالية ودرجة حرارة التخزين.

يحسب حمل التنفس للمنتج بالمعادلات الآتية:

$$Q_{resp} = m \times q_{resp} \quad \left(\frac{kJ}{day}\right) \qquad (6-2/17)$$

أو

$$Q_{resp} = \frac{m \times q_{resp} \times 1000}{24 \times 3600} \quad (W) \qquad (6-2/18)$$

حيث:

Q_{resp} : حمل التنفس للمنتج، (W)

q_{resp} : حرارة التنفس في اليوم، (kJ/day)

m : السعة التخزينية لمخزن التبريد، (kg)

يمكن استعمال الجداول (6-2/11) و(6-2/12) و(6-2/13) لإيجاد Q_{resp} .

الجدول 6-11/2: متطلبات التخزين للخضراوات [1].

المنتج	درجة حرارة الحفظ (°C)	الرطوبة النسبية (%)	الحرارة النوعية (kJ/kgK)		الحرارة الكامنة (kJ/kgK)	درجة التجميد (°C)	زمن الحفظ	حرارة التنفس (kJ/kg/day)	
			فوق التجميد	تحت التجميد				حار	بارد
فاصوليا	7 - 10	95- 100	3.82	1.95	297	-0.7	7-10 أيام	33.35	8.98
جزر	0	95- 100	3.78	1.94	294	-1.4	4-6 أسابيع	16.97	3.97
قرنابيط	0	95- 100	3.92	1.99	307	-0.8	2-4 أسابيع	87.35	5.53
كرفس	0	95- 100	3.98	2.02	314	-0.5	شهر- شهران	14.69	1.73
ذرة حلوة	0	95- 100	3.31	1.76	247	-0.6	4-8 أيام	73.87	10.88
خيار	10	95- 100	4.05	2.04	320	-0.5	10-14 يوماً	12.36	7.43
باذنجان	7 - 10	90- 95	3.95	2	310	-0.8	7 أيام		
ثوم - جاف	0	65- 70	2.88	1.6	203	-0.8	6-7 أشهر	4.67	2.76
لهانة (ملفوف)	0	95	3.75	1.93	290	-0.5	3-4 أسابيع	14.69	3.46
كراث	0	95	3.68	1.9	284	-0.7	1-3 أشهر	29.98	4.23
خس	0	95- 100	4.02	2.03	317	-0.2	2-3 أسابيع	15.38	4.32
فطر	0	95	3.88	1.98	304	-0.9	3-4 أيام	81.13	11.23
بصل - جاف	0	65- 75	3.78	1.94	294	-0.8	1-8 أشهر	4.32	0.78
معدنوس	0	95-100	3.68	1.9	284	-1.1	شهر- شهران	65.4	11.84
بازلاء - جافة	10	70	1.24	0.99			6-8 أشهر		
فلفل - حلو	7 - 13	90- 95	3.92	1.99	307	-0.7	2-3 أسابيع	11.23	3.71
بطاطا	7	90- 95	3.45	1.81	260	-0.7		4.06	1.73
بطاطا - حلوة	13 - 16	85- 90	3.15	1.7	230	-1.3	4 - 6 أشهر		
شجر (قرع)	31	85- 95	3.88	1.98	304	-0.8	2-3 أشهر		
فجل	0	90-95	4.02	2.03	317	-0.7	3-4 أسابيع	12.61	1.56
سبانخ	0	90- 98	3.95	2	310	-0.3	اسبوع- اسبوعان	58.92	11.75
يقطين	0	95- 100	3.98	2.02	314	-0.5	1-3 أسابيع		
طماطم	7-5	90- 95	3.98	2.02	313	-0.5	3-7 أيام	9.94	1.38

الجدول 6-12/2: متطلبات التخزين للفواكه [1].

المنتج	درجة حرارة الحفظ (°C)	الرطوبة النسبية (%)	الحرارة النوعية (kJ/kgK)		الحرارة الكامنة (kJ/kgK)	درجة التجميد (°C)	زمن الحفظ	حرارة التنفس (kJ/kg/day)	
			فوق التجميد	تحت التجميد				حار	بارد
التفاح	1- الى 4	90-95	3.65	1.89	280	-1.1	3-8 أشهر	8.21	0.864
المشمش	0	90-95	3.68	1.9	284	-1.1	اسبوع- اسبوعان	8.29	2.25
الموز		85- 95	3.35	1.78	250	-0.8			
العنب البري	0	90-95	3.58	1.86	274	-1.6	اسبوعان		
الرقي	7 - 10	85-95	3.95	2	310	-1.1	4-6 أسابيع	6.39	1.9
جوز الهند	0 - 2	80-85	2.41	1.43	157	-0.9	شهر – شهران		
الكرز	0 - 1	95	3.51	1.84	267	-1.8	2-3 أسابيع	7.17	1.38
التّوت	2 - 4	90 -95	3.75	1.93	290	-0.9	2-4 أشهر		
الزبيب	0 الى0.5-	90-95	3.68	1.9	284	-1	10-14 يوما		
التمر	0 الى18-	75 أو أقل	1.5	1.09	67	-16	6-12 شهراً		
التين الجاف	0 الى 4	50-60	1.61	1.12	77		9-12 شهراً		
التين الطازج	0 الى1-	85-90	3.45	1.81	260	-2.4	7-10 أيام	24.36	3.37
العنب	0 الى1-	95-100	3.58	1.86	274	-2	3-6 أشهر	2.68	0.6
الليمون	15- 18	85-90	3.82	1.95	297	-1.4	1-6 أسابيع	5.79	4.06
الزيتون	7- 10	85-90	3.35	1.78	250	-1.4	4-6 أسابيع	12.53	10.02
البرتقال	5	85-90	3.75	1.93	290	-0.8	3-12 أسبوعاً	7.77	1.13
الكمثرى	0 الى 1.6-	90-95	3.61	1.88	277	-1.6	2-6 أشهر		
البطيخ	7 - 10	90-95	3.95	2	310	-0.8	2 أسبوعان		
الآناناس	20	85-90	3.68	1.9	284	-1	1-4 أسابيع	9.1	0.6
الخوخ	0 – 0.5-	90-95	3.72	1.92	287	-0.8	1-4 أسابيع	6.65	0.69
الرمان	0	90	3. 58	1.86	274	-3	2-4 أشهر		
لالنكي	0	90-95	53.7	1.93	290	-1.1	4-2 أسابيع		

الجدول 6−13/2: متطلبات التخزين للحوم والأسماك [1].

المنتج	درجة حرارة الحفظ (°C)	الرطوبة النسبية (%)	الحرارة النوعية (kJ/kgK)		الحرارة الكامنة (kJ/kgK)	درجة التجميد (°C)	زمن الحفظ
			فوق التجميد	تحت التجميد			
بقر طازج	1−0	92−88	3.4	1.8	257	-2.7	6-1 أسابيع
بقر كبدة	0	90	3.18	1.71	233	-1.7	6-1 أسابيع
عجل	1−0	90	3.05	1.66	220	-2.7	5 أيام
بقر مجمد	-18 − -23	95−90				-2.7	7-1 أسابيع
ضأن طازج	0	90- 85	3.2	1.7	233	-2.2	12-6 شهرا
ضأن مجمد	- − -23	95−90				-2.2	12-5 يوما
دواجن طازجة	-2 − 0	90 −85	3.31	1.76	247	-2.8	12-8 شهرا
دواجن مجمدة	-18−-23	95−90				-2.8	أسبوع واحد
أرانب	0−1	95−90	3.11	1.69	227	-2.8	12-8 شهرا
سمك طازج	1−-1	100 −95	3.55	1.85	270	-2.2	5 -1 أيام
سمك مجمد	-18−-29	95− 90				-2.2	14-5 يوما
المحارات الصدفية	0 - 1	95−90	3.51	1.84	267	-2.2	12-6 شهرا
الرّوبيان	-1 - 1	100−95	3.55	1.85	270	-2.2	12 يوما
الأسماك الصدفية	0 - 1	92−88	3.4	1.8	257	-2.7	14−12 يوما

6-2/4 أحمال إضافية (متنوعة) (Miscellaneous loads)

تشمل كمية الحرارة المنتقلة من المصادر المتنوعة والتي تشكل مصدراً إضافياً للحرارة المكتسبة داخل مخزن التبريد المكونات الآتية:-

أ- أحمال الأشخاص (مجموع كميات الحرارة المنتقلة من العاملين داخل المخزن التبريد).

ب- أحمال الإضاءة والمسخنات الكهربائية لإذابة الجليد.

ج- أحمال الأجهزة والمحركات الكهربائية.

د- أحمال أخرى (أى مصدر حرارى آخر يعمل داخل الحيز المبرد).

6-2/4/1 أحمال الأشخاص (People load)

الأشخاص الذين يعملون داخل مخازن التبريد يضيفون أحمالاً محسوسة وكامنة تعمل على زيادة الحمل الحراري داخل مخزن التبريد. وتعتمد كمية الحرارة المكتسبة للأشخاص على درجة حرارة مخزن التبريد وعدد الأشخاص ونوع العمل الذي يقوم به هؤلاء الأشخاص في أثناء وجودهم داخل مخزن التبريد وعدد ساعات وجودهم داخل مخزن التبريد ونوع الملابس التي يرتدونها. ويتوقف عدد العاملين على الطريقة المستعملة فى إدخال البضائع إلى الغرفة، سواء كانت يدوية أو باستعمال رافعات كهربائية، وعلى كمية البضائع المراد إدخالها إلى مخزن التبريد على مدار اليوم. وكافة هذه المتغيرات فرضية ولا يوجد تحديد دقيق لها، ولذلك تترك لتقديرات المصمم. يوضح الجدول (6-2/14) متوسط الأحمال الحرارية التي يضيفها الأشخاص في اليوم لمخزن التبريد عند درجات حرارة تخزين مختلفة.

الجدول 6-2/14: متوسط الأحمال الحرارية التي يضيفها الأشخاص في اليوم لمخزن التبريد[3].

درجة حرارة مخزن التبريد (^oC)	الحرارة المكافئة للشخص الواحد (W)
10	210
5	240
0	270
-5	300
-10	330
-15	360
-20	390

وتحسب كميه الحرارة المنتقلة من العاملين داخل المخزن المبرد Q_{pe} من المعادلة الآتية :

$$Q_{pe} = 1.25\,(10^{-3})\,(272 - 6\,t_i)\;\; N \times n \qquad (W) \qquad (6-2/19)$$

حيث ترمز t_i إلى درجة الحرارة داخل مخزن التبريد، وترمز N إلى عدد الساعات فى اليوم التى يتواجد خلالها العاملون بداخل المخزن التبريد، كما ترمز n إلى عدد العاملين المتواجدين داخل المخزن المبرد.

6-2/4/2 الحرارة المنتقلة من أجهزة الاضاءة (Lighting load)

تحسب كمية الحرارة المنتقلة من أجهزة الاضاءة Q_{lt} بالكيلوواط على أساس شدة الإضاءة المستعملة داخل المخزن المبرد، وتحسب من المعادلة الآتية:

$$Q_{lt} = P_l \ A_f \ N \qquad (W) \qquad (6-2/20)$$

حيث ترمز P_l إلى قدرة مصابيح الإضاءة (kW)، وفى حالة عدم معرفتها يجب أن تفرض قيمة للحرارة المنتقلة من أجهزة الاضاءة لا تقل عن 10 watt لوحدة المساحة من أرضية المخزن المبرد، وترمز A_f إلى مساحة سطح أرضية المخزن المبرد بالمتر المربع، وترمز N إلى عدد ساعات الاضاءة فى اليوم.

6-2/4/3 كمية الحرارة المنتقلة من المحركات الكهربائيـة (Motors load)

تحسب كمية الحرارة المنتقلة من المحركات الكهربائية Q_{mo} بالاستعانة بالجدولين (6-2/15) و(6-2/16).

الجدول 6-2/15: كمية الحرارة المنتقلة من المحركات الكهربائيـة [4].

قدرة المحرك الكهربائي (kW)	كمية الحرارة المفقودة (Watts/kW)
0 - 2	250
3 - 15	150
15 - 150	100
>150	80

- 1 kW = 1.34 hp
- 1 hp = 0.746 k W

الجدول 6-2/16: كمية الحرارة المنبعثة من المحركات الكهربائيـة [5].

قدرة المحرك الكهربائي (Hp)	فعالية المحرك الكهربائي	فقدان الحرارة إلى الهواء (Btu per hr per Rated Hp)					
		المحرك الكهربائي داخل المخزن (الأجهزة داخل المخزن)		المحرك الكهربائي داخل المخزن (الأجهزة خارج المخزن)		المحرك الكهربائي خارج المخزن (الأجهزة داخل المخزن)	
		(Btu/hr)	(Watts)	(Btu/hr)	(Watts)	(Btu/hr)	(Watts)
1/8 - 1/2	0.60	4250	1243	1700	497	2550	744
1/2 - 3	0.69	3650	1081	1100	337	2550	744
3 - 20	0.85	2950	863	400	117	2550	744

- 1 Btu/h = 0.293 W

إذا كان المحرك الكهربائي داخل المخزن فإن الحمل الحرارى يحسب بإستعمال المعادلة الآتية:

$$Q_{mo} = 2545 \times (Hp / Eff) \times F_{UM} \times F_{LM} \qquad (21/2-6)$$

حيث:

Hp : قدرة المحرك الكهربائي

Eff : المحرك الكهربائي

F_{UM} : معامل إستعمال المحرك الكهربائي عادة يساوي 1

F_{LM} : معامل تحميل المحرك الكهربائي عادة يساوي 1

أما إذا كان المحرك الكهربائي خارج المخزن فإن الحمل الحرارى يحسب بإستعمال المعادلة الآتية:

$$Q_{mo} = 2545 \times Hp \times F_{UM} \times F_{LM} \qquad (22/2-6)$$

ولذلك فان إجمإلى كمية الحرارة المنتقلة من المصادر المتنوعة Q_{Mi} هو:

$$Q_{Mi} = Q_{pe} + Q_{lt} + \Sigma Q_{mo} \qquad (23/2-6)$$

لذلك يكون مجموع المكونات الأربعة للحمل الحرارى Q_{ST} هو:

$$Q_{ST} = Q_{Tr} + Q_{Pr} + Q_{In} + Q_{Mi} \qquad (24/2-6)$$

حيث:

Q_{Mi} : الحمل الحراري من المصادر المتنوعة

Q_{Pr} : الحمل الحراري نتيجة من المنتج

Q_{Tr} : الحمل الحراري نتيجة الاحمال الانتقالية

Q_{In} : الحمل الحراري نتيجة تسرب الهواء

وهذا الحمل الإجمإلى يجب تعديله ليشمل الحرارة الناتجة من إذابة الثلج من مبردات الهواء(المبخرات)، وذلك بضربه بالمعامل F_d الذي تقدر قيمته كالآتي:

$F_d = 1.05$ لمخازن التبريد

$F_d = 1.10$ لمخازن التجميد

$F_d = 1.15$ لأنفاق التجميد

ويكون الحمل الحراري المصحح Q_T هو :

$$Q_T = F_d \; F_s \; Q_{ST} \qquad (25/2-6)$$

حيث ترمز F_s إلى معامل أمان مقداره 1.10.

وأخيراً يجب تعظيم القيمة النهائية للحمل الحرارى المصحح Q_T بمقدار $24/\tau_d$ حيث τ_d هى عدد ساعات تشغيل منظومة التثليج خلال اليوم، وتتراوح قيمتها بين 18 و20 ساعة، وذلك لتعويض الزمن اللازم لإجراء عمليات إذابة الثلج المتراكم على مبردات الهواء (حيث يكون الضاغط متوقفاً، أو مستعملاً فى إذابة

الثلج) ولاجراء عمليات الصيانة البسيطة إن لزم الأمر. ولذلك فان الحمل الحرارى لمخزن التبريد أو التجميد Q_{CL} هو:

$$Q_{CL} = Q_T \frac{24}{\tau_d} \qquad (26/2-6)$$

6-2/4/4 أحمال أُخرى (Other loads)

يمكن أن تكون هنالك أحمال حرارية أخرى في مخازن التبريد مثل مسخنات إذابة الجليد ومحركات مراوح المبخرات والرافعات الشوكية وغير ذلك، عندما تكون درجة حرارتها أكبر من درجة حرارة مخزن التبريد. ومع أن هذه الأحمال تعتبر أحمالاً صغيرة، فإنه في الاستعمالات ذات الأحمال الكبيرة، يفرض معامل للأمان (حوالي 10%) لتغطية تلك الأحمال [5,6].

6-3 حساب الأحمال (جداول العوازل الحرارية) (Load calculation / insulation materials tables)

يمكن الرجوع الى 6-2/1/1/1.

6-4 إختيار منظومة التثليج (Selection of refrigeration unit)

إن تصميم منظومة تثليج لأغراض خزن المنتجات يتطلب منهدسين ذوي خبرة علمية وعملية في مجال التكييف والتثليج لإختيار منظومة التثليج والأجهزة الملحقة بها. إن إختيار نوع مائع التثليج ووحدة التكثيف والمبخر وآلات السيطرة والملحقات الثانوية وأنابيب التوصيل يعتمد على مواصفات ومعايير عالمية وبيانات الشركات المصنعة للوحدات على وفق الحسابات الرياضية التي تم إجراؤها من قبل المهندسين. ويجب أن يؤخذ في الإعتبار عند تصميم منظومة التثليج التوصل لعلاقة توازن مناسب بين مجموعتي التبخير والتكثيف.

من المهم جداً الإلمام بأنواع منظومات التثليج بشكل تام لكي يتخذ القرار الصحيح لتحديد نوع الجهاز المطلوب إستعماله وفي أي مكان كان، لذلك يجب الإطلاع على كل أنواع منظومات التثليج لتقرير المطلوب بحسب ما يكون متوافراً من مصادر للماء وطاقة وغير ذلك.

وقبل التخطيط والتصميم لإختيار منظومة التثليج يجب معرفة مواصفات المشروع وهي :

1. نوعية المنتج (المواد الغذائية المبردة أو المجمدة).
2. معدلات التبريد والتجميد.
3. أنواع مستودعات التبريد.
4. مكان تنفيذ مستودعات التبريد.
5. مصادر الطاقة المتاحة.
6. التوسعات المستقبلية.

إن إختيار منظومة التثليج يجب أن يكتمل في مرحلة أولية من التخطيط لبناء المنظومة. فإذا كانت هذه المنظومة لغرض واحد (مخزن تثليج واطئ درجة الحرارة) فإن أغلب أنواع المنظومات يمكن إختيارها. وإذا كانت المنتجات المراد تخزينها تتطلب درجات حرارة ورطوبة متفاوتة، فإن المنظومة الواجب إختيارها يجب أن

تلائم معطيات المخزن المعزول حرارياً ولحدود مختلفة من درجات الحرارة [8,7]. وسيتطرق الى اختيار مكونات منظومة التثليج بالتفصيل في الفصل 7-7.

مراجع الباب 6

[1] ASHRAE, "***2010 ASHRAE Handbook : Refrigeration***", Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A.,2010.

[2] ASHRAE, "***2005 ASHRAE Handbook : Fundamentals (SI)***", Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A., 2005.

[3] Airah, K., " ***Air Conditioning and Refrigeration Industry Refrigerant Selection Guide***", 2003.

[4] "***Industrial Refrigeration Handbook***" ,Stoecker, W.F.,The McGraw-Hill Companies, 2004.

[5] Keenth J. Valentas, E. R. and Singh, R. P.,"***Handbook of Food Engineering Practice***" ,CRC Press, 1997.

[6] Association of Architectural Aluminum Manufacturers of South Africa, "***General Specification for the Design and Construction of Cold Store Envelopes Prefabricated Insulating Panels"***, Halfway House, 2006.

[7] Johnston, W.A., Nicholson, F.J., Roger. A and Stroud, G.D., "***Freezing and Refrigerated Storage in Fisheries"***, FAO 1994.

[8] Jones, J. P.," ***Refrigeration Systems for Cold Storage***," Design Manual 3.04 Revalidated By Change 1st August, 1986.

الباب 7

المخازن المبردة والمجمدة (Cooling and Freezing Warehouse)

7-1 حفظ المواد الغذائية (Preservation of foodstuffs)

يعرف حفظ الأغذية بأنه منع أو تعطيل تلفها بطريقة محددة. لذا يصبح ضرورياً معرفة الأسباب التي تؤدي لتلف المواد الغذائية حتى يمكن إختيار وتطوير طرائق حفظها. وتزداد أهمية حفظ المواد الغذائية مع إزدياد عدد سكان المدن وإزدياد إحتياجاتهم إلى كميات كبيرة من الأغذية التى تنتج فى مناطق بعيدة، إذ تحتاج بعض المنتجات مثل الخضراوات والفواكه الموسمية إلى تخزين وحفظ جيدين حتى تبقى سليمة طوال العام. والوسيلة الوحيدة التى يمكن بها حفظ الاغذية بحالتها الأولية، هي التبريد في مخازن التبريد نظراً للدور الذي تلعبه مخازن التبريد في الأمن الغذائي. ويمكن تقسيم الخزن إلى نوعين:

- الخزن المبرد: يقصد به الاحتفاظ بالاغذية مبردة فوق درجات تجمدها وهذا يعني عادة الخزن في بدرجات حرارة من $15\ ^oC$ إلى -2^oC ، وفي عموم المخازن المبردة تكون درجات حرارة التبريد بين $5\text{-}7^oC$.
- الخزن المجمد: ويقصد به الاحتفاظ بالأغذية في درجات حرارة تضمن بقاءها في حالة تجمد. وهذا يعني أن الخزن يكون عند درجات حرارة -2^oC إلى -18^oC وأوطأ من هذه القيم في بعض الأحيان.

وتنقسم المواد الغذائية في الخزن المبرد إلى فئتين:

- فئة المواد الغذائية الحية، ويقصد بها المواد التي تبقى محتفظة بالفعاليات الحيوية خلال الخزن والتوزيع والمثال عليها الفواكه والخضراوات. ولا تحتاج هذه المواد غير السيطرة على فاعلية الإنزيمات وإبطاء معدل النضج نتيجة خفض درجة الحرارة وهذا يحد من نمو الأحياء المجهرية المسببة للفساد.
- فئة المواد الغذائية غير الحية، ويقصد بها المواد التي تتوقف فيها العمليات الحيوية في أثناء الخزن والتوزيع والتي تكون أكثر عرضة للتلوث والفساد نتيجة عوامل التفسخ والتفكك الأنزيمي والعمليات الاستقلابية التي لايمكن السيطرة عليها. لذا فإن عملية تجميدها تحتاج إلى اهتمام أكثر وتشمل اللحوم والدواجن والأسماك.

إن فساد الأغذية القابلة للتلف يحدث بواسطة مجموعة من المتغيرات الكيميائية المعقدة تحصل في المواد الغذائية بعد الجني أو الذبح. ولهذه المتغيرات عوامل متعددة:

أ- عوامل داخلية:

بسبب الأنزيمات الطبيعية التي تكون موجودة في جميع المواد العضوية.

ب- عوامل خارجية:

بسبب الكائنات الحية الدقيقة (micro – organisms) التي تنمو في المواد الغذائية وعلى سطحها، وأهمها البكتيريا والخمائر والفطريات. وتشترك العوامل الخارجية والداخلية عادة لتسبب فساد المنتج [1].

7-1/1 الطرائق الحديثة لحفظ الأغذية (التجفيف والتعليب والتبريد والتجميد)

(New methods in food preservations, drying, canning cooling and freezing)

لقد طور الإنسان منذ القدم طرائق مختلفة لحفظ الأغذية (مثل التجفيف والتمليح والتدخين). وهذه الطرائق على الرغم من بدائيتها ما زالت تستعمل حتى اليوم. ومن محاذيرها أنها تحدث تغيراً في المظهر والطعم والرائحة بالإضافة إلى أن الأغذية المحفوظة بهذه الطريقة محدودة العمر. لذلك كان لابد من التفكير في طرائق أخرى لحفظ المواد الغذائية في حالة جيدة ولفترة طويلة. ومن هذه الطرائق : التجفيف والتعليب والتبريد والتجميد.

7-1/1/1 التجفيف الطبيعي (Drying)

إن وقف تلف المواد الغذائية يتحقق بمنع الأنزيمات والأحياء الدقيقة من التكاثر وذلك عن طريق التخلص من الماء الموجود داخل المادة الغذائية مما يساعد في حفظ المادة الغذائية لفترات طويلة وهو ما يعرف بالتجفيف.

لقد تطورت صناعة التجفيف في العقود الأخيرة بحيث تم دمج التجميد والتجفيف معاً (Freeze-Drying) وهي طريقة ناجحة لفصل المادة السائلة (الماء) وهي في حالة التجمد. وتتحقق بواسطة عملية التسامي تحت ضغط خوائي (vacuum). إذ يكتمل التجميد بطريقة سريعة بحيث لايكون هناك وجود لسائل. أما عملية التجفيف فتنجز في غرفة مفرغة بإضافة حرارة التسامي حيث يتحول السائل المجمد من صلب الى بخار ويسحب بواسطة مضخة تفريغ.

7-1/1/2 التعليب (Canning)

يُعَرَّف التعليب بأنه وضع الغذاء في علب معدنية أو بلاستيكية أو في زجاجات تغلق بإحكام، ثم تعامل بالحرارة لمدة زمنية محددة للحد من نشاط الأنزيمات والأحياء الدقيقة أو قتلها والتي قد تسبب التلف وفساد المواد الغذائية. ومن الواضح أن هذه الطريقة تعتمد على قتل الأحياء الدقيقة في المرحلة الأولى، ومن ثم ضمان عدم إعادة تلوث الغذاء مرة أخرى عن طريق حفظه في أوعية معقمة ومحكمة السد. ويعتبر التعليب من أهم الطرائق وأوسعها إنتشاراً في جميع أنحاء العالم. غير أن الكثير من المواد الغذائية لايمكن حفظها معلبة نظراً لتعدد طرائق إستهلاكها فيما بعد وبسبب أحجامها. وتتميز الأغذية المعلبة بأنها سهلة التناول والنقل والتخزين إلا أن الوسيلة الوحيدة التي يمكن بها حفظ الأغذية بحالتها الأصلية الطازجة هي التبريد. وهذه الطريقة تتطلب تجهيزات غالية الكلفة ونفقات كبيرة نظراً إلى أن عملية التبريد ينبغي أن تبقى مستمرة من بدء التخزين حتى الاستهلاك [2].

7-1/1/3 التبريد والتجميد (Cooling and refrigeration)

يعتمد حفظ المواد القابلة للتلف بواسطة التبريد على مبدأ إستعمال درجات الحرارة المنخفضة كوسيلة لتأخير ومنع نشاط ونمو الكائنات الحية وليس قتلها، وكذلك إيقاف التفاعلات الأنزيمية التي تغير من خواص الغذاء وقيمته الغذائية. ويتوقف إختيار درجة الحرارة اللازمة للحفظ المناسب على نوع المنتج المخزن ومدة التخزين. وتصنف المنتجات الغذائية ضمن مجموعتين:

- تلك التي تكون حية عند التخزين والتوزيع (مثل الخضراوات والفواكه...)
- تلك التي لا تكون حية مثل اللحوم والطيور والأسماك.

تستعمل الثلاجة المنزلية في هذه الطريقة لحفظ المواد الغذائية لمدة قصيرة، وعند درجات حرارة تقارب 4^oC. وكذلك تستعمل المجمدة المنزلية والتجارية التي تصل درجة تجميدها الى-18^oC في حفظ الأغذية لعدة شهور. لقد تطورت صناعة تبريد وتجميد الأغذية بشكل كبير في السنوات الأخيرة على نطاق تجاري واسع المدى عن طريق تجميد بعض المواد الغذائية بإستعمال النيتروجين السائل الذي تصل درجة حرارته إلى -186^oC وبهذه الطريقة يمكن تجميد بعض المواد الغذائية بسرعة كبيرة مع ضمان إحتفاظها بقوامها الأصلي وبدون أي تغيير يذكر في قيمتها الغذائية.

7-2 أنماط الخزن المبرد والمجمد (Styles of cooling and refrigeration stores)

يمكن تجميد المواد الغذائية بإحدى الطريقتين:

- الخزن المبرد والمجمد قصير الأجل
- الخزن المبرد والمجمد طويل الأجل

7-2/1 الخزن المبرد والمجمد قصير الأجل (Short-term cold storage)

يبرد المنتج الغذائي في هذه الحالة ويُحفظ عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة تجمده، ويقترن الخزن البارد قصير الأجل بمؤسسات البيع بالمفرد، حيث أن حركة بيع المنتج تكون سريعة نسبياً مما يساعد المنتج على الاحتفاظ بنوعيته وقيمته الغذائية عند الاستهلاك. تتراوح مدة تخزين المنتج في حالة التخزين قصير الأجل بين يوم واحد ويومين وقد تصل إلى أسبوع إعتماداً على المنتج ولكنها لا تتعدى خمسة عشر يوماً بأي حال.

7-2/2 الخزن المبرد والمجمد طويل الأجل (Long-term cold storage)

يبرد المنتج الغذائي ويحفظ عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة تجمده ويقترن هذا النوع من التخزين بالنشاط التجاري الذي تمارسه مؤسسات تجارة الجملة. تتراوح مدة التخزين بين 7-10 أيام للمواد الغذائية الحساسة مثل الطماطم و6-8 شهور للمواد الغذائية التي لها القدرة على البقاء سليمة تحت ظروف التخزين المعينة مثل اللحوم.

يفضل إختيار درجة حرارة أوطأ من -20^oC للخزن المجمد طويل الأجل. وينبغي المحافظة على درجات الحرارة هذه طيلة فترة الخزن مع تغير لا يزيد عن 0.5^oC إلى 1^oC. وقد يسبب تغير درجة الحرارة للمنتجات المجمدة ذوباناً بإعادة تجميدها ستحصل زيادة حجم البلورات الجليدية في المنتج التي تتلف خلايا المنتج. وتحفظ المنتجات المجمدة في حيز لا تقل الرطوبة فيه عن 85% لاسيما عند التخزين الطويل [3].

7-3 خصائص الخزن (ظروف التخزين) (Storage properties /storage condition)

إن ظروف الخزن المثلى لأي منتج غذائي تعتمد على نوعية المنتج ومدة التخزين، ويمكن القول عموماً بأن هناك مرونة في ظروف التخزين قصير الأجل أكثر من الظروف اللازمة للتخزين طويل الأجل.

وتوضح الجداول (7-1/3) و(7-2/3) و(7-3/3) ظروف التخزين قصير وطويل الأجل لبعض المواد الغذائية المختارة من خضراوات وفواكه ولحوم. يجب التنويه إلى أن ظروف التخزين المذكورة في تلك الجداول هي جهد لتجارب وعصارة لخبرة طويلة بحسب المرجع [4] ويجب الأخذ بها بصورة دقيقة عند أي تطبيق. وتعتبر درجة الحرارة والرطوبة النسبية من أهم ظروف التخزين الواجب توافرها للمواد غير المغلفة.

7-1/3 درجة حرارة الخزن (Storage temperatures)

يتضح من جداول ظروف التخزين المشار إليها آنفاً أن درجة الحرارة المثلى لتخزين معظم المنتجات الحية تكون أعلى بقدر بسيط من درجة حرارة تجمد تلك المنتجات. وتتأثر نوعية المنتج ومدة تخزينه إذا تم تخزينه عند درجة حرارة تختلف عن تلك الموصى بها، حيث تتعرض بعض أنواع الخضراوات والفواكه إلى ما يسمى بأمراض التخزين البارد فتصاب الحمضيات مثلاً بتآكل القشرة (rind pitting) إذا خُزنت عند درجات حرارة أعلى من درجة الحرارة المطلوبة، في حين تُصاب بتسمر القشرة (browning) إذا خُزنت عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة تخزينها.

7-2/3 الرطوبة النسبية وحركة الهواء (Relative humidity and air movement)

إن خزن المواد القابلة للتلف في حالتها الطبيعية (غير معبأة) يتطلب تحكماً وثيقاً ليس فقط في درجة حرارة المخزن ولكن أيضاً في رطوبة المخزن وحركة الهواء داخل المخزن. إن واحداً من الأسباب الرئيسة لفساد اللحم هي فقدان النداوة من سطح المنتج بواسطة التبخر إلى الهواء المحيط وتعرف العملية بأنها تجفيف أو إزالة النداوة. إذ يسبب التجفيف تغيراً في لون اللحوم وانكماشاً وتغيراً شديداً في هيأتها كما يزيد معدل تأكسدها.

والظروف المثالية لمنع إزالة الماء من المنتج المخزون هي توافر رطوبة نسبية مقدارها 100% وهواء راكد (ساكن)، إلا أنه قد تسبب هذه الظروف نمواً للبكتيريا، لذا يجب أن نحتفظ برطوبة قريبة من 100% أو أقل بقليل، كما يجب أن تكون سرعة الهواء كافية لتتيح حركة هواء مناسبة [5].

الجدول 7-1/3: ظروف التخزين للخضراوات [1].

نوع الخضروات	درجة حرارة الحفظ (^oC)	الرطوبة النسبية (%)	درجة التجميد (^oC)	زمن الحفظ
فاصوليا	7-10	95-100	-0.7	10 أيام
جزر	0	98-100	-1.4	4-16 أسبوعا
قرنابيط	0	95-100	-0.8	2-4 أسابيع
كرفس	0	95-100	-0.5	شهر - شهران
ذرة حلوة	0	95-100	-0.6	4-8 أيام
خيار	1	95-100	-0.5	10-14 يوماً
باذنجان	7-10	90-95	-0.8	7 أيام
ثوم - جاف	0	65-70	-0.8	6-7 أشهر
لهانة (ملفوف)	0	95	-0.5	3-4 أسابيع
كراث	0	95	-0.7	1-3 أشهر
خس	0	95-100	-0.2	2-3 أسابيع
فطر	0	95	-0.9	3-4 أيام
بصل - جاف	0	65-70	-0.8	1-8 أشهر
معدنوس	0	95-100	-1.1	شهر - شهران
بازلاء - جافة	10	70		6-8 أشهر
فلفل - حلو	7 -13	90-95	-0.7	2-3 أسابيع
بطاطا	7	90-95	-0.7	3-4 أسابيع
بطاطا - حلوة	13-16	85-90	-1.3	4-6 أشهر
شجر (قرع)	13	85-90	-0.8	2-3 أشهر
فجل	0	90-95	-0.7	3-4 أسابيع
سبانخ	0	90-98	-0.3	اسبوع- اسبوعان
يقطين	0	95-100	-0.5	1-3 أسابيع
طماطم	5-7	95-90	-0.5	3-7 أيام

الجدول 7–2/3: ظروف التخزين للفواكه [1].

نوع الفاكهة	درجة حرارة الحفظ (^oC)	الرطوبة النسبية (%)	درجة التجميد (^oC)	زمن الحفظ
التفاح	1-4	95–90	-1.1	8-3 أشهر
المشمش	0	95–90	-1.1	أسبوعان
الموز	0	85–95	-0.8	–
العنب	0	95–0	-1	أسبوعان
الرقي	0–7	95–85	-1	6-4 أسابيع
جوز الهند	2–0	85–80	-0.9	شهر–شهران
الكرز	0–-1	95	1.8	3-2 أسابيع
التّوت	4–2	95–90	-0.9	4-2 أشهر
الزبيب	0–-0.5	95–90	-1	14-10 يوماً
التمر	0–-18	أقل من75	-16	12-6 شهراً
التين	4–0	60–50		12-9 شهراً
التين	0–-1	90–85	-2.4	10-7 يوماً
العنب	0–-1	100–95	-2	6-3 أشهر
الليمون	10–9	90–85	-1	6-1 أسابيع
الزيتون	10–7	90–85	-1.4	6-4 أسابيع
البرتقال	5	90–85	-0.8	12-3 أسبوعاً
الكمثرى	0–-1.6	95–90	-1.6	6-2 أشهر
البطيخ	0–7	95–90	-0.8	12 أسبوعاً
الأناناس	7	90–85	-1	4-1 أسابيع
الخوخ	0–-0.5	95–90	-0.8	4-1 أسابيع
الرمان	0	90	-3	4-2 أشهر
الفراولة	0	100–90	-0.8	7–5 أيام
لالنكي	0	95–90	-1.1	4-2 أسابيع

الجدول 7–3/3: ظروف التخزين للحوم والأسماك [1].

نوع الفاكهة	درجة حرارة الحفظ (^oC)	الرطوبة النسبية (%)	درجة التجميد (^oC)	زمن الحفظ
بقر– طازج	1–0	92 –88	-2.7	6-1 أسابيع
بقر – كبدة	0	90	-1.7	5 أيام
عجل	1–0	90	-2.7	7-1 أسابيع
بقر – مجمد	-23–-18	95 –90	-2.7	12-6 شهراُ
ضأن – طازج	0	90 - 85	-2.2	12-5 يوماُ
ضأن – مجمد	-23–-18	95– 90	-2.2	12-8 شهراُ
دواجن – طازجة	0–-2	90 – 85	-2.8	أسبوع
دواجن – مجمدة	-23–-18	95– 90	-2.8	12-8 شهراُ
أرانب	1–0	95– 90	-2.8	1- 5 أيام
سمك – طازج	1–-1	100– 95	-2.2	14-5 يوما
سمك – مجمد	-29–-18	95 – 90	-2.2	12–6 شهراً
المحارات الصدفية	1–0	95 –90	-2.2	12 يوماُ
الروبيان	1–-1	100–95	-2.2	14–12 يوماً
الأسماك الصدفية	-29–-18	92–88	-2.2	8–3 أشهر

7-4 متطلبات تخزين خاصة (Special storage requirements)

تختلف ظروف التخزين المطلوبة بإختلاف المنتج، لذا لابد من معرفة خواص المنتج حتى يتحقق تبريده وتخزينه عند الظروف المناسبة.

7-4/1 الفواكه (Fruits)

- الحمضيات(البرتقال والليمون والكريب فروت وغيره): لا تتعرض هذه لأي تغيرات بعد حصادها وتعتمد نوعية المنتج منها على درجة نضجه عند حصاده. ينقل المنتج الى مكان التعبئة والتغليف بعد أن تنجز عمليتا الغسل والفرز. يمكن حفظ معظم أنواع البرتقال لمدة شهرين أو ثلاثة في درجة حرارة 10 ^{o}C ورطوبة نسبية تتراوح بين 85-90%. أما الليمون والكريب فروت فيمكن تخزينها أيضاً عند 10 ^{o}C و 85-90% رطوبة نسبية.
- الخوخ: لا تصلح معظم أنواعه للتخزين طويل الأجل في أول موسم حصاده. أما تلك الأنواع التي تحصد في آخر الموسم فيمكن تخزينها لمدة تصل لستة أسابيع. ولذلك لابد من تبريدها بعد الحصاد مباشرة. ويجب تخزينها عند -5°C و 90-95% رطوبة نسبية.
- العنب: يُبرد تبريداً متقدماً بعد الحصاد مباشرة وذلك لتقليل التلف الذي تسببه درجة الحرارة العالية في مكان الحصاد. ويجب أخذ الحيطة والحذر في حالة تبريد العنب لأن صغر حجمه يعرضه لفقدان جزء كبير من رطوبته ويؤدي إلى جفاف سطحه. وغالباً ما يُبرد العنب عند درجة حرارة أقل من 10 ^{o}C بتعريضه الى هواء يجهز بمعدل 0.17 l/s.kg من كتلة العنب وسرعة قدرها 0.5 m/s. وفي بعض الأحيان يُرطب الهواء للتقليل من عملية جفاف سطح العنب.
- الموز: يُنقل عند إكتمال نموه ويصبح أصفر اللون ولكنه غير ناضخ إذا كان أخضر اللون، من مكان حصاده في المناطق الحارة (الإستوائية)، بعد غسله وتعبئته في صناديق التجزئة، بواسطة ناقلات مبردة عند درجة حرارة 14°C . إذا تم نقل الموز عند درجات حرارة أقل من 13°C فإن ذلك يسبب ما يُسمى أذى البرد للموز (chilling injury). أما حفظ الموز ونقله عند درجات حرارة أعلى من 16°C فيسبب نضوج المحصول بسرعة مما يجعله يتلف قبل توزيعه في المكان والزمان المحددين.
- الكمثرى: تحفظ في بيئة رطبة وفي درجة حرارة تخزين 1°C ورطوبة نسبية 90-95% [4].

7-4/2 الخضراوات (Vegetables)

تُبرد معظم الخضراوات مباشرة بعد حصادها أو تُعبأ بعد غسلها وفرزها لتكون جاهزة للتسويق. وهناك اساليب كثيرة للحفاظ على نوعية الخضراوات منها:

1. حصاد الخضراوات عند درجة حرارة النضج المثالية.
2. المناولة الجيدة والسريعة لمنع الجروح الميكانيكية.
3. تجهيز حاويات ومواد تغليف.
4. إستعمال التبريد المتقدم لإزالة حرارة الحقل.
5. أن تتوافر رطوبة نسبية عالية لمنع فقدان الرطوبة من المنتج.

وتتأثر الخضراوات كثيراً بدرجات الحرارة العالية، مثلما تتأثر أيضاً بدرجات الحرارة المنخفضة. وتؤثر طرائق المناولة والتعبئة غير المنظمة للخضراوات تأثيراً كبيراً على قيمتها الغذائية. لذلك يجب إتباع طرائق المناولة والتعبئة الصحيحة وطرائق التبريد والنقل والتخزين الموصى بها للحفاظ على المنتج وهو بنوعية جيدة وقيمة غذائية عالية. وخلال فترة التسويق تؤثر عدة عوامل على نوعية المنتج منها:

1. التغير في الشكل والبنية واللون نتيجة للنضج والتنفس وطول العمر.
2. فقدان الرطوبة.
3. الخدش والتلف الميكانيكي.
4. الأمراض والبكتريا.
5. التغير في القيمة الغذائية والطعم.
6. التنبيت.

7-3/4 اللحوم (Meats)

يعرف خزن اللحوم بالتبريد بأنه وسيلة مؤقتة لحفظ اللحوم عند درجة حرارة منخفضة ما بين^{o}C 5-2 لفترة قصيرة (عدة أيام). حيث يعمل التبريد الإبتدائي على خفض درجة حرارة الذبائح بعد اكتمال عملية الذبح إلى أقل من ^{o}C 5 بأسرع وقت ممكن وذلك في مبردات تُسمى أحياناً مبردات التثليج (chill coolers) تعمل على بلوغ درجات حرارة تتراوح بين ^{o}C4- و^{o}C0. تجمد اللحوم،عند الرغبة في حفظها لمدة طويلة، إلى فترة قد تمتد عدة سنوات. حيث يؤدي التجميد إلى إيقاف نشاط الأحياء الدقيقة والقضاء على الكثير منها. كما أنه يعيق النشاط الأنزيمي في الأنسجة ويجعله بطيئا جدا حيث لا تلاحظ آثار النشاط الأنزيمي إلا بعد امد طويل.

يجب خفض درجة حرارة اللحوم إلى ^{o}C1.5 مباشرة بعد الذبح. ولا ينصح بتبريد اللحوم بواسطة رذاذ الماء البارد، وإنما الأفضل خفض حرارة أنصاف الذبائح أو أجزائها بواسطة الهواء المبرد المتجدد، حيث أن الطريقة الأولى تؤدي إلى تكثف الرطوبة على سطح اللحم وإلى لزوجته وسرعة فساده.

تُحفظ اللحوم مبردة عند درجة حرارة ^{o}C3.5- للغرفة. وتحفظ مجمدة لفترة 12 شهراً وأكثر عند درجة حرارة ^{o}C23-. ويمكن حفظها لفترة طويلة نسبياً (8-18) شهراً عند درجة حرارة ^{o}C18-. وتتعرض نوعية وقيمة اللحوم الغذائية لمخاطر كثيرة إذا إرتفعت درجة حرارة التخزين إلى ^{o}C9-. يلاحظ أن لحوم الدواجن تفسد بسرعة بعد ذبحها، لذلك يفضل اللجوء إلى تجميدها إذا كان استهلاكها سيتأخر لعدة أيام. كما يلاحظ أن لحوم الحيوانات صغيرة العمر أسرع فساداً من لحوم الحيوانات كبيرة العمر لزيادة نسبة الرطوبة في الأولى. وأن لحوم الأغنام أسرع فساداً من لحوم الأبقار بسبب سرعة زنخ دهونها. ويبين الجدول (7-1/4) مدة التخزين ودرجات الحرارة المطلوبة لتلك المدة للحوم المختلفة [5] .

7-5 طرائق التجميد (Types of freezing)

إن معظم عمليات تثليج المواد الغذائية هي فعلياً عمليات تجميد إلى درجات حرارة دون الصفر المئوي. وطرائق التثليج هي الآتية:

7-5/1 التجميد بواسطة الهواء اللافح (Air blast freezing)

يعتبر هذا النوع الأكثر شيوعا في تجميد الأغذية، حيث يوضع المنتج في غرفة أو نفق ويمرر الهواء المثلج عليه بواسطة مروحة مرتبطة بمبخر منظومة التثليج. وتقسم هذه المنظومات إلى:

7-5/1/1 التجميد بالهواء المستقر (Still – air freezer)

هي أبسط طرائق التجميد وفيها يجمع المنتج في غرفة مجمدة تستعمل لخزن المنتج المجمد. ويستعمل فيها التجميد القارص، ويمكن أن تكون الرفوف مجمدة بشكل مباشر مما يؤدي الى التصاق المنتج بالرف. تمتاز ببطء التجميد وعدم انتظام درجة الحرارة بين منتج وآخر في المخزن المجمد نفسه.

7-5/1/2 التجميد بالهواء اللافح في الغرف والأنفاق (Air – blast room and tunnels)

تستعمل للمنتجات متوسطة الحجم وكبيرها وعندما يكون التجميد محددا بحجم المنتج. ولايجب أن تكون المنتجات منتظمة الأشكال، اذ توضع المنتجات في أوعية وعلى رفوف أو تعلق، لذا يمكن للهواء المثلج ان يمر حول كل منتج بشكل حر. يستعمل نظام ميكانيكي، في حال التجهيز او السحب الآلي للمنتج، يقوم بتحريك المنتج خلال أنفاق بشكل دوري. عند التجهيز اليدوي وعلى شكل دفعات فان الرفوف توضع من قبل عاملين في المخزن المجمد لفترة معينة ثم تسحب بواسطتهم بعد إنتهاء عملية التجميد.

7-5/1/3 التجميد باستعمال الأحزمة الناقلة للحركة (Belt freezer)

تستعمل أحزمة ميكانيكة لنقل المنتج من خارج المخزن إلى داخله حيث يمر الهواء بشكل عمودي من الأسفل الى الأعلى ليجمد المنتج خلال مروره في النفق. وقد يكون النقل بواسطة حزام أو عدة أحزمة. تستعمل هذه الطريقة لتجميد المنتجات غير المغلفة الصغيرة والمنتظمة في الشكل، حيث يمكن تبريد كل جزء بشكل منفصل مما يحقق سرعة في التجميد. تتراوح سرعة الهواء من 1 m/s الى 6 m/s، ويمكن أن تبلل طبقة المنتج جزئيا لزيادة معامل إنتقال الحرارة بين سطح المنتج والهواء. يتوجب الإختيار الدقيق لسرعة الحزام وسمك طبقة المنتج المارة على الحزام.

7-5/1/4 التجميد باستعمال الأحزمة اللولبية الناقلة للحركة (Spiral belt freezer)

تعتبر حالة خاصة من التجميد بالأحزمة الناقلة، وتتكون من حزام يمر بشكل لولبي قد يصل الى 50 حلقة مما يقلل بشكل كبير من حجم المخزن المجمد. تستعمل للمنتجات التي تستغرق وقتا طويلا لتجميدها، ويتحدد حجم المنتج بالمسافة بين حلقات الحزام الناقل. تكون حركة الهواء إما أفقية بإتجاه الحزام أو عمودية خلال الحزام. تمتاز بقابلية الحزام على احتواء المنتج لتقليل السوفان إضافة الى إمكانية التنظيف الموقعي.

7-5/1/5 التجميد باستعمال الفراش العائم (Fluidized bed freezing)

تستعمل للمنتجات الصغيرة منتظمة الشكل ومتساوية الحجم، مثل الفواكه والخضراوات حيث لايتطلب تعويمها طاقة عالية. وكما في التجميد بالأحزمة الناقلة، يمر الهواء المثلج من أسفل الحزام الناقل بسرعة عالية مما يؤدي الى تعويم (رفع) المنتج من مكانه وبالتالي الى توزيع جيد لدرجات الحرارة خلال المنتج ومنع التصاقه بالحزام. تمتاز بصغر حجم المخزن المجمد لتحسين معامل انتقال الحرارة بين سطح المنتج والهواء مما يؤدي

الى قصر وقت الإنجماد. ويبين الجدول(7-1/5) ملخصاً لنوع المخزن المجمد وطريقة التغذية واتجاه الهواء نسبة الى المنتج [6-8].

الجدول 7-1/4: مدة التخزين بالشهور للحوم عند درجات حرارة تخزين مختلفة [5].

المنتج	مدة التخزين (شهر)		
	درجات الحرارة (^oC)		
	-12	-18	-23
لحم بقري	12- 4	18-6	24-12
لحم غنم	8-3	16-6	18-12
لحم بقري مقطع	4-3	6-4	
لحم عجل	4-3	14-4	8

الجدول 7-1/5: نوع المخزن المجمد وطريقة إدخال المنتج وإتجاه الهواء المثلج نسبة الى المنتج [9]

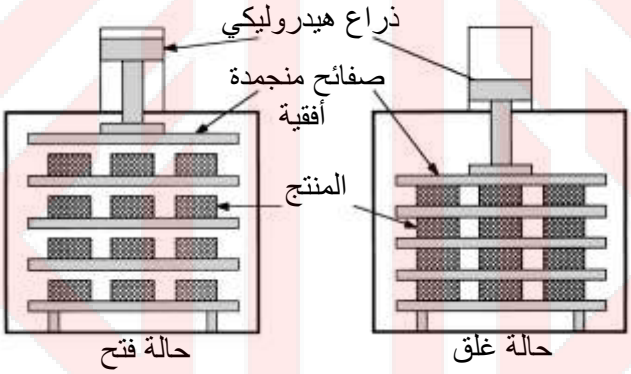
نوع المخزن	نوع التحميل	سريان الهواء
على شكل دفعات	عربات صغيرة	متقاطع
	ألواح تحميل	متوازٍ
	ألواح خشبية أو رفوف	متوازٍ
دفعات/متواصل	عربات صغيرة	متقاطع
	ألواح تحميل	متواز
متواصل خطي	حزام منبسط	متقاطع
	حزام شبكي	متوازٍ
	حزام سلسلة	متوازٍ
متواصل حلزوني	حزام سلسلة	متقاطع
		متوازٍ
متواصل على فراش عائم	حزام شبكي	من الأسفل الى الأعلى
	حزام سلسلة	من الأسفل الى الأعلى ومتقاطع

7-2/5 التجميد بواسطة التلامس (Contact freezing)

7-1/2/5 المجمدات اللوحية (Plate freezer)

عبارة عن مجمدة تتكون من سلسلة من الصفائح المستوية، افقية او عمودية، يكتمل تدوير مائع التثليج خلالها، وتستعمل منظومة هيدروليكية للتحكم بالمسافة بين الصفائح في أثناء تحميل أو تفريغ المنتج، وكذلك لزيادة مساحة التماس بين الصفائح والمنتج وكما مبين في الشكل (7-1/5). تستعمل محددات لضبط المسافة بين الصفائح إضافة الى صمام تخفيف الضغط لمنع تهشيم أو تسطح المنتج في اثناء تقريب

الصفائح. تستعمل الصفائح العمودية لتجميد المنتجات غير المعبئة القابلة لتغير شكلها في أثناء الانجماد مثل اللحوم والأسماك حيث يجري تجهيز المنتج بين الألواح بالجاذبية. تستعمل منظومة تسخين لفصل المنتج عن الألواح بعد انجماده، وقد يتطلب الأمر اجراء عملية تنظيف للمنتج قبل شحنه. اما الصفائح الأفقية فتستعمل لتجميد المنتجات المعبئة بشكل متوازي سطوح أو المنتج الموضوع في حاويات منتظمة. ان المجمدات اللوحية فعالة في تجميد كميات كبيرة من المنتج ضمن مخزن مجمد صغير نسبيا بسبب الفاعلية العالية للتجميد، وعدم حاجته الى مراوح لدفع الهواء. ولكن نظام التجميد فيها ذو كلفة ابتدائية عالية وإستعمال محدود نظرا لتعامله مع منتج منتظم الشكل.



الشكل 7-1/5: المجمدات اللوحية الأفقية.

7-3/5 التجميد بالغمر (Immersion freezing)

يتحقق التجميد عن طريق رش مائع التثليج الثانوي (محلول ملحي أو غليكول) على المنتج. ويجب تغليف المنتج لمنع تغلغل مائع التثليج الثانوي خلاله.

7-6 تصميم المخازن المبردة والمجمدة (Design of cooling and freezing warehouse)

إن التخطيط المسبق للمخزن يُعد أهم وأصعب مهمة في هذا المضمار لأنه يتحقق بدون قواعد ثابتة ويتوقف على الخبرة لتحقيق المواصفات المطلوبة. ومن متطلبات التصميم للمخازن المبردة والمجمدة تقليل كل من الكلفة الأولية ونفقات التشغيل مع تجميع غرف التبريد بشكل متجاور وتسهيل حركة المواد الغذائية ومنظومة التثليج وان تتوافر احتياطات الأمان وتدفئة التربة أسفل غرف التجميد والتحسب للتوسعات المستقبلية. وقدلايمكن تحقيق جميع هذه المتطلبات في آنٍ واحد.

7-1/6 الاعتبارات الأولية لإنشاء المخازن المبردة والمجمدة

(Primary considerations for establishment of cooling and freezing warehouse)

يمكن تلخيص الاعتبارات الأولية لإنشاء المخازن المبردة والمجمدة بالنقاط الرئيسة الآتية:

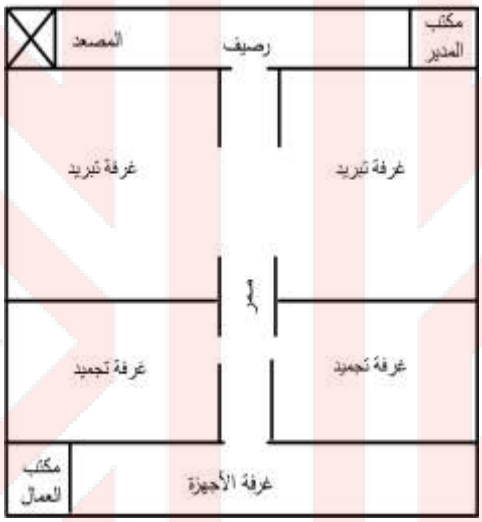
- **تقليل الكلفة الأولية (Reduction of initial cost)**

إن كلفة الأعمال الإنشائية تشكل 50% من الكلفة الأولية. لذا يجب العمل على تقليل كلفة الأعمال الإنشائية عن طريق الإلتزام بالمشاريع النموذجية التي لها سعات تخزين ثابتة. أي الإلتزام بأبعاد قياسية معينة بالنسبة لطول وعرض الغرفة بحيث يكون بعد كل منها 6 م أو مضاعفاته. وبالاضافة لهذا يجب إجراء جميع الخطوات الآتية كوحدة واحدة:

-تجميع أماكن الخدمات المختلفة مع غرف التبريد والتجميد في مبنى واحد بدلاً من عدة مبان منفصلة.

- إستعمال جدران مسبقة الصنع من السمنت أو الواح العزل.
- إستغلال أو توظيف أرضية المخزن إلى أبعد حد.

وبصورة عامة يجب ان تكون المسافة المخصصة للممرات وأماكن الخدمات أقل مايمكن. ويوضح الشكل (1/6-7) المسقط الافقي لمستودع تبريد حديث. ونجد فيه أن نسبة المساحة المخصصة للممر والمكاتب وغرفة الأجهزة صغيرة بالمقارنة مع المساحات المخصصة لغرف التبريد .



الشكل 7-1/6: المسقط الافقي لمستودع تبريد.

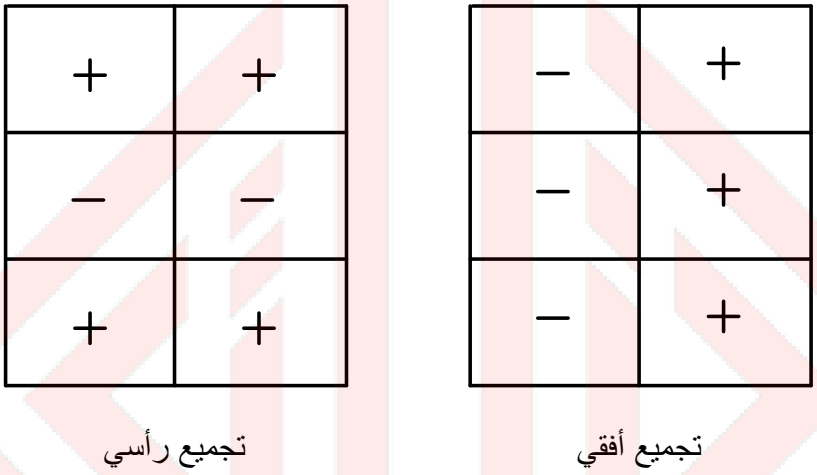
- **تقليل نفقات التشغيل (Reduction of operating cost)**

يمكن خفض نفقات التشغيل عن طريق تقليل معدلات تسرب الحرارة خلال جدران وسقف مخزن التبريد، وذلك باتباع الخطوات الآتية :

- تصميم مخازن التبريد على هيئة متوازي السطوح المستطيلة بحيث يكون الجانب الاطول في جهة الشمال وأماكن الخدمات في جهة الجنوب.
- حماية الجدران والسقف من أشعة الشمس.
- عدم إتصال ممرات الغرف مباشرة بالهواء الخارجي مع استعمال ستائر هوائية لتقليل معدلات تغيير الهواء وخاصة لغرف التجميد.

- **تجميع غرف التبريد بشكل متجاور(Compilation of cold stores)**

عند التخطيط لمستودعات التبريد (مجموعة من المخازن المبردة) يجب تجميع الغرف السالبة (غرف التجميد) والغرف الموجبة (غرف التبريد) معاً سواء كان التجميع فى الإتجاه الرأسى أو الاتجاه الأفقي، كما هو موضح فى الشكل(7-2/6) . وذلك لتسهيل وتنظيم منظومة أنابيب مائع التثليج السائل والبخار. ولدى تجميع الغرف يجب ان نأخذ بالحسبان إبعاد غرف التجميد عن السقف والجدران الأكثر تعرضاً لأشعة الشمس.



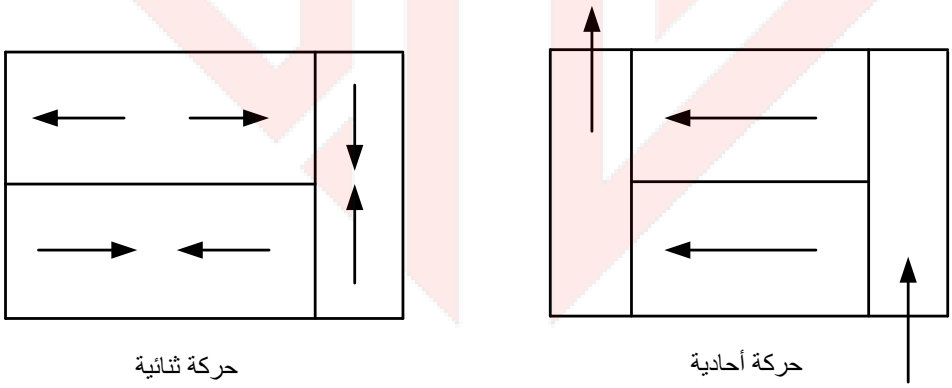
+ : غرفة مبردة

− : غرفة مجمدة

الشكل 7-2/6: تجميع الغرف.

- **تسهيل حركة المواد الغذائية (Facilitate the movement of food)**

يتطلب تنظيم وتسهيل حركة المواد الغذائية أن تكون هذه الحركة خلال أقصر الطرق الممكنة، بحيث لايحدث تقاطع او حركة عكسية. ويوضح الشكل (7-3/6) حركة المواد الغذائية ضمن مستودعات التبريد.



الشكل 7-3/6: حركة المواد الغذائية ضمن مستودعات التبريد.

إن نظام الحركة الاحادية أفضل من نظام الحركة الثنائية، لأنه يؤدي إلى تقليل الوقت اللازم لتحميل وسحب المواد الغذائية من الغرف. كما إن عامل إستعمال الأرضية لنظام الحركة الاحادية أصغر من نظيره

لنظام الحركة الثنائية. ويفضل في المستودعات متعددة الطوابق نقل المواد الغذائية الى الأدوار العلوية بواسطة المصاعد.

- **نظام التبريد (Cooling system)**

عند التخطيط لمستودعات التبريد يجب ان نأخذ بالحسبان نظام التثليج الذي يمكنه تحقيق متطلبات التبريد أو التجميد أو كلاهما. والسؤال المطروح هنا هو : هل نستعمل أجهزة تثليج منفصلة تخدم كل غرفة من غرف التبريد بشكل مستقل ؟؟ أم نستعمل نظاماً مركزياً مشتركاً يلبي متطلبات كل غرف التبريد معاً، ويحتاج الى محطة أجهزة وملحقاتها ؟؟ يفضل إستعمال أجهزة تثليج منفصلة لتشغيل الغرف عند تخزينها بالمواد الغذائية إن كان ذلك يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة وسهولة الصيانة، وبخلاف ذلك وللمستودعات الكبيرة تُفضل المنظومة المركزية مع مبخرات منفصلة لكل مخزن.

- **إحتياطات الأمان (Safety precautions)**

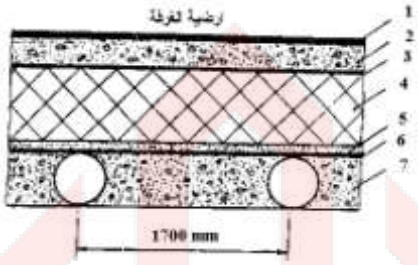
عند التخطيط لمستودعات التبريد يجب ان نأخذ بالحسبان احتياطات الأمان المختلفة الآتية :

- الحريق
- التخلص من الروائح الضارة
- المحافظة على الجدران والأبواب من تصادم الرافعات الشوكية
- المحافظة على الغرف مسبقة الصنع من الإنهيار نتيجة إختلاف الضغوط داخل وخارج الغرف .
- في مستودعات التبريد مسبقة الصنع، تصب أرضية خرسانية بمساحة كافية تحت أرضية الجدران، وتركب أداة مساواة ضغط الهواء في الجدران المطلة على الممرات. كما تجهز أبواب جميع غرف التبريد والتجميد بوسيلة خارجية وداخلية لفتح الباب وسخان كهربائي حول إطار أبواب غرف التجميد لمنع تكثف بخار الماء وتجمده على الأبواب.
- إتباع تعليمات الأمان والسلامة عند صيانة أجهزة منظومات التثليج وكذلك عند مناولة وتخزين موائع التثليج.

- **تدفئة التربة أسفل غرف التجميد (Heating soil at freezer store bottom)**

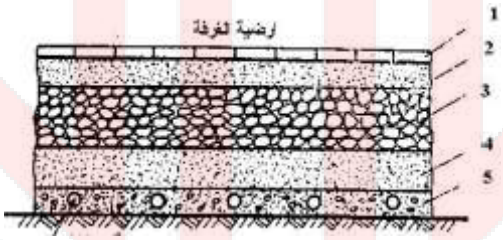
إن انتقال الحرارة من التربة بدرجة حرارة 20^oC تقريباً إلى غرف التجميد -18^oC يؤدي الى تجمد المياه في التربة أسفل غرف التجميد، وهذا يؤدي إلى تمدد التربة في الإتجاه الرأسي وتخريب أرضية الغرف. وفي بعض الاحيان يؤدي إلى تحريك الأسس فيما لو تمددت التربة في الاتجاه الأفقي. لذا يجب رفع أرضية الغرفة نحو 1.2 متر عن مستوى أرضية الشارع وتدفئة التربة أسفل غرف التجميد وخاصة في الجزء المتوسط من غرف التجميد بمعدل وسطي مقداره $5\ W/m^2$ من مساحة الأرضية. كما يمكن تدفئة التربة بإستعمال شبكة كهربائية أو شبكة أنابيب يجري خلالها ماء ساخن أو هواء دافئ أو مجموعة أنابيب يجري خلالها هواء حار .

تبين الأشكال (7–4/6) و(7–5/6) و(7–6/6) مقاطع لأرضية مستودعات التبريد، بإستعمال الهواء الدافئ والماء الساخن والشبكة الكهربائية :



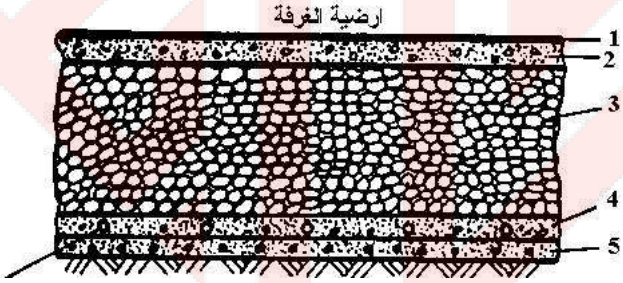
(1) قير (2) خرسانة 100 mm (3) مانع الرطوبة (4) العازل (5) 30 mm رمل (6) مانع الرطوبة (7) طبقة خرسانية 300 mm .

الشكل 7–4/6: التدفئة بالهـــواء.



(1) طبقة خرسانية مستوية (2) رمل (3) حصى (4) تربة (5)125 mm طبقة خرسانية مسلحة وبداخلها أنابيب التدفئة.

الشكل 7–5/6: التدفئة بالمـــاء.

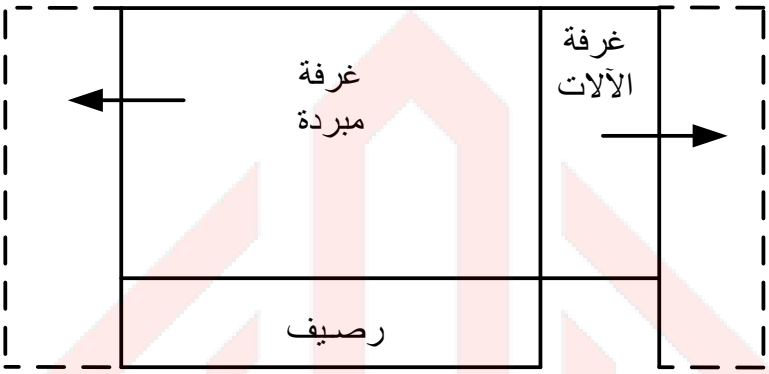


(1) قير(2) خرسانة (3)600 mm حصى(4)50 mm رمل(5) 50 mm خرسانة

الشكل 7–6/6: التدفئة الكهربائية.

- **التوسعات المستقبلية (Future expansion)**

يمكن أن تكون التوسعات المستقبلية رأسية أو أفقية كما موضح بالشكل (7-7/6).

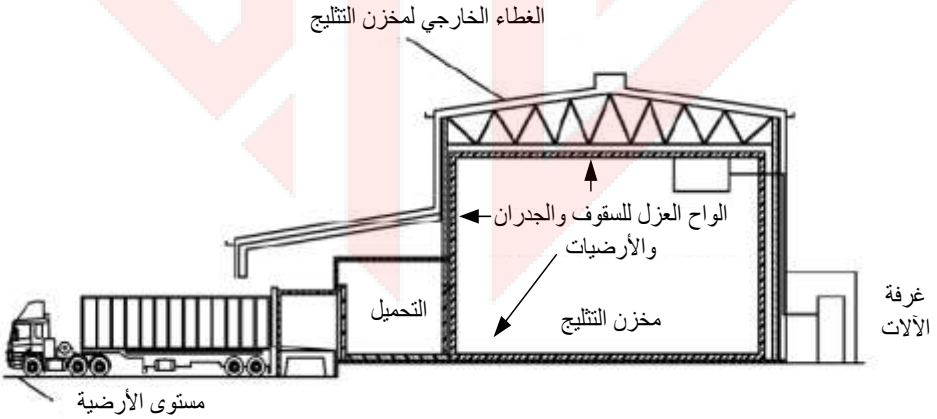


الشكل 7-7/6: التوسعات المستقبلية.

تترك مساحة مجاورة لغرف التبريد أو غرفة الأجهزة، كي تسهل عملية ربط أماكن التبريد الجديدة بالأماكن القديمة بدون ايقاف تشغيل الغرف القديمة في أثناء اجراء التوسعات. تكون التوسعات الرأسية عن طريق زيادة عدد الطوابق، وهذا يستدعي عمل أسس خرسانية مسلحة قوية تتحمل التوسعات المستقبلية. يصاحب التوسعات الرأسية إنفاق الاموال على إنشاء الأسس وتركيب مصاعد ذات سعات كبيرة لاتعود بعائد إلاَّ بعد إقامة التوسعات [10,11].

7-1/1/6 طرائق وضع العوازل (Insulation installation)

تستعمل الوحدات الخفيفة المعزولة مسبقة الصنع (prefabricated panels) ومواد البناء التقليدية فى تشييد مخازن التبريد والتجميد. وهذه المنشآت تحتاج إلى عناية خاصة بالعزل الحرارى وحواجز بخار الماء لأنها تؤثر بقدر كبير على التكلفة. ونظراً لطبيعة ظروف التشغيل، يجب التحكم فى تسرب الرطوبة إلى نظام العزل الحرارى. يوضح الشكل (7-8/6) مخططاً لمخزن تثليج نموذجي.



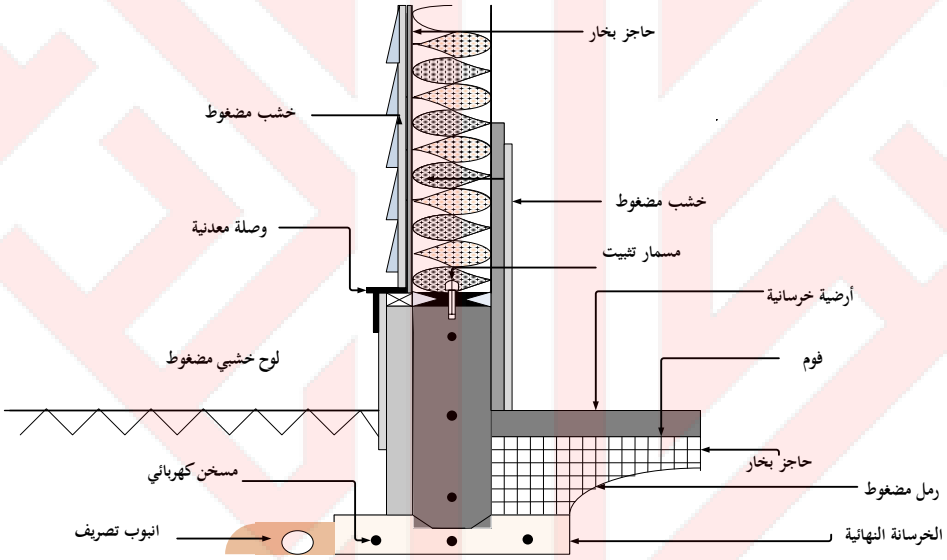
الشكل 7-8/6: مخطط لمخزن تثليج نموذجي.

وفيما يلي توضيح لبعض الطرائق المستعملة في عزل الأرضية والجدران والسقوف لمخازن التبريد:

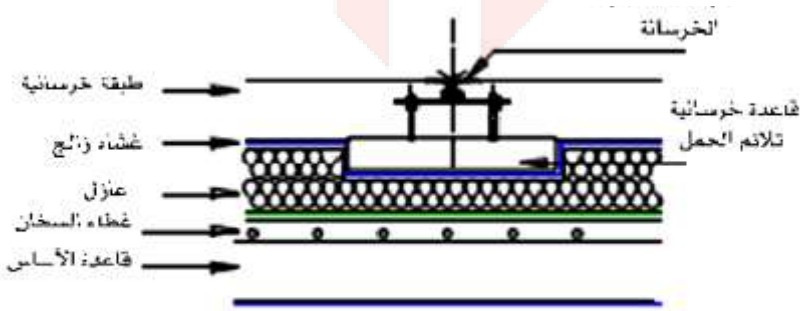
7-6/1/1/1 عزل الأرضية (Floor insulation)

يستعمل لعزل أرضية مخازن التبريد مادة عازلة ذات صلابة إنضغاطية عالية على هيئة طبقة أو طبقتين من الفلين أو الستايروفوم (styrofoam) أو الزجاج الرغوي. يوضع العازل الحراري فوق قاعدة خرسانية مسلحة مستوية وناعمة. تضغط ألواح العزل بجانب بعضها البعض بدون السماح بوجود فراغات بين الألواح، وتُملأ الفراغات بنشارة خشب وإسفلت. يوضح الشكل(7-6/9) طريقة عزل الأرضية حيث توجد أولاً قاعدة الأساس التي تكون أعمق ثم طبقة من الرمل ثم طبقة من مانع تسرب الرطوبة ثم عازل الستايروفوم ثم طبقة الخرسانة النهائية (concrete flooring). ويجب أن تترك فواصل تملأ بمادة قابلة للانضغاط للسماح بتمدد مواد البناء الحديدية عند إلتقاء الأرضية بالجدران.

يُبين الشكل (7-6/10) أرضية مثالية عند درجة حرارة -25°C بإستعمال عازل الستايروفوم بسمك150mm. يجب أن تتحمل مواد الأرضية الأوزان داخل المخزن وكذلك الأحمال الثقيلة نتيجة الرافعات..الخ. كما يوجد مسخن كهربائي مطمور ضمن طبقات الأرضية ومغلف جيداً، يعمل على منع تجمد الأرضية، ثم يوضع مانع الرطوبة مباشرة فوق المسخن. بالنسبة للمعاملة النهائية للأرضية يجب أن تكون هناك طبقة خرسانية لا يقل سمكها عن 150mm.



الشكل 7-6/9: طريقة عزل الأرضية.



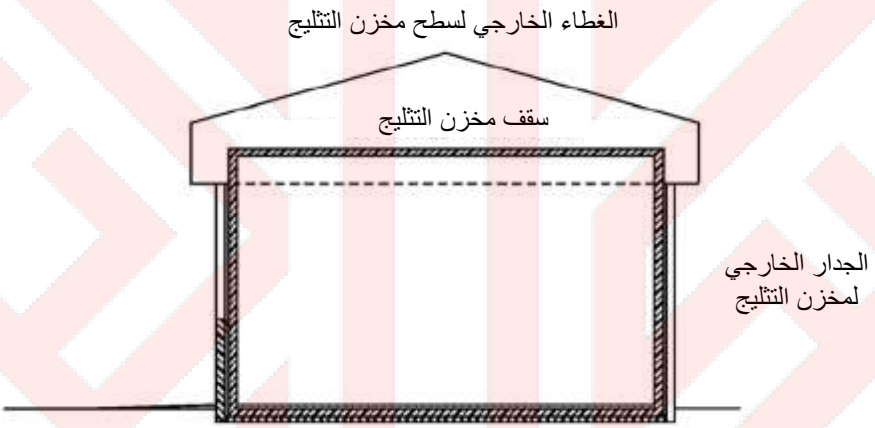
الشكل 7-6/10: طبقات الأرضية لتلائم حمل الرافعات.

7-6/1/1/2 عزل الجدران والسقوف (Wall and ceiling insulation)

يُعتبر عزل سقوف المسنمات (attic ceiling) التي تحتوي على فراغ بين السطح والسقف (عُلّية) واحداً من أكثر العوامل تأثيرا على إستهلاك الطاقة في مخزن التبريد. وعليه فعند التخطيط لعزل السقوف يجب التأكد من الآتي:-

- عزل كل الفتحات بالسقف عزلاً تاماً.
- أن يكون العزل مطابقاً للمواصفات المحلية المطلوبة.
- أن تكون طبقات العازل متصلة ببعضها (continuous).
- أن تكون المساحة التحتانية للمسنم كافية لإستيعاب العازل المطلوب.
- أن يتحقق العزل التام عند مناطق التقاء الجدران بالارضية والسقف مع وضع موانع تسرب الهواء.
- أن لاتكون السقوف الحديدية أو أي مواد موصلة للحرارة متصلة مع بعضها للغرف التي تكون عند درجات حرارة مختلفة لتفادي تكوين الجسر الحراري (thermal bridge).

يوضح الشكل (7-6/11) عزل سقوف المسنمات والجدران.



الشكل 7-6/11: عزل سقوف المسنمات والجدران.

7-6/1/2 طرائق إنشاء الجدران والسقوف والأرضيات (Construction of walls, floors and ceilings)

تتشابه تكنولوجيا طرائق إنشاء الجدران والسقوف للمخازن المبردة والمجمدة. ومن أهم هذه الطرائق هي:

أ- الإنشاءات الحديدية (steel construction)

غالباً ما تستعمل لمخازن التبريد الكبيرة، حيث تثبت أغلفة عزل مخازن التبريد عادة عن طريق دعامات حديدية أو خرسانية. وكل غلاف يكون معلقاً أو مثبتاً كصندوق داخل الإطار(الإنشاء الحديدي في الخارج).

ب- مواد البناء الطابوقية (masonry buildings)

وهي تستعمل لمخازن التبريد ذات الأحجام المتوسطة.

ج- الإنشاءات الخشبية (timber construction)

وهي تلائم الأحجام الصغيرة وتوجد غالباً في المزارع التي تغذي مخازن تبريد الفواكه والخضراوات. من المهم في هذه الإنشاءات وضع موانع تسرب الرطوبة في الجانب الأدفأ.

فيما يلي توضيح لبعض الطرائق المستعملة في إنشاء الجدران والسقوف والأرضيات.

7-6/1/2/1 الجدران (Walls)

تبنى مخازن التبريد الكبيرة والمتوسطة عادة من طابق واحد، حيث يمكن إستعمال طرائق المناولة الميكانيكية كالرافعات، وقد تستعمل المناولة اليدوية في بعض مخازن التبريد الصغيرة.

يمكن بناء مخزن التبريد كمبنى إعتيادي بإستعمال مواد البناء العادية كالطابوق والخرسانة أو ألواح خرسانية جاهزة التصنيع، مع تركيب موانع تسرب الرطوبة والعوازل الحرارية بالداخل، وخاصة عوازل البولي يوريثين والبولي ستايرين التي تستعمل مع جميع أحجام مخازن التبريد $50\ m^3$ إلى $250\ m^3$. يوضح الشكل (7-6/12) أماكن مختلفة لوضع العوازل الحرارية.

ويراعى عند تنفيذ العزل الحرارى لجدران مخازن التبريد والتجميد المشيدة باستعمال مواد البناء التقليدية أن تكون مقاومتها الحرارية مطابقة للمواصفات. وينفذ العزل طبقاً لظروف الاستعمال كما يلى:

(أ) عزل الجدران المزدوجة (Double wall insulation)

1 – بناء الجدار الداخلى بكامل إرتفاعه.

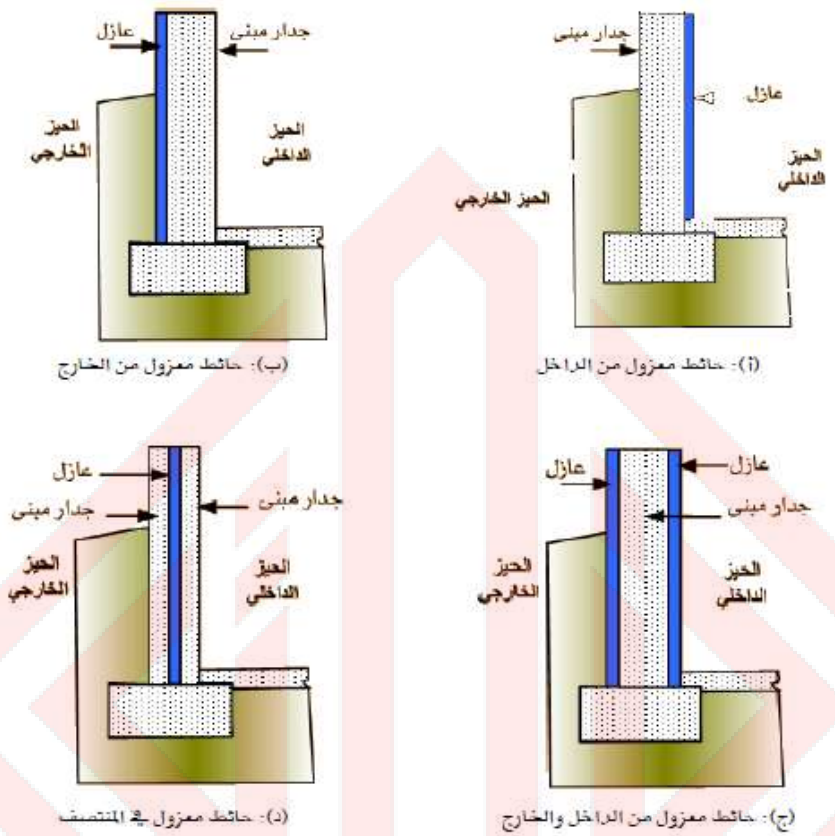
2 – تثبيت طبقات مواد العزل الحرارى (طبقة واحدة أو طبقتين) مع مراعاة التثبيت بالسيليكون أو مواد أخرى مناسبة فى عدة نقاط أو بواسطة الوسائل الميكانيكية.

3 – تنفيذ طبقة مانع الرطوبة.

4 – بناء الجدار الخارجى بكامل إرتفاعه مع إستعمال مواد ربط بين الجدار الداخلى والخارجى مصنعة من مواد مقاومة لإنتقال الحرارة.

5 – إنهاء السطح الداخلى لمخزن التبريد.

6- تكون أعمدة التشييد من الخارج وأن يكون عزل وتغليف هذه الأعمدة من الداخل كما موضح في الشكل (7-6/13).



الشكل 7-12/6: أماكن مختلفة لوضع العوازل الحرارية.

(ب) عزل جدار مفرد (Single wall insulation)

1 – تنفيذ طبقة مانع الرطوبة من الداخل.

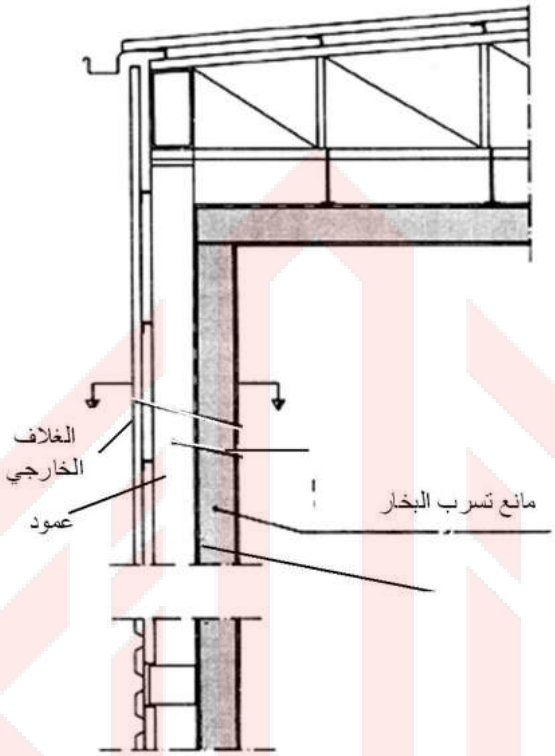
2 – تثبيت طبقات مواد العزل الحرارى بواسطة طريقة تثبيت مناسبة لما هو منصوص عليه في مدونة العزل الحرارى (م.ب.ع. 501).

3 – تركيب مشبك معدنى بالتثبيت الميكانيكى.

4 – تنفيذ طبقة انهاء سمنتي(لبخ) مع مراعاة أن تكون ذات نفاذية أكبر من طبقة مانع الرطوبة.

5 – لا يجوز ان تستعمل النورة والجبس على الإطلاق.

ولابد من تجهيز الألواح المعزولة مسبقة التصنيع (التي تتضمن موانع الرطوبة ومغلفة من الجهتين) إلى موقع مخازن التبريد لتقليل زمن العمل الميداني.



الشكل 7-13/6: عزل وتغليف الجدران والسقوف.

ويكون عزل الألواح التي تستعمل عادة مع هذه الأنظمة بمادة البولي يوريثين (polyurethane) والبولي ستايرين (polystyrene) وعند صنع هذه الألواح توضع مادة مانع التسرب كشريحة خفيفة من الحديد المغلون ويغلف الوجه الآخر بشريحة المنيوم، مع وضع مادة تجميلية (decorative cladding) على التغليف الخارجي بالنسبة لأعمدة التشييد. ويكون تشييد السقوف بنظام السقوف المعلقة (suspended ceiling). تكون مواد ألواح تشييد السقوف كألواح الجدران غير أنه في بعض الأحيان تضاف اليها هياكل خشبية ساندة.

تثبت ألواح الجدران مع أعمدة التشييد أو مع دعائم أفقية بين الأعمدة الحديدية عن طريق مسامير خاصة، وتغلق الفواصل بأشرطة لاصقة أو بمادة صمغية. تكون ألواح السقوف معلقة بسقوف التشييد الخارجية بواسطة رباطات متصلة بالسقف الخارجي. يجب الحذر عند مرور تلك الرباطات من خلال موانع التسرب في الأجواء الرطبة، إذ قد لا تكون التهوية كافية لمنع تكثف البخار في العلّية (attic space). ويمكن حل هذه المشكلة بغلقها من الخارج وتجفيف الهواء عن طريق بعض مجففات الهواء.

النظام الداخلي (Internal rules)

يبين الشكل (7-14/6) إن مواد التشييد الداخلي تتكون من أعمدة وروافد تدعيم السقف (trusses) في الجهة الباردة، غير أن موانع الرطوبة تكون من الخارج مع وجود طبقة تغليف معها. وعليه يجب أن تكون شريحة الحديد نفسها والوصلات بين الألواح من النوع ذي الخاصية الجيدة ويمكن أن تكون عملية تركيب مادة العزل للسقوف باسلوب الالواح المعزولة مسبقا أو تركب بالموقع.

يمكن أن تكون المسافة بين دعامتي الحديد في حدود 60m (أقل مسافة تكون عادة بحدود15 m) بدون الحاجة إلى تعليقات من الداخل (hangers). كل هذه الإنشاءات تصنع مسبقا عادة وتكون جاهزة عند موقع

العمل. قد تستعمل أعمدة خرسانية بدلاً من الحديد في بعض مخازن التبريد أو قد تجمع بين الأعمدة الخرسانية والحديدية.

7-6/1/2/2 السقوف (السطح الخارجى) (Roofs internal surface)

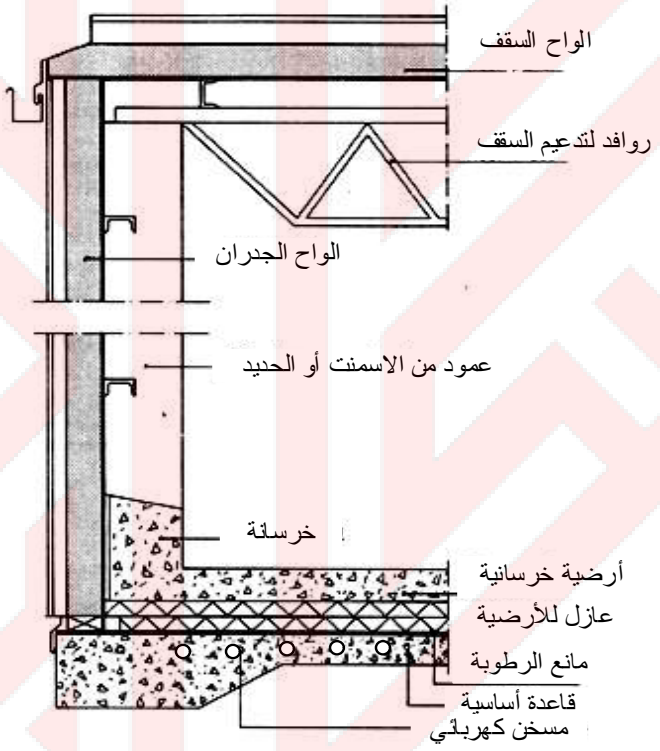
يجب مراعاة ما يلى:

1 – يجب أن تعمل مصائد تجمع ماء المطر من السطوح النهائية لمخازن التبريد والتجميد بفعالية تحت كل الظروف الجوية لتجنب إختراق الماء ووصوله إلى المادة العازلة للسطح.

2 – يجب أن يكون ميل السطح النهائى كافياً لتسهيل حركة ماء المطر.

3 – يجب أن تغطى فواصل السطح النهائى بمعجون غير منفذ للماء.

4 – يجب أن تكون مجارى تصريف مياه الأمطار على السطح الخارجى للمبنى وقابلة للصيانة وذات أقطار تسمح بتصريف ماء المطر.



الشكل 7-6/14: موانع الرطوبة مع طبقة تغليف من الخارج.

7-6/1/2/3 عزل الأرضيات (Floor insulation)

(أ) الأرضيات الخرسانية (Base slab)

تتكون البلاطة الخرسانية لأرضية مخزن التبريد والتجميد من العناصر الآتية مرتبة من الأسفل إلى الأعلى.

(1) طبقة التأسيس التحتانية.

(2) بلاطة خرسانية مسلحة.

(3) وسيلة منع تجمد الأرض أسفل مخزن التجميد(مسخن كهربائي مطمور).

(4) مانع الرطوبة.

(5) طبقة مواد عازلة للحرارة.

(6) طبقة عازلة للماء (إختيارية).

(7) طبقة أرضية سطحية.

وعند تصميم البلاطة الخرسانية المسلحة وطبقة الأرضية السطحية يجب الأخذ فى الإعتبار الحمل الأقصى الناتج من كل من التخزين وحركة رافعات التحميل وغير ذلك.

يجب أن يوضع العزل الحرارى فى طبقات متراكبة مع توجيه الإهتمام بالآتي:

(اولاً) تصميم عزل حرارى يناسب الأرضيات المحملة بالمنتج التخزينى الثابت والمتحرك ويجب ألا تقل كثافة المادة العازلة للحرارة عن $40\ kg/m^3$.

(ثانياً) درجات الحرارة داخل مخزن التبريد والتجميد.

(ثالثاً) تجنب تأثير صب الخرسانة على العازل الحرارى بوضع أغشية مناسبة بين العازل الحرارى وطبقة الأرضية السطحية النهائية (wearing floor).

(رابعاً) المحافظة على طبقات العزل الحرارى في أثناء صب طبقة الأرضية.

(خامساً) المحافظة على طبقات العزل الحرارى في أثناء تركيب هيكل وسائل التخزين المتحرك.

(ب) الأرضية السطحية النهائية (Floor)

يجب أن تكون الأرضية السطحية صلبة وذات سطح أملس، مع مراعاة ترك فواصل التمدد، وقادرة على تحمل درجات الحرارة المتقطعة والمتغيرة بدون حدوث شروخ، وذلك بإضافة المواد المناسبة عند صب الخرسانة.

(ت) مانع الرطوبة (Vapour seal)

يجب حماية العازل الحرارى للأرضيات من نفاذية الرطوبة، ويمكن تحقيق ذلك بتغطية القاعدة الخرسانية بأغشية مناسبة حاجزة لبخار الماء (البولي إثيلين) مع التأكد من تراكب الأطراف على بعضها. يجب أن تكون القاعدة الخرسانية ذات إنهاء ناعم لتجنب ثقب الأغشية [12-14].

7-6/1/3 طرائق عزل المخازن المبردة والمجمدة

(Methods of insulating cooling and freezing warehouse)

يمكن الرجوع للفقرة 7-6/1/1 (طرائق وضع العوازل) للإطلاع على تفاصيل وضع العوازل للمخازن المبردة والمجمدة الخاصة بالجدران والسقوف والأرضيات.

7-6/1/4 أبواب مخازن التبريد والتجميد (Cold store doors)

يعتبر إختيار نوع الأبواب المستعملة في مخازن التبريد والتجميد من الأمور الأساسية في التصميم وله تأثير كبير في حساب الكلفة الكلية لإنشاء المخزن. والشائع في التصميم إستعمال عدد قليل ونوعية جيدة من الأبواب. يجب أن تكون مواد العزل للأبواب مكافئة لمواد عزل جدران مخازن التبريد والتجميد ومصنعة بجودة عالية حيث أنه من الممكن أن تثبت خارج مخزن التبريد (الجهة الدافئة). ويجب أن يثبت مانع تسرب هواء مناسب حول فتحة الباب. تجهز جميع أبواب مخازن التبريد والتجميد بوسيلتين خارجية وداخلية لفتح الباب، مع تثبيت مسخن كهربائي شريطى أو وسيلة تسخين مناسبة عند حافة الباب والأرضية أسفل باب مخزن التجميد لتجنب تكون الثلج حول إطار أبواب مخازن التجميد ولمنع تكاثف بخار الماء وتجمده على الأبواب.

7-6/1/4/1 أنواع أبواب مخازن التبريد والتجميد (Types of cooling and freezing warehouse doors)

1 – مفصلى يدوى.

2 – منزلق يدوى.

3 – منزلق آلى.

أ – أفقى

ب – عمودي

يجب أن تفتح وتغلق الأبواب الآلية بسرعة. وتصمم عتبة الأبواب لتكون ملائمة للحركة المتوقعة والتغير فى درجات الحرارة. ويراعى أن تحتوى كل الأبواب على فتحة للهروب وأن تكون مجهزة بوسيلة للفتح من الداخل (عند انقطاع التيار الكهربائي) ويجب أن يحتوى المخزن على جهاز إنذار صوتى وضوئى للتنبيه فى حالة احتجاز أحد العاملين داخل المخزن.

7-6/1/4/2 أبواب شحن المنتجات (Port doors)

أبواب الشحن عبارة عن ممر مباشر من مخزن التبريد إلى سيارات التحميل خلف أرصفة التحميل ذات المحيط المغلق. ويجب أن تكون محاطة بوسادة ضد الصدمات. وتحتاج فتحات الشحن إلى منصة لتعويض الفرق فى الإرتفاع بين أرضية سيارات التحميل ورصيف التحميل. كذلك يجب مراعاة أن يكون الفناء المقابل لمخزن التبريد مائلاً بعيداً عن المخزن وبزاوية ميل تسمح بانسياب ماء المطر[15].

7−2/6 تحديد حجم المخزن المبرد والمجمد (Sizing the volume of cooling and freezing warehouse)

إن حجم المخزن المبرد والمجمد يعتمد على كمية ونوع المواد المراد تبريدها وتخزينها بحسب طريقة ترتيبها وحفظها، اذ يمكن أن تكون المواد معلقة أو في صناديق مصفوفة على رفوف.

عند تحديد الأبعاد يجب الأخذ بعين الاعتبار عدة إعتبارات منها إقتصادية أي ترتيب البضائع بشكل يتحقق معه إستيعاب جيد ومريح للمواد باسلوب تتيسر به حركة منتظمة للهواء. وهناك عدة إعتبارات ثانوية منها:

- المسافة التي تأخذها المبخرات من الغرفة.
- المسافة المتروكة فارغة في الغرف من أجل الحركة.
- المسافة بين الأعمدة.
- كثافة الترتيب وهي كمية الحمل مقدرة بالطن في المتر المكعب الواحد من فضاء المخزن.

ويمكن حساب الحجم الذي تشغله المواد الغذائية من العلاقة الآتية:

$$M = C_v \cdot V_p \qquad (1/6-7)$$

حيث أن:

M: سعة غرفة التبريد، kg

V_p: الحجم الذي تشغله المواد الغذائية، m^3

C_v: معدل التحميل الحجمي، kg/m^3، وهو يتعلق بنوعية المواد الغذائية وكيفية رصها في الصناديق.

ويعطي الجدول (7−1/6) معدلات التحميل الحجمي لبعض المواد الغذائية في مستودعات التبريد.

الجدول 7−1/6: معدلات التحميل الحجمي لبعض المواد الغذائية [16].

نوع المادة الغذائية	معدل التحميل الحجمي $C_v(k\ g/m^3)$
خضراوات	350
فواكه	400
زبدة في صناديق	800
بيض في صناديق	270
جبنة	500
لبن في زجاجات	600
لحوم مجمدة في صناديق	630
لحوم مجمدة مجزأة	400
دواجن في صناديق	350

وهناك علاقة بين معدل التحميل السطحي$C_a\ (kg/m^2)$ ومعدل التحميل الحجمي $C_v\ (kg/m^2)$ هي:

$$C_a = C_v.H_p \qquad (2/6-7)$$

حيث:

H_p: إرتفاع المواد الغذائية (m)

وفي مستودعات التبريد يفضل استعمال تصاميم المشاريع النموذجية التي لها سعات تخزين ثابتة وهي: (100-500-2000-4000-6000-10000) طن مواد غذائية.

7-6/2/1 خطوات العمل لتحديد أبعاد مستودع التبريد

(Action steps to identify cold storage dimension)

- نفرض إرتفاع المستودع H
- نعين إرتفاع المواد الغذائية H_p تبعاً لأبعاد المنصات الخشبية والصناديق والمسافات بينها.
- نفرض معامل التحميل الحجمي C_v.
- نعين مساحة الأرضية التي تشغلها المواد الغذائية Ap (m^2) من العلاقة التالية:

$$V_p = M/C_v = A_P.H_P \qquad (3/6-7)$$

نعين مساحة أرضية مستودع التبريد (A) من العلاقة الأتية:

$$A = A_P/\eta_a \qquad (4/6-7)$$

حيث:

η_a : معامل إستعمال أرضية مستودع التبريد، وهو يعتمد على بعد الصناديق أو المنصات الخشبية عن الجدران، وعلى المسافة التي تشغلها الممرات.

وبشكل عام ترص الصناديق والمنصات الخشبية على أبعاد لا تقل عن (20cm) عن الجدران ولا عن (10cm) عن أرضية الغرفة المبردة، مع جعل عرض الممرات يتراوح بين (2m – 3m) في حالة إستعمال الرافعات الشوكية. وتتوقف قيمة معامل إستعمال المستودع (η_a) على مساحة الغرفة، كما موضح في الجدول (7-6/2).

الجدول7-6/2: معدلات التحميل الحجمي لبعض المواد الغذائية ومعامل إستعمال أرضية المستودع.

نوعية الغرفة	مساحة الأرضية (m^2)	معامل إستعمال الأرضية (η_a)
صغيرة	أقل من 100	0.8-0.75
متوسطة	400-100	0.85-0.8
كبيرة	أكثر من 400	0.9-0.85

وفي حالة وجود غرفة تبريد أو تجميد معلومة أبعادها الإنشائية (طول×عرض×إرتفاع) ومطلوب تحديد سعتها نقوم بما يلي :

- نفرض أولاً أبعاد الفراغات المسموحة للتهوية بين الصناديق أو المنصات الخشبية والجدران والسقوف، وكذلك عرضاً مناسباً للممرات.
- نعين عدد الصناديق والمنصات الخشبية في الإتجاه الطولي (n_L) والعرضي (n_w) والرأسي (n_H).
- نعين العدد الكلي للصناديق والمنصات الخشبية من العلاقة الآتية: $n_T = n_L \times n_w \times n_H$
- نعين سعة الغرفة (capacity of room) من العلاقة الآتية:

Capacity of room= $n_T \times m$

- حيث (m) عبارة عن سعة الصندوق الواحد أو المنصة الخشبية الواحدة (kg).

7-6/2/2 تخطيط مستودعات التبريد (Planning of warehouse)

في أثناء تخطيط المستودعات أو المخازن الكبيرة وتوزيع الغرف يجب مراعاة ما يلي:

1. أن لا تكون غرف الحفظ مفتوحة إلى الوسط الخارجي.
2. العمل على تقليل عدد مداخل المخزن قدر الإمكان.
3. أن توزع غرف الأجهزة والإدارة والخدمة بحيث تحقق توازناً حرارياً جيداً.
4. أن تكون غرف الحفظ المتساوية والمتقاربة في درجات الحرارة متجاورة.
5. تحقيق حرية الحركة والعمل داخل المستودع وغرف الخزن.
6. أن لا تقل المسافة بين الأعمدة عن ستة أمتار وذلك لتسهيل عملية تثبيت أجهزة التثليج على الجدران.
7. يجب أن يحقق التخطيط جميع شروط الأمن الصناعي[17].

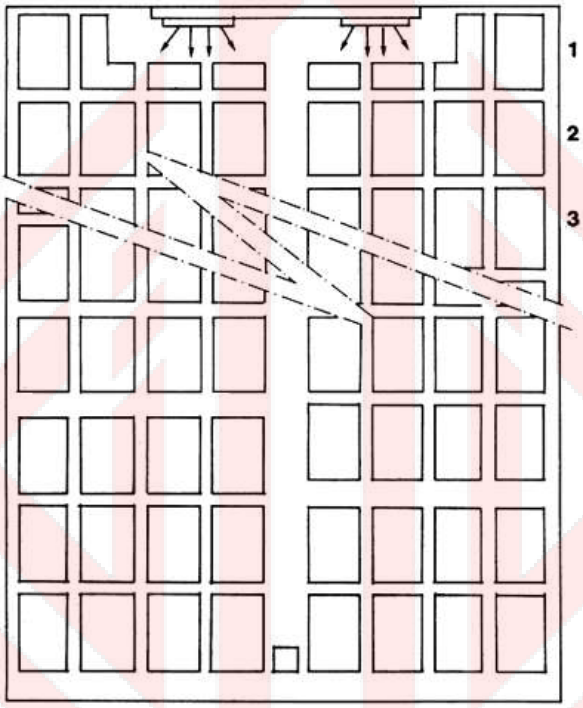
7-6/3 أنظمة توزيع الهواء داخل المخزن المبرد والمجمد (Air circulation in a warehouse)

تصَف المنتجات الغذائية داخل مخازن التبريد غير الممتلئة عمودياً بإتجاه حركة الهواء. ويبدأ بصف المنتجات بالقرب من المبردات.

تعمل المراوح آنياً مع وحدات التثليج ويوقف عملها فقط في فترة إذابة الصقيع. وتكون المراوح غالباً ذات سرعتين لتيسير ضبط حركة الهواء داخل مخزن التبريد. ويجب أن يتبع النظام المقترح لرص العبوات مع ترك مسافات بين الصفوف ومسافات أخرى بين الصفوف والجدران وتحت العبوات. أما عُرض الممرات المناسب لحركة الرافعات الشوكية فيعتمد على نوعية الرافعة وغالباً ما يتراوح بين 2-3 m. يوضح الشكل (7-6/15) طريقة ترتيب الخزين وحركة الهواء داخل مخزن التبريد.

تقاس سرعة الهواء بالمتر في الثانية خلال الفراغات في مخزن التبريد، كما تقدر أيضاً بما يسمى معامل الغرفة لحركة الهواء. وهو عدد مرات الهواء المعادل للحجم الكلي الداخلي للمخزن والذي يمر من خلال المخزن المبرد في ساعة واحدة. ويستعمل معامل الغرفة غالباً لتوصيف حركة الهواء في مخازن التبريد والتجميد في حين تستعمل سرعة الهواء لتوصيف حركة الهواء في أنفاق التبريد.

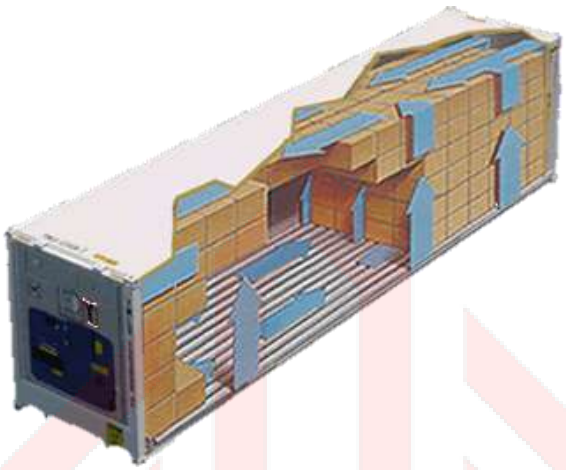
يمكن أن يؤثر ضعف دوران الهواء داخل مخزن التبريد في درجة حرارة السلع ورطوبتها النسبية. وإذا كان الهواء لايدور بشكل صحيح في غرفة التبريد فسوف تتأثر بالتأكيد مدة الصلاحية للمنتج المبرد أو المجمد، أنظر ما يبينه الشكل (7-16/6) من ترتيبات مختلفة لحركة الهواء فيما بين صناديق الخزن.



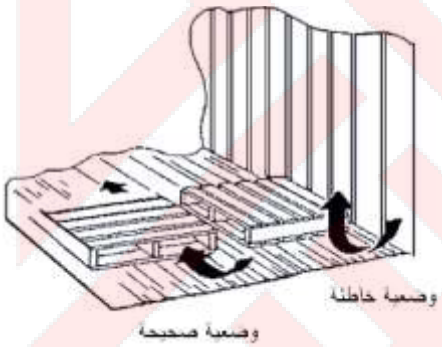
الشكل7-15/6: طريقة ترتيب الخزين وحركة الهواء داخل مخزن التبريد.

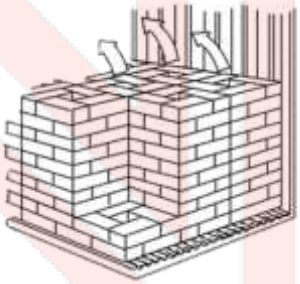
وتُصنف مخازن التبريد بحسب سعتها إلى مخازن صغيرة بسعة أقل من 100 ton ومخازن متوسطة بسعة تصل إلى 5000 ton ومخازن كبيرة تتراوح سعتها من 6000 ton إلى أكثر من ذلك بالنسبة للمخازن الكبيرة جداً.

بالنسبة للمخازن المكونة من طابق واحد فإن الطابق الواحد يسهل عملية نقل المواد مما يقلل تكلفة النقل بحوالي 30%. ويتراوح إرتفاع مخزن التبريد المكون من طابق واحد بين 3-8 m . وعند الضرورة تستعمل مخازن التبريد المكونة من عدة طوابق في حالة محدودية المساحة المحددة أو غلاء أسعارها. يوضح الجدول (7-3/6) مواصفات مخازن التبريد من حيث السعة وعدد الطوابق وعدد الغرف المقترحة والأبعاد[5].



أ- حركة الهواء والممرات بين الصناديق.





ب- حركة الهواء للمنصات الخشبية. ج- الطريقة الصحيحة لترتيب الصناديق.

الشكل7-16/6: ترتيبات مختلفة لحركة الهواء فيما بين صناديق الخزن.

الجدول 7-3/6: مواصفات مخازن التبريد من حيث السعة وعدد الطوابق وعدد الغرف المقترحة والأبعاد [5].

السعة (ton)	أبعاد الغرف				البعد بين الأعمدة (m)
	عدد الطوابق	عدد الغرف	العرض (m)	الإرتفاع (m)	
أقل من100	1	3	4-6	3.6	بدون أعمدة
250	1	4	6-12	3.6	6×6
500	1	4	6-18	4.8	6×6
1000	1	5	6-18	4.8	6×6
1500	1	6	6-18	4.8	6×6
3000	1	7	6-18	4.8	6×6 و 12×6
5000	1	9	12-24	4.8	6×6 و 12×6
10,000	1	12	12-2	4.8	6×6 و 12×6

توجد ثلاثة أنواع للرفوف هي:

1. رفوف ذات حوامل بعمق منفرد (single-deep racks)
2. رفوف ذات حوامل مزدوجة العمق (double-deep racks) وتنقسم إلى:
   - رفوف ذات إتجاه واحد
   - رفوف ذات إتجاهين

وتستعمل الرفوف مزدوجة العمق ذات الإتجاهين للمنتجات طويلة التخزين، وطويلة الأجل نظراً لفاعليتها وجودتها الإقتصادية.

3. رفوف مزدوجة إنزلاقية (double-deep drive-in racks)

وطريقة إستعمالها واضحة من إسمها، اذ تمتاز ببساطتها وعدم إحتياجها إلى رافعات معقدة، ويكثر إستعمالها في غرف التجميد بالهواء اللافح. ويوضح الشكل (7-17/6) الأنواع المختلفة لرفوف ترتيب المنتجات.

أ- رفوف أحادية

ب- رفوف مزدوجة

ج- رفوف مزدوجة إنزلاقية

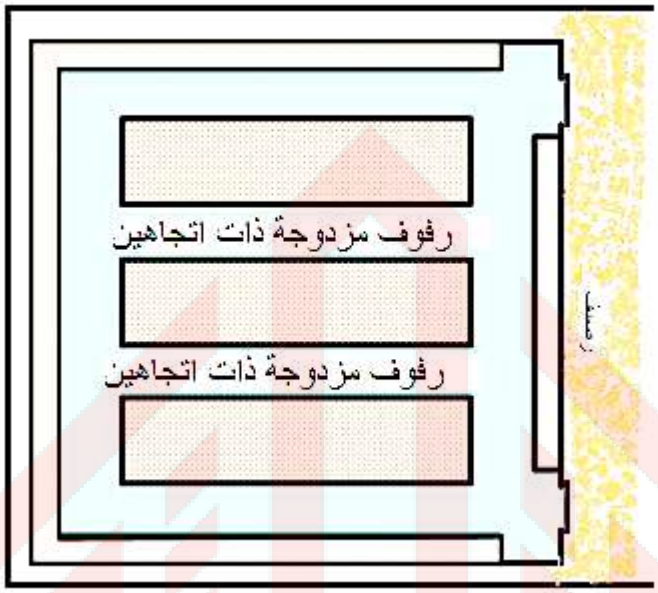
الشكل 7-17/6: الأنواع المختلفة لرفوف ترتيب المنتجات.

7-4/6 طرائق تنظيم وترتيب المنتجات داخل المخزن المبرد والمجمد

(Products organizing and arranging inside warehouse)

يعتمد ترتيب رفوف المنتجات الغذائية على الإستعمال الأمثل لحجم الخزين داخل المخزن لتسهيل عملية المناولة في أثناء رصف المنتجات. ويتوقف تصميم هذه الرفوف على إرتفاعها وعدد طبقات الرفوف والمسافة بين الرفوف والتي تعتمد بالضرورة على نوعية المنتج المخزون.

يوضح الشكل (7-18/6) تنظيم وترتيب الرفوف داخل مخزن التبريد[5].



الشكل 7-6 /11: تنظيم وترتيب الرفوف داخل مخزن التبريد.

7-7 منظومات المخازن المبردة والمجمدة (Warehouse refrigeration systems)

7-7/1 أنظمة التثليج للمخازن التقليدية (Classical refrigeration systems)

تستعمل أنظمة التثليج المباشرة في مخازن التثليج الصغيرة والمنفردة. أما أنظمة التثليج غير المباشرة فتستعمل للمنظومات الكبيرة ومستودعات التبريد وأجهزة التجميد الإنتاجية. تستعمل المبخرات المغمورة في أنظمة التثليج غير المباشرة ويكون لها خزان تدفق (surge drum) ويتحكم فيها بواسطة صمامات التمدد الحراري أو قد تستعمل المبخرات مع أوعية تخزين (accumulators) ويدفع وسيط التثليج (مائع التثليج الثانوي) في هذه الحالة بواسطة مضخة.

يستعمل هذا النظام في حالة أحمال التثليج العالية كمجمدات المواد بالهواء اللافح. ويفضل هذا النظام مع غرف وحدات التجميد (room unit coolers) ذات الدفع القسري (forced air circulation).

يتميز نظام التثليج غير المباشر الذي يعمل بإستعمال المحاليل الملحية بسهولة تشغيله وسهولة التحكم فيه بالإضافة لميزة إنعدام تسرب وسيط التثليج في غرف التخزين. كما يفضل إستعمال هذا النظام في حالة وجود مبخرات لوحية وفي أنظمة التثليج المنتشرة على مساحات واسعة.

إن إرتفاع التكلفة الإبتدائية وتكلفة التشغيل لنظام المحاليل الملحية جعل إستعمالها نادراً للمنشآت الجديدة. أما الأنظمة المركزية فتستعمل الأمونيا كمائع تثليج. وبالرغم من إرتفاع التكلفة الإبتدائية لأنظمة الهالوكوربونات وإرتفاع تكلفة تشغيلها مقارنة بأنظمة الأمونيا، غير أن هذه الموائع (الهالوكوربونات) ذات جدوى في بعض التطبيقات. ومع ذلك يظل إستعمال الأمونيا أكثر قبولاً حالياً بسبب التأثير السلبي للهالوكوربونات على طبقة الأوزون.

تستعمل الضواغط اللولبية لأنظمة التثليج ذات السعة العالية 300 ton تثليج وأكثر لإنخفاض تكلفتها الأساسية وإنخفاض عملية صيانتها مقارنة مع الضواغط الترددية.

من الضروري وجود نظام تشغيل آلي في مخازن التثليج لأجل التحكم بواسطته في درجات حرارة المخازن المختلفة وإذابة الصقيع وتوقيف النظام فوراً في حالة حدوث عطل أو خلل في إحد أجهزة التثليج.

تصمم أجهزة التثليج على أساس أقصى حمل تثليج كما يجب أن تتواجد هناك وحدتان أو أكثر من كل منظومة حتى يتحقق التشغيل بصورة إقتصادية في حالة أحمال التثليج الجزئية ولضمان إستمرار التشغيل في حالة توقف إحداها.

يستعمل الإنضغاط متعدد المراحل (multi-stage compression) في هذه الأنظمة عندما تكون درجة الحرارة $-18^{o}C$ أو أقل.

يعتبر إستعمال وحدات التثليج المجمعة ذات المكثفات المبردة الأكثر شيوعاً خصوصاً في مخازن التبريد الصغيرة وذلك بسبب إنخفاض تكلفتها الإبتدائية وعدم الحاجة لغرفة منفصلة للآلات. ولكنها أكثر إستهلاكاً للطاقة وأكثر تكلفة للتشغيل والصيانة وعمرها الإفتراضي أقل إذا ما قورنت بالأنظمة المركزية[5].

7-2/7 أنظمة تثليج النقل المبرد والمجمد (Cooling and freezing transportation)

تنقل المنتجات الغذائية المبردة والمجمدة من مكان إلى آخر بعدة وسائل وهي:

- الشاحنات
- السكك الحديدية
- السفن
- الحاويات

وتشمل الوسائل المذكورة على أنظمة تبريد يمكن وصفها على النحو الآتي:

1. أنظمة تبريد الشاحنات

ويتحقق تبريد الشاحنات بالطرائق الآتية:

أ- الثلج

ب- الثلج الجاف (تجميد الثلج وضغطه مع ثنائي أوكسيد الكربون)

ج- النايتروجين وثنائي أوكسيد الكربون

د- الألواح الباردة

هـ- التبريد الميكانيكي

2- أنظمة تبريد السكك الحديدية:

تبرد المنتجات الغذائية بواسطة وحدة تبريد ميكانيكية توضع في نهاية عربة القطار وتشغل بواسطة مولد كهربائي.

3- أنظمة تبريد السفن

يستعمل نظام التبريد الميكانيكي ويكون هذا النظام ضخماً ويصل إلى مئات الأطنان من التبريد بالنسبة للسفن الكبيرة التي تبقى لمدة طويلة في عرض البحر لإصطياد الأسماك وحفظها، ويجب أن تجهز السفينة بنظام للتجميد السريع للمحافظة على لون ورائحة الأسماك.

4- أنظمة تبريد الحاويات

تستعمل الحاويات المبردة في شحن ونقل المنتجات الغذائية في العديد من مواضع الاستعمال منها السفن والطائرات. وهذه الحاويات لها نظام تبريد مستقل يشغل في الميناء أو داخل السفينة حيث يوصل بنظام الكهرباء الموجود داخل السفينة. يجب وضع هذه الحاويات داخل السفينة بحيث يضمن تيار هواء كافٍ لتبريد المكثفات. أما الحاويات التي تنقل المنتجات جواً لضمان سرعة وصولها للسوق مثل الزهور، فلا يوجد بها نظام للتبريد نظراً لثقل وزن مكونات منظومة التبريد، وعندما يحتاج المنتج للتبريد خلال الرحلة فإنه يستعمل الثلج أو الثلج الجاف. تصمم هذه الحاويات خصيصاً بحيث يَسُهل دخولها إلى عنابر الشحن في الطائرة[5].

8-7 خصوصيات منظومات التثليج للمخازن (Refrigeration system for freezing warehouse)

1/8-7 الضواغط (Compressors)

هنالك أربعة أنواع من الضواغط شائعة الإستعمال حالياً في منظومات التثليج الصناعي وهي كالآتي:

1. ضاغط مفتوح – يدار بواسطة حزام ناقل (بسرعة واطئة- متوسطة rev/min 700 - 500)
2. ضاغط مفتوح – يدار بواسطة حزام ناقل (بسرعة متوسطة،rev/min 1750 أو rev/min 1160)
3. ضاغط نصف مفتوح (semi-hermetic) (بسرعة rev/min 1750- rev/min 500)
4. ضاغط مغلق (hermetic) (3500 rev/min)

يجب تصنيف الضواغط إلى ضواغط ضغط عالٍ أو ضغط منخفض وتوضع ضواغط الضغط العالي معاً وضواغط الضغط المنخفض بجهة أخرى، كما تعمل أرضية خرسانية لوضع الضواغط عليها لمنع الاهتزازات والحفاظ عليها من أي سوائل في الأرضية.

إن إختيار نوع الضاغط المستعمل في المنظومة قضية تتعلق بالمصمم ولكن يجب أن يدرك أن مدة عمر الضاغط تقل مع زيادة السرعة وزيادة درجة حرارة المكثف.

بالنسبة للاستعمالات الصناعية لمخازن التثليج فإن الضاغط يستعمل عادة مع مكثفات من النوع التي تكون مبردة بالهواء. وكذلك تستعمل مع المكثفات المبردة بالماء وأحياناً مع المكثفات التبخيرية.

عندما يوجد أكثر من ضاغط يعمل على التوازي يجب تركيب صمامات بإتجاه واحد في خط الضغط. تستعمل الضواغط اللولبية لأنظمة التبريد ذات السعة العالية (200 طن تبريد أو أكثر) وذلك لإنخفاض تكلفتها الأساسية وإنخفاض تكلفة صيانتها بالمقارنة مع الضواغط الترددية. تصمم أجهزة التبريد على أساس أقصى حمل تبريد. كما يجب أن تتواجد هناك وحدتان أو أكثر من كل منظومة حتى يتحقق التشغيل بصورة إقتصادية في حالة أحمال التبريد الجزئية ولضمان إستمرار التشغيل في حالة توقف إحداهما.

يستعمل الإنضغاط متعدد المراحل (multi-stage compression) في هذه الأنظمة عندما تكون درجة الحرارة $-18^{o}C$ أو أقل من ذلك.

7-8/1/1 أنابيب خط السحب للبخار الجاف من وعاء التراكم إلى الضاغط

يجب مراعاة الآتي في هذه الأنابيب:

- يركب خط السحب الأفقي بانحدار قيمته 200/1 لجهة فاصل السائل.
- قبل عمل أي خط رأسي لابد من عمل مصيدة سائل أفقية على إرتفاع 3m لإن تركيب مصيدة للزيت (oil trap) أسفل الأنبوب الرأسي بالقرب من الضاغط يمنع رجوع الزيت إلى الضاغط.

7-8/2 المبخرات (Evaporators)

إن مقدار الفراغات بين الزعانف الموجودة على سطح ملف المبخر يجب أن يؤخذ بنظر الإعتبار لكل استعمال. حيث أن عدداً كثيراً من الزعانف (144 زعنفة لكل 30 سم) يزيد من سعة الملف، إلا أنه يسبب مشاكل تجمع الأوساخ والتجمد على سطح ملف المبخر.

عندما يحدد حجم مخزن التثليج والأحمال الحرارية للمنتج، يختار نوع المبخر الذي يلبي متطلبات موضع الاستعمال. وهذا الإختيار يعتمد على عدة عوامل هي:

- درجة حرارة المخزن
- الرطوبة النسبية
- سرعة الهواء
- حجم وشكل المخزن

7-8/2/1 إختيار نوع المبخر وفرق درجات الحرارة والرطوبة النسبية

(Selection of evaporator, temperature difference and relative humidity)

عند إختيار المبخر، فإن الفرق في درجات الحرارة بين مخزن التثليج ودرجة حرارة خط السحب هو الذي يحدد الرطوبة النسبية داخل المخزن (بإعتبار أن ليس هناك تسرب من داخل مخزن التثليج). عندما يكون الفرق في درجات الحرارة بين مخزن التثليج ودرجة حرارة خط السحب قليلاً فهذا يعني حجم مبخر أكبر ورطوبة نسبية عالية، وبخلافه، عندما يكون الفرق كبيراً، فهذا يعني تقليل حجم المبخر وهبوطاُ في الرطوبة النسبية. ويمكن أن يستعمل الجدول (7-8/1) دليلاً على ذلك.

الجدول 7-1/8: درجات الحرارة والرطوبة النسبية داخل مخزن التثليج.

الرطوبة النسبية (%)	فرق درجات الحرارة (^oC)
أكثر من 90	8
80-90	10
70-80	15
50-70	20

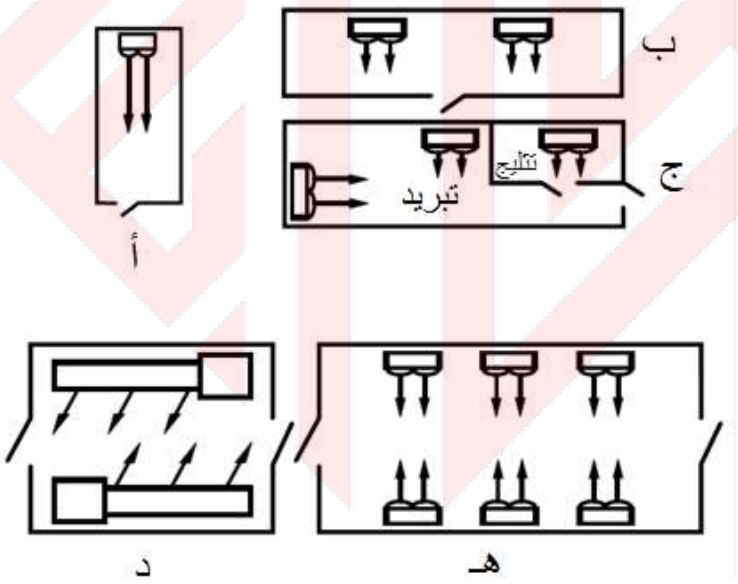
يسبب الهبوط الحاد في الرطوبة النسبية فقدان وزن المنتج وفساد سطحه الخارجي. في حين أن زيادة عالية للرطوبة النسبية تسرع في نمو البكتريا وتغطي السطح بسائل لزج مقرف.

7-2/2/8 طرائق تنظيم المبخرات داخل مخزن التثليج (Evaporators organization in cold store)

إن طرائق تنظيم وتوزيع المبخرات ذات أهمية بالغة في مخازن التليج، لذا يجب إتباع القواعد العامة التالية:

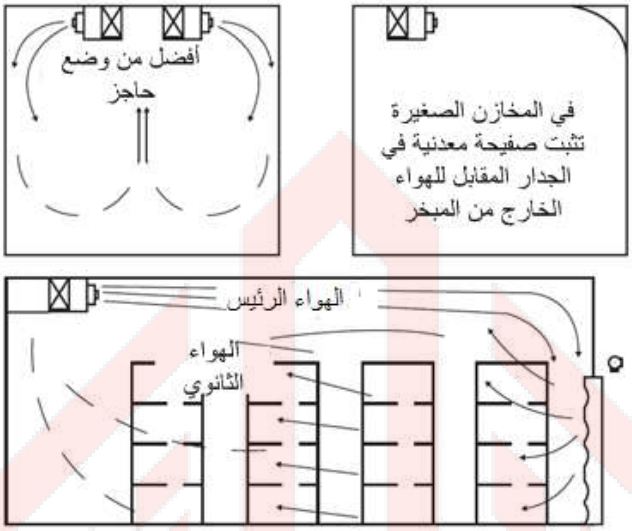
1. إن نمط توزيع الهواء يجب أن يغطي كل أرجاء المخزن.
2. إن لا توضع المبخرات فوق أبواب المخزن.
3. يجب معرفة موقع منصات التحميل والممرات.
4. أن يوضع المبخر قريباً من الضاغط لتقليل أطوال الأنابيب.
5. أن يوضع المبخر قريباً من تصريف ماء التكثيف لتقليل أطوال أنابيب الماء المتكثف.

إن حجم مخزن التبريد وشكله يحددان أو يفرضان نوع المبخر وموقعه. يبين الشكل (7-1/8) بعض الأمثلة.



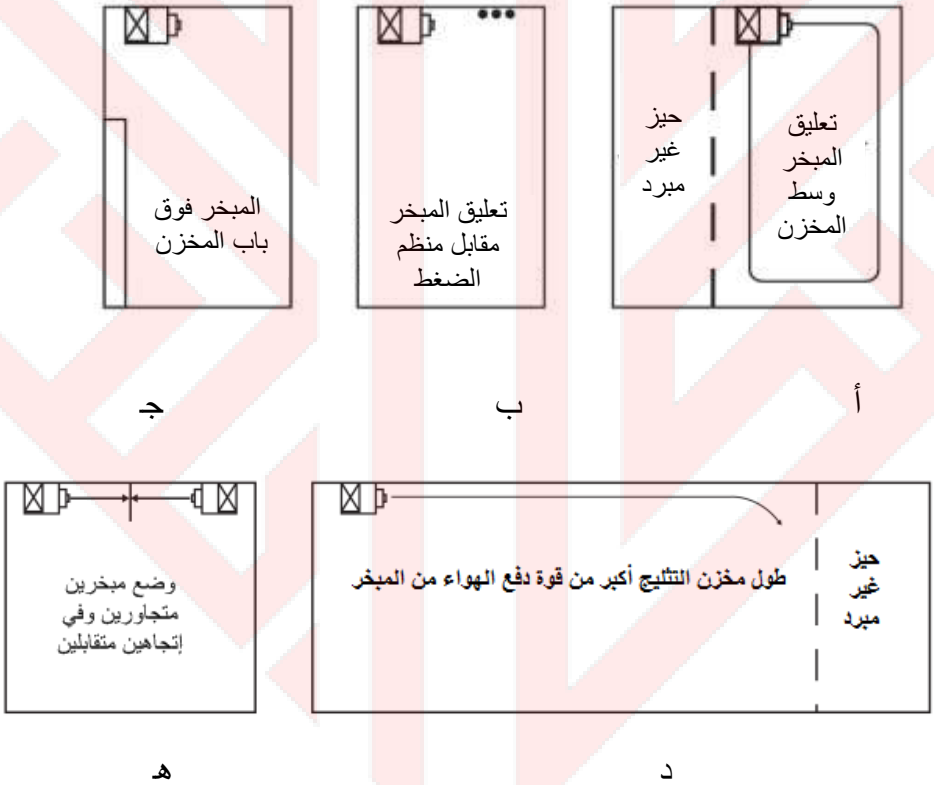
الشكل 7-1/8: موقع المبخرلمخازن تبريد ذات أحجام مختلفة واشكال متنوعة.

بالنسبة للمبخرات التي تُعلق على جدران مخزن التثليج، يفضل أن تُوضع في مكان يضمن سهولة وحرية حركة الهواء الخارج من المبخرات كما مبين بالشكل (7-2/8).



الشكل 7-2/8: موقع المبخر المعلق على جدران مخزن التثليج وحركة الهواء.

يجب تجنب تعليق أو وضع المبخر في الأماكن المبينة في الشكل (7-3/8) داخل مخزن التثليج.



الشكل 7-3/8: أماكن يجب تجنبها لتعليق المبخر داخل مخزن التثليج.

7-3/8 أنابيب إذابة الجليد (Defrosting piping)

إن تراكم الجليد على سطح المبخرات داخل مخزن التثليج يؤدي إلى إنخفاض مستمر في قدرة منظومة التثليج على التبريد، لذا يجب إزالة الجليد المتراكم بصورة دورية ومستمرة. وتتحقق عملية إزالة الجليد المتراكم من سطح المبخرات بالتذويب. وهناك عدد من الوسائل المتاحة لإزالة الجليد منها المسخنات الكهربائية وإطفاء المنظومة والسوائل الثانوية والمياه والغازات الساخنة والتذويب المستمر برش سوائل مجففة (sprayed liquid desiccants).

تتحقق إزالة الجليد بالمسخنات الكهربائية بربط المسخن حول أنابيب المبخر لتدفئة سطح المبخر بصورة كافية تضمن ذوبان الجليد. بالنسبة للمبخرات ذات درجات الحرارة فوق التجميد فإن إطفاء المنظومة وعدم وصول مائع التثليج الى المبخر مع بقاء المروحة تعمل يضمن إزالة الجليد. في حالة إستعمال سائل ثانوي فإنه يمرر من خلال ملفات إزالة الجليد لرفع درجة حرارة سطح المبخر وبذلك تنجز عملية إذابة الجليد. وعند استعمال الماء يوقف ضخ مائع التثليج ويرش رذاذ الماء على السطح الخارجي للمبخر فتتحقق إزالة الجليد.

يمكن إعتبار الإذابة بإستعمال الغازات من أسرع وأجود الطرائق في حالة توافر الغازات الساخنة. فإضافة إلى إذابة الجليد تؤدي الغازات الساخنة إلى تنظيف ملف المبخر وتجميع زيت الضاغط، الذي بدوره يساعد في رجوع الزيت إلى الضاغط.

7-4/8 المكثفات التقليدية (Traditional condensers)

ان اختيار نوع المكثف يخضع لإعتبارات وعوامل متعددة ترجع إلى نوع النظام المستعمل والمناخ الذي يعمل فيه المكثف. الإختيار يجب أن ينفذ من قبل مهندس كفء له علم بكل المعلومات المتعلقة بالمشروع.

يُفضل إستعمال المكثفات المبردة بالهواء بإعتبارها الخيار الأول، لأنها إقتصادية في التشغيل وسهلة التنصيب وقليلة الضوضاء. كذلك يمكن إستعمال المكثفات المبردة بالهواء كوحدات متكاملة في مخازن التثليج. ويمكن إستعمال أحجام كبيرة من هذه المكثفات في حالة عدم إقتصادية إستعمال المكثفات التي تبرد بالماء بسبب الكلفة الباهضة أو عدم توافر الماء أو عدم ملاءمته. معظم أنواع المكثفات المبردة بالهواء تتراوح سعة تبريدها بين 2 -100 ton (7-352 kW) .

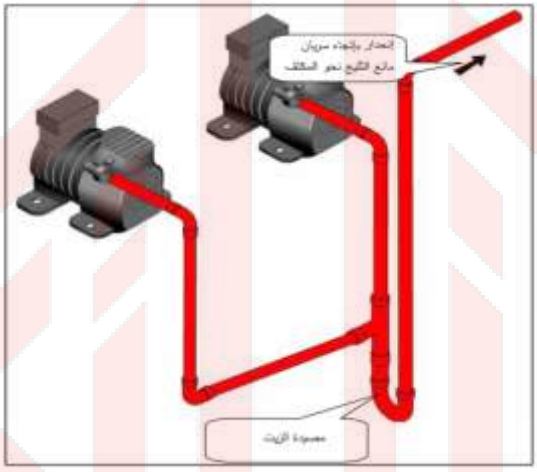
بالنسبة للمكثفات التي تبرد بالماء من نوع الإسطوانة والأنابيب فيمكن أن تستعمل، فهي أكثر فعالية من المكثفات المبردة بالهواء، لكن يجب الأخذ بنظر الإعتبار تهيئة مكان كافٍ لنصب أبراج التبريد.

7-5/8 أنابيب مائع التثليج البارد والساخن (Hot and cold refrigerant lines)

عند تصميم منظومة التثليج يجب مراعاة الأمور الآتية لأنابيب مائع التثليج البارد والساخن:

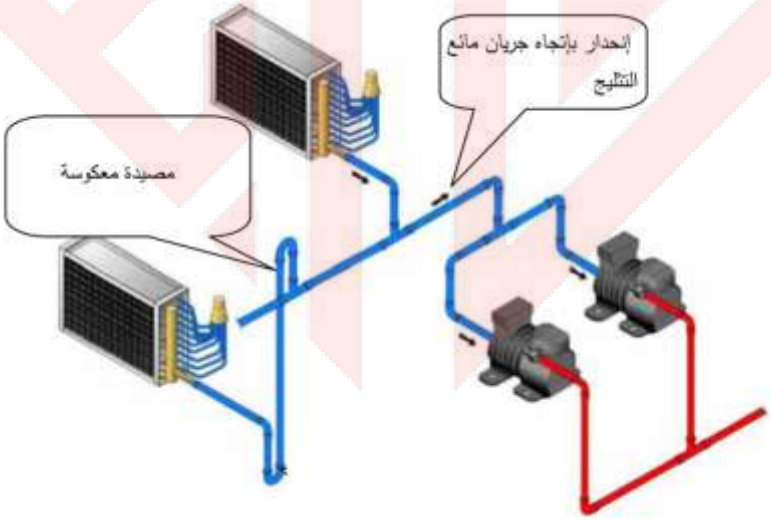
- عزل أنابيب مائع التثليج البارد (خط السحب) وأنابيب السائل بإستعمال عازل مانع للرطوبة.
- تجنب عزل أنابيب مائع التثليج الساخن (خط الدفع) وتركه معرضاً للمحيط الخارجي.
- نصب الأنابيب بدقة لضمان تقليل الاهتزازات التي تسبب الضوضاء وتلف الأنابيب.

- خط الدفع يحمل بخار مائع التثليج والزيت معاً، وبما أن مائع التليج يتكثف في أثناء توقف المنظومة، لذا يجب تصميم الأنابيب بطريقة تضمن تجنب رجوع مائع التثليج والزيت إلى الضاغط. تستعمل المصيدة لحبس الزيت وتكثيف مائع التثليج. اما إنحدار أو ميلان خط الدفع فيجب أن يكون 10.4 mm/m بإتجاه سريان مائع التليج نحو المكثف. أنظر الشكل (7-4/8).



الشكل 7-4/8: ترتيب أنابيب الدفع ومصيدة الزيت.

- في أثناء التشغيل يكون خط السحب ممتلئاً بمائع تثليج محمص مع زيت. ويتحرك الزيت بإتجاه سريان مائع التثليج. وقد يتكثف مائع التثليج عند توقف المنظومة عن العمل فيسبب الزيت ضربات إذا تم سحب مائع التثليج من قبل الضاغط مع بداية التشغيل. لذلك لضمان رجوع الزيت تستعمل مصيدة معكوسة لهذا الغرض ويجب أن يكون مقدار إنحدار أو ميلان خط السحب 10.4 mm/m بإتجاه سريان مائع التليج. أنظر الشكل (7-5/8)[4].



الشكل 7-5/8: إنحدار خطوط السحب في منظومة التثليج.

7-8/6 غرفة الآلات (Machine room)

يفضل أن تكون غرفة الآلات لمنظومات التثليج للمخازن المبردة والمجمدة ملاصقة للمخزن لإختصار أطوال أنابيب مائع التثليج ولتحسين فعالية أداء الأجهزة وتقليل التكلفة الاستثمارية وتكلفة الأداء. وهناك أيضا بعض الاشتراطات التي يُفضل مراعاتها في هذه الغرفة وهي:

7-8/6/1 مساحة الغرفة (Area of the room)

يجب أن تكون مساحة غرفة الأجهزة كافية طبقاً لمتطلبات الجهة المصنعة لإستيعاب الأجهزة المطلوبة وبحيث تتوافر مساحات كافية لتنصيب وصيانة الأجهزة. ويجب أن تبعد الأجهزة مثل (الضواغط والخزانات... والخ) بمقدار لا يقل عن متر عن الجدران لتوفير الأمان أو بحسب اشتراطات جهة التصنيع. ويوصى بترك مسافات إضافية لتسهيل الصيانة والفك والتركيب، كما يجب الأخذ في الاعتبار احتياجات الفنيين للمرور بسهولة لتشغيل ومراقبة أجهزة التحكم.

7-8/6/2 إرتفاع الغرفة (Room height)

يجب أن يكون ارتفاع غرفة الآلات كافياً لإستيعاب كافة الأجهزة مع ملاحظة المتطلبات الخاصة ببعض هذه الأجهزة من حيث ارتفاعاتها الكبيرة. كذلك يجب أن تكون الغرفة مرتفعة بما يكفي لاحتواء الانحناءات في أنابيب الدفع والسحب، التي تتصل بالأجهزة المختلفة في الغرفة بحسب اشتراطات جهة التصنيع. كما إن الإرتفاع المناسب يؤدي إلى حسن تهوية هذه الغرفة.

7-8/6/3 أرضية وجدران الغرفة (Floor and room walls)

يجب أن تكون أرضية الغرفة من بلاط مقاوم للزيوت والشحوم والحوامض حتى يمكن تنظيفه دورياً بالمياه والمنظفات، كما يجب أن يراعى وجود إنحدار بأرضية الغرفة لتسهيل تصريف المياه عن طريق بالوعات صرف كافية وفي أماكن مناسبة. ويجب أن تكون جدران الغرفة مغطاة بارتفاع مناسب بالسيراميك أو ما يماثله للحفاظ على نظافتها.

يجب مراعاة وضع كل الأجهزة بطريقة مناسبة لسهولة التشغيل مع الأخذ في الاعتبار ترتيبها من حيث تسهيل مسار أنابيب مائع التثليج السائل والبخار من الجهاز وإليه.

وهنالك بعض الخصوصيات الواجب توافرها في منظومات تثليج المخازن فيما يخص الأجهزة الأساسية داخل غرفة الآلات وتشمل الضواغط ولوحة التحكم والأسلاك الكهربائية ومستقبل الزيت والأنابيب.

ويجب أن تجهز الغرفة بمستلزمات الأمن الصناعي والأقنعة الخاصة بالنشادر(عند إستعماله كمائع تثليج للمنظومة)، كذلك أجهزة الكشف عن تسرب مائع التثليج. ويمكن أن يُلحق بغرفة الآلات غرفة خاصة بالعدد والآلات والأدوات اللازمة لأعمال الصيانة. أما الأجهزة الأساسية خارج غرفة الآلات فتشمل المكثف المبرد بالهواء وجهاز إستخراج الهواء من الدائرة والأنابيب والأسلاك الكهربائية.

مراجع الباب 7

[1] Singh, R. P., "***Introduction to Food Engineering***", Fourth Edition, 2009.

[2] Keenth J., Valentas, E. R. and Singh, R. P., ”***Handbook of Food Engineering Practice***”, CRC Press, 1997.

[3] Johnston,W.A, Nicholson,F.J, Roger A. and Stroud,G.D.,“***Freezing and Refrigerated Storage in Fisheries",*** FAO, 1994.

[4] ASHRAE, “***2010 ASHRAE Handbook : Refrigeration***”, Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A.,2010.

[5] Cano-Monoz,G., "***Manual on Meat Cold Store Operation and Management***", FAO Animal Production and Health Paper 92, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1991.

[6] Rome G. H., Hundy**,** A. R., Trott,T and Welch**, C., "*Refrigeration and Air-Conditioning*",** Fourth Edition, 2008.

[7] Airah, K., "***Air Conditioning and Refrigeration Industry Refrigerant Selection Guide***", 2003.

[8] Stoecker, F., "***Industrial Refrigeration Handbook***", The McGraw-Hill Company, 2004.

[9] Dick, W., "***Commercial Refrigeration for Air Conditioning Technicians***", Second Edition, 2010.

[10] Emerson Climate Technologies, Refrigeration Manual, Part 3 – “***The Refrigeration Load”***, 1967.

[11] Ramesh, P., " ***Designing a Cold Storage and it's Refrigeration System",*** ISHRAE,2005.

[12] Ronald, A. and Cole, P.E., "***Cold Storage Warehouses - An Engineering Overview***", Seattle, Washington 98119.

[13] Unified Facilities Criteria (UFC), "***Design: Refrigeration Systems for Cold Storage***", 2002.

[14] Carrier Corporation, "***Refrigeration Selection Guide***", www.totaline.com.

[15] ASHRAE, “***2010 ASHRAE Handbook : Fundamentals”***, Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A., 2010.

[16] Heatcraft Refrigeration Products LLC, "***Commercial Refrigeration Cooling and Freezing Load Calculations and Reference Guide,***" www.heatcraftrpd.com.

[17] Navfac, C., " ***Cold-Storage Rooms (Prefabricated Panel Type)***", UFGS- 2006.

الباب 8

منظومات التثليج متعددة الضغط (Multi Pressure Refrigeration Systems)

منظومات التثليج متعددة الضغط هي منظومات لها ضغطان منخفضان او اكثر. والضغط المنخفض هو الضغط المقاس بين أداة التمدد ومدخل الضاغط لكل مرحلة انضغاط. وقد يكون سبب فرق الضغط إما وجود عدة أدوات تمدد أو بضعة ضواغط مع عدة وسائل تمدد أو عدة موائع تثليج بدرجات غليان متفاوتة. في حال استعمال عدة ضواغط يفصل غاز التذرير عادة بعد كل مرحلة تمدد عن سائل مائع التثليج، اضافة الى تقليل أو إلغاء التحميص من بخار مائع التثليج قبل دخوله مرحلة الانضغاط التالية باستعمال مبرد بين كل مرحلتي انضغاط.

8-1 المنظومة التعاقبية الآنية (ذات الضاغط الواحد والمبخر الواحد) (Auto cascade system)

تسمى المنظومات التعاقبية بالآنية إذا احتوت على خليط من مائعي تثليج أو أكثر تختلف درجة غليانهما بشكل ملحوظ مع ضاغط واحد ومبخر واحد. وتتكون الضغوط المختلفة في المنظومة بسبب فصل بخار مائع التثليج ذي درجة حرارة الغليان العالية عن سائل مائع التثليج ذي درجة الغليان المنخفضة في فاصل الطور. تحتوي المنظومة التعاقبية الآنية على سلسلة من المبادلات الحرارية ذات الجريان المتعاكس مع عدة فواصل للطور. يتميز هذا النوع من الدورات بانخفاض نسبة الانضغاط مع زيادة في الفاعلية الحجمية للضاغط. يتحدد عدد مراحل الدورة التعاقبية الآنية بعدد موائع التثليج في الدورة، فالدورة التي تحتوي على مائعي تثليج تكون ثنائية المراحل وهكذا [1] . ويمكن ان تصل درجة حرارة المبخر الى ($-60\ ^{o}C$) ونسبة الانضغاط الى 5:1.

8-1/1 الاعتبارات التصميمية (Design considerations)

8-1/1/1 سعة الضاغط (Compressor capacity)

يستهلك جزء كبير من شغل الضاغط في عمليات التبخر والتكثف المتكررين، مما يؤدي الى انخفاض في سعة المبخر نسبة الى شغل الضاغط. وهذا يستدعي اختيار ضواغط بسعات كبيرة نوعاًما.

8-1/1/2 حجم المبادل الحراري (Heat exchanger capacity)

يجب أن تتيسر مساحة كبيرة للتبادل الحراري في المبادلات الحرارية بين مائعي التثليج في جهتي الضغط العالي والواطئ وذلك بسبب انخفاض معامل انتقال الحرارة الاجمالي لاحتواء الدورة كميات كبيرة من بخار مائع التثليج.

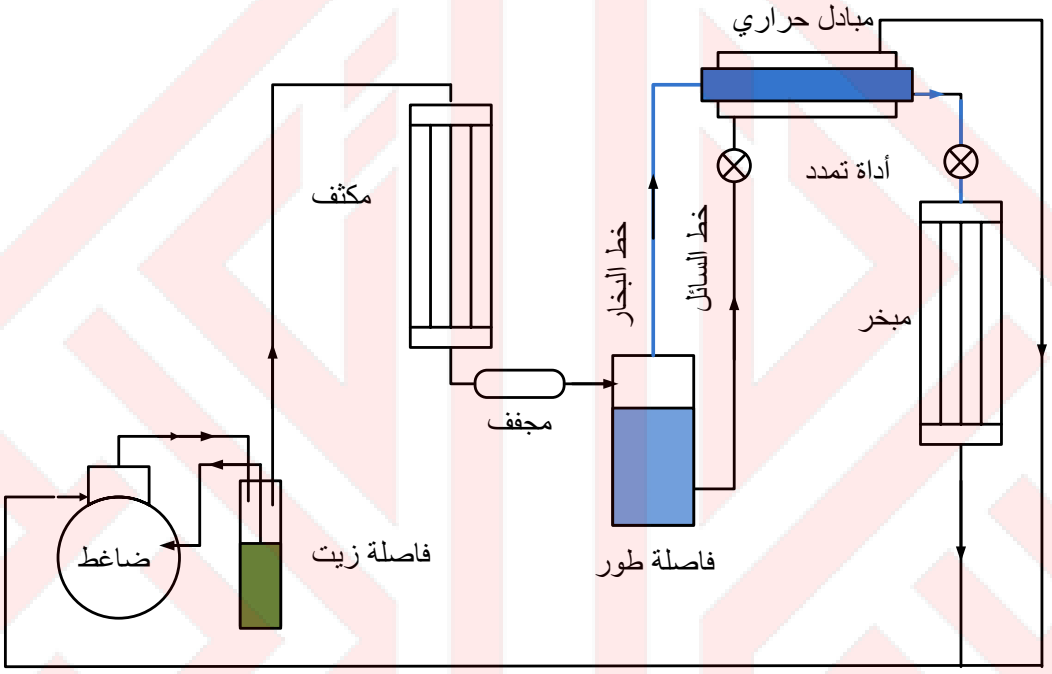
8-1/1/3 أداة التمدد (Metering device)

تصمم كل أداة تمدد بحيث تحقق التثليج الكافي للمبادل الحراري المجاور.

8-1/2 أنواع المنظومات التعاقبية الآنية (Types of cascade system)

8-1/2/1 المنظومات التعاقبية الآنية البسيطة (Simple auto cascade system)

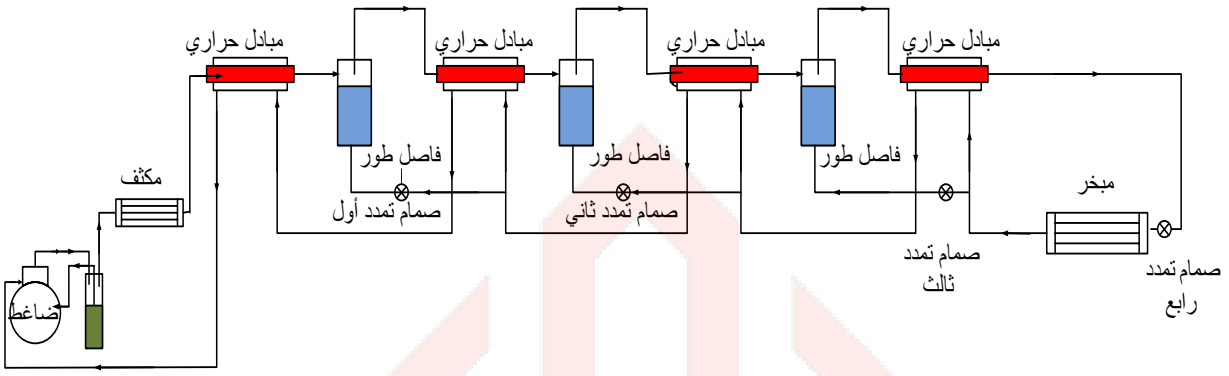
يضغط فيها مائعا تثليج بدرجتي غليان مختلفتين في ضاغط واحد. ومن بين الخلائط المستعملة فيها مائع التثليج R-23 بدرجة غليان تساوي (-82 ^{o}C) مع المائع R-404A بدرجة غليان مقدارها (-46.7 ^{o}C). يمكن باستعمال هذه الدورة أن تحقق درجة حرارة تساوي (-60 ^{o}C) مع نسبة انضغاط قليلة تساوي 5:1 وضغط دفع بحدود 1525 kPa. ويبين الشكل (8-1/1) منظومة تثليج تعاقبية آنية بسيطة.



الشكل 8-1/1: منظومة تثليج تعاقبية آنية بسيطة.

8-1/2/2 المنظومات التعاقبية الآنية رباعية المراحل (Four-stage auto cascade system)

يمكن تطوير المنظومة التعاقبية الآنية البسيطة الى منظومة رباعية المراحل وكما مبين في الشكل(8-1/2)، حيث تتكون من مكثف واحد ومائع تثليج يتمدد بشكل متتال مما يحقق تبريداً كافياً لتكثيف مائع التثليج في المبادل الحراري التالي. تستمر هذه العملية حتى مرحلة التثليج الأخيرة التي تتضمن غليان آخر مائع تثليج الذي هو عند أقل درجة غليان لتتحقق حالة التثليج بدرجة الحرارة المطلوبة.



الشكل 8-2/1 : منظومة تعاقبية آنية رباعية المراحل.

8-2 منظومة التثليج متعددة الضغط (ذات الضاغط الواحد مع أكثر من مبخر)

(Multi-evaporator system)

يستعمل فيها ضاغط واحد لخدمة مبخرين او اكثر يعملان عند درجات حرارة مختلفة. ويعمل الضاغط عند ضغط سحب يساوي ضغط التشبع لأقل درجة حرارة في الدورة، ويستعمل صمام منظم للضغط بعد كل مبخر عامل عند درجات الحرارة العالية. من عيوبها انها عند توقف الضاغط ترتفع درجة حرارة جميع المبخرات العاملة الى درجة حرارة لاتتناسب مع درجة الحرارة التصميمية للمبخرات[2]. تقسم الى:

8-2/1 منظومة متعددة المبخرات تعمل عند درجة حرارة واحدة

(Multi-evaporator system operating at the same temperature)

تشابه منظومة التثليج البسيطة في عملها وتحتوي على ضاغط واحد وأداة تمدد واحدة تخدم مبخرين أو اكثر. تتساوى درجات حرارة المبخرات العاملة ويمكن أن يكون الحمل الحراري لكل مبخر متساوياً أو مختلفاً وتستعمل هذه المنظومة لخزن عدة أنواع من الأطعمة عند درجة الحرارة نفسها مع وجود حاجة لعزل المنتج الواحد عن الآخر لمنع انتقال الروائح الخاصة لكل منتج أو لخزن المواد المسترطبة. يختلف معدل تدفق كتلة مائع التثليج لكل مبخر بحسب الحمل الحراري للمبخر. ويبين الشكل (8-2/1) منظومة تثليج متعددة المبخرات مع تساوي درجة حرارة المبخرات.

8-2/2 منظومة متعددة المبخرات تعمل عند درجات حرارة مختلفة

(Multi-evaporator system operating at different temperatures)

تعمل هذه المنظومة بضاغط واحد ولكن مع عدة مبخرات كل منها بدرجة حرارته الخاصة به وتقسم الى مايلي[3] :

8-2/2/1 منظومة متعددة المبخرات تعمل عند درجات حرارة مختلفة وصمامات تمدد مستقلة

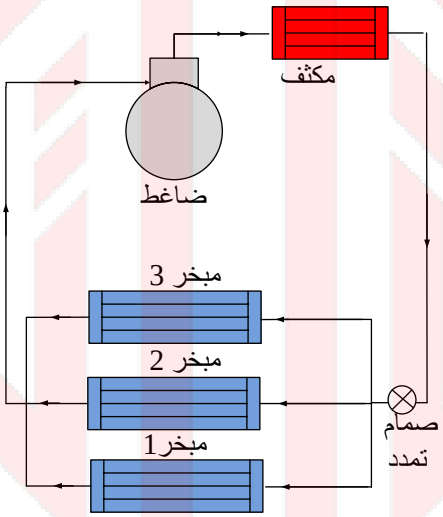
(Multi-evaporator system with individual expansion valve operating at different temperatures)

تستعمل صمامات تمدد خاصة لكل مبخر، حيث أن كل صمام تمدد يختار نسبة الى ضغط المبخر العامل. ويوزع معدل تدفق كتلة مائع التثليج بحسب الحمل الحراري للمبخر، في حين أن درجة حرارة المبخر تحدد بحسب اختيار صمام التمدد، أي أن لكل مبخر صمام تمدد خاص به. ويبين الشكل (8-2/2) منظومة متعددة المبخرات تعمل عند درجات حرارة مختلفة وصمامات تمدد مستقلة.

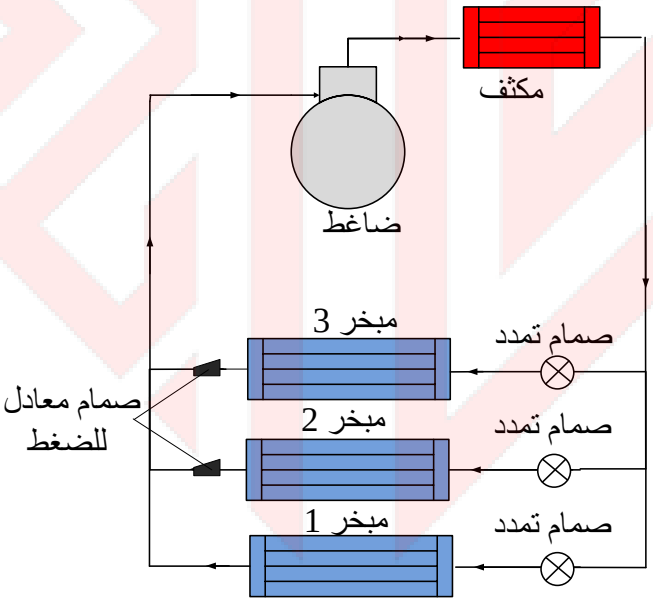
8-2/2/2 منظومة متعددة المبخرات تعمل عند درجات حرارة مختلفة وصمامات تمدد متعاقبة

(Multi-evaporator system with multiple expansion valves operating at different temperatures)

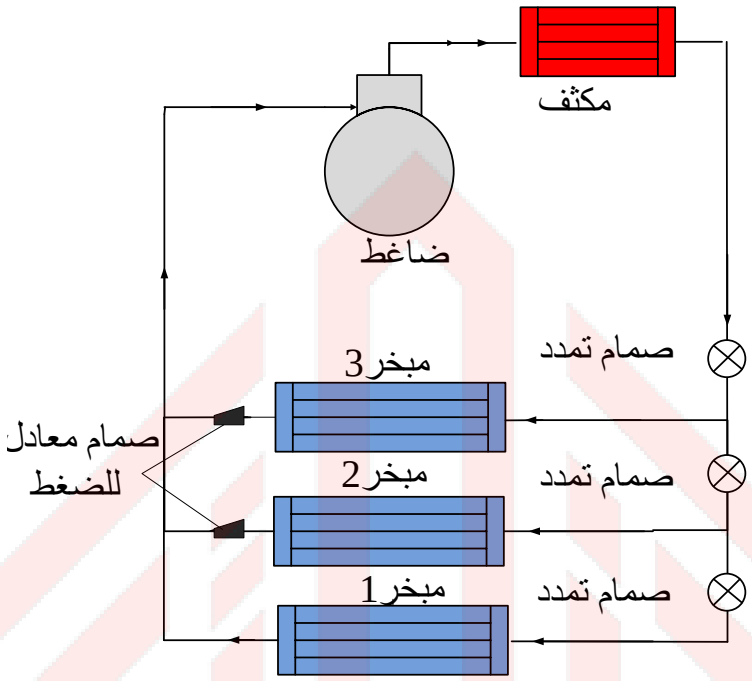
يستعمل فيها صمام تمدد رئيس يقوم بخفض ضغط تدفق الكتلة الكلية لمائع التثليج عند أعلى ضغط للمبخرات العاملة، ثم يقوم صمام تمدد آخر بخفض ما تبقى من كتلة مائع التثليج الى ضغط المرحلة الثانية للمبخرات العاملة، وهكذا يخفض الضغط لكل جزء متبقٍ من مائع التثليج. ويبين الشكل(8-2/3) منظومة متعددة المبخرات تعمل عند درجات حرارة مختلفة وصمامات تمدد متعاقبة.



الشكل 8-2/1: منظومة تثليج متعددة المبخرات مع تساوي درجة حرارة المبخرات.



الشكل 8-2/2: منظومة متعددة المبخرات تعمل عند درجات حرارة مختلفة وصمامات تمدد مستقلة.



الشكل8-3/2: منظومة متعددة المبخرات تعمل عند درجات حرارة مختلفة وصمامات تمدد متعاقبة.

8-3 منظومة التثليج متعددة الانضغاط (ذات أكثر من ضاغط)

(Multi-pressure system with more than one compressor)

تسمى منظومة التثليج بالمنظومة متعددة الانضغاط اذا احتوت على مائع تثليج من نوع واحد في الدورة مع مرحلتي انضغاط او أكثر على التوالي، ويتحقق تبريد وفصل بخار مائع التثليج عن سائله في المبرد البيني كما مبين في الأشكال (8-2/3) الى (8-1/4). يحدث اختلاط لمائع التثليج بين المراحل، وتفصل الضواغط الترددية أو اللولبية أو الحلزونية في كل مرحلة من مراحل الانضغاط بمبرد بيني لغرض تقليل درجة التحميص لبخار مائع التثليج قبل دخوله مرحلة الانضغاط التالية اضافة الى فصل غاز التذرير قبل دخول مائع التثليج الى المبخر [4].

8-3/1 الاعتبارات التصميمية (Design considerations)

8-3/1/1 الضغط البيني (Intermediate pressure)

ان الضغط البيني هو الضغط المقاس بين مرحلتي انضغاط، ويُختار الضغط البيني عادة بحيث تتساوى نسبة الانضغاط لكل مرحلة وكما في المعادلة(8-3/1).

$$R_{comp.} = \left(\frac{P_{cond}}{P_{evap.}}\right)^{z} \qquad (8-3/1)$$

حيث ان:

$R_{comp.}$: نسبة الانضغاط لكل مرحلة

Z : عدد مراحل الانضغاط.

$P_{cond.}$: ضغط التكثيف، kPa

$P_{evap.}$: ضغط المبخر، kPa

يحسب الضغط البيني P_i ولمرحلتي انضغاط من المعادلة (8−2/3) وكما يلي:

$$P_i = \sqrt{P_{cond.} \cdot P_{evap.}} \qquad (8-2/3)$$

حيث أن:

$P_{cond.}$: ضغط التكثيف، kPa

$P_{evap.}$: ضغط المبخر، kPa

8−2/1/3 مائع التثليج (Refrigerant)

يعمل مبخر دورة الضغط الواطئ عند درجة حرارة الى ما دون (-20 ^oC) حيث ينضغط بخار مائع التثليج على مرحلتين أو أكثر، وتحصل ازالة لغاز التذرير قبل الدخول الى المبخر اضافة الى تقليل درجة حرارة التحميص لبخار مائع التثليج بعد الانضغاط، مع التقليل من ارتفاع درجة حرارة بخار مائع التثليج المجهز من قبل الضاغط وخاصة في الضواغط الترددية، ولكن ليس لهذه الحالة تأثير في الضواغط اللولبية. عند عمل المنظومة عند درجات حرارة منخفضة يستوجب الاخذ بنظر الاعتبار المحددات التالية: درجة حرارة انجماد مائع التثليج، ونسبة الانضغاط المطلوبة والازاحة الحجمية لمائع التثليج لمرحلة الضاغط عند الضغط الواطئ لكل كيلوواط واحد من حاصل التثليج، ويبين الجدول (8−1/3) خصائص ثلاثة أنواع من موائع التثليج لثلاث درجات حرارة مبخر مختارة فيه المتغيرات الثلاثة المذكورة آنفاً [1].

8−3/1/2/1 درجة حرارة انجماد مائع التثليج (Refrigerant freezing point)

لاتوجد محددات عند استعمال موائع التثليج الهالوكاربونية، اما عند استعمال الامونيا فهناك تحديد لدرجة حرارة منظومة التثليج الدنيا لأن درجة حرارة انجماد الأمونيا مرتفعة نسبيا وكما موضح في الجدول(8−1/3).

8−3/1/2/2 نسبة الانضغاط (Pressure ratio)

هناك العديد من منظومات التثليج متعددة الانضغاط التي تكون صغيرة بما يكفي عند استعمال الضواغط الترددية. وتحدد درجة حرارة التجهيز بنسبة انضغاط بما يقارب 8، وتحدد درجة الحرارة الدنيا بما لايقل عن (-70 ^oC) عند استعمال الضواغط الترددية. وعند درجة حرارة أقل من (-70 ^oC) تستعمل ثلاث مراحل انضغاطية. وتستعمل الضواغط اللولبية عند الرغبة بالحصول على درجة حرارة أقل من(-70 ^oC) حيث يمكن أن تعمل هذه الضواغط عند نسبة انضغاط أعلى من الضواغط الترددية، وتكون مفضلة في المنظومات ذات السعات الكبيرة.

8-3/1/2/3 الازاحة الحجمية للضاغط (Compressor swept volume)

تقاس الأزاحة الحجمية للضاغط عند درجة حرارة السحب، أي عند دخول بخار مائع التثليج الى الضاغط. وتعطي الازاحة الحجمية دليلاً على السعة المطلوبة للضاغط، وتصبح هذه القيمة عالية جدا عند درجة حرارة مبخر تقارب (-90 ^{o}C).

الجدول 8-3/1: خصائص ثلاثة أنواع من موائع التثليج لثلاث درجات حرارة مبخر مختارة [5].

مائع التثليج	نقطة الانجماد (^{o}C)	نسبة الانضغاط لمرحلتي انضغاط			معدل التدفق الحجمي لمائع التثليج (l/s per kW)		
		درجة حرارة التبخر (^{o}C)			درجة حرارة التبخر (^{o}C)		
		-50	-70	-90	-50	-70	-90
R-22	-160	4.6	8.14	17.9	15.7	4.81	19.8
R-507	<-160	4.4	7.8	16.1	1.29	4.08	17.5
R-717	-77.8	11.1	11.1	25.4	2.05	7.24	------

8-3/1/3 فارط التبريد (Sub-cooler)

لغرض الحصول على اعلى فاعلية للدورة فمن الضروري تبريد سائل مائع التثليج الى درجة حرارة تساوي أو تقارب درجة حرارة تشبع السائل المناظرة للضغط البيني لغرض تقليل مقدار تذرير مائع التثليج في مرحلة الانضغاط الاولى. ويجب ان يكون الصمام المسيطر على تدفق مائع التثليج الى فارط التبريد كبيرا بشكل كاف بحيث يسمح لتدفق جميع مائع التثليج خلاله. إن فشل الصمام المسيطر على تدفق مائع التثليج يؤدي الى مشاكل كبيرة منها تلف الضاغط [1].

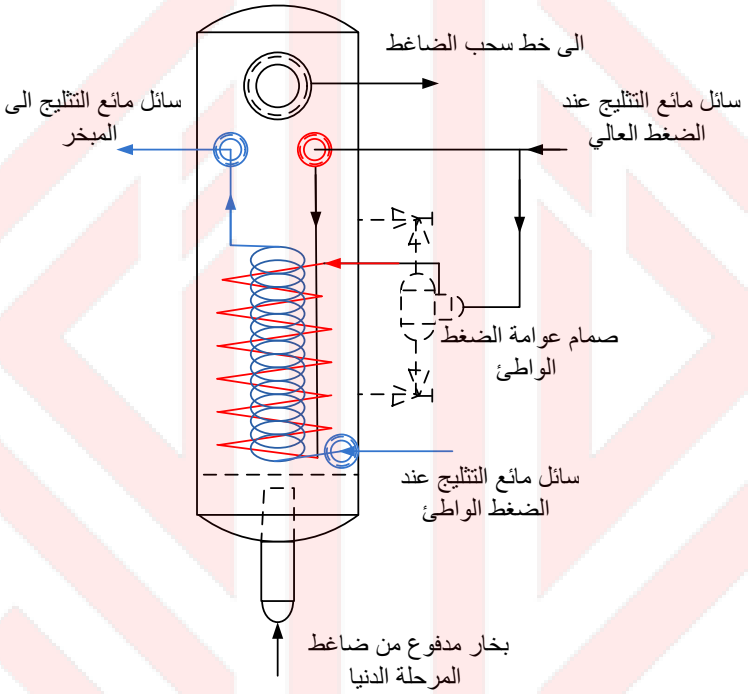
8-3/1/4 المبرد البيني لغاز مائع التثليج ومقلل التحميص (De-super heater)

يصمم مقلل التحميص لغرض سحب جزء من حرارة تحميص بخار مائع التثليج الخارج من ضاغط المرحلة الدنيا بمقدار 5 الى 14 ^{o}C لتصبح مناظرة لضغط التشبع البيني.

يمكن استعمال الماء في تبريد بخار مائع التثليج بعد مرحلة الانضغاط الاولى ولكن يجب الحذر عند استعماله حيث أن انخفاض درجة حرارة البخار الى ما دون 0 ^{o}C يؤدي الى انجماد الماء وتلف بعض اجزاء الدورة. وكذلك يمكن ان يحدث تكثف لبخار مائع التثليج في خط سحب المرحلة العليا اذا تم تبريده الى درجة حرارة دون درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط تشبع مائع التثليج. ويمكن حقن سائل مائع التثليج بشكل قطرات صغيرة جدا خلال بخار مائع التثليج بحيث يتبخر الجزء الاكبر من السائل الذي يحقن ويمكن تجميع السائل المتبقي عند اسفل مقلل التحميص ويترك ليتبخر مجددا خلال بخار مائع التثليج.

8-3/1/5 تجميعة فارط التبريد ومقلل التحميص (Combined sub-cooler and de-super heater)

يمكن ربط فارط التبريد مع مقلل التحميص بتجميعة واحدة وصمام تمدد واحد. وتستعمل لأجل ذلك أسطوانة عمودية وملف تبريد بيني مع صمام عوامة للسيطرة على تدفق مائع التثليج الى الأنبوب، ويجب ان يكون حجم الصمام والأسطوانة مناسبين للسماح بفصل بخار مائع التثليج عن السائل ومن ثم سحبه الى مرحلة الضغط العالي بأقل درجة تحميص ممكنة. ويبين الشكل (8-3/1) تجميعة فارط التبريد ومقلل التحميص المجمع.



الشكل 8-3/1: تجميعة فارط التبريد ومقلل التحميص.

8-3/1/6 وسائل إعادة الزيت (Oil return equipment) [6]

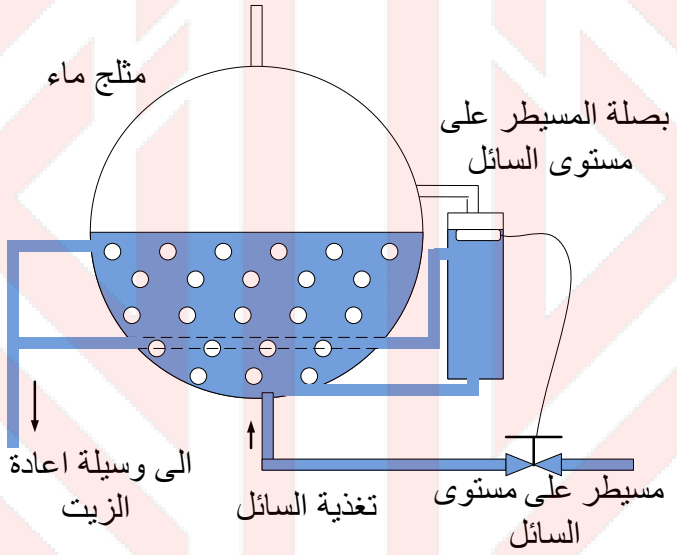
توضع فواصل للزيت عند خط الدفع بالنسبة للمنظومات العاملة بالأمونيا وتجهز فواصل الزيت بصمام عوامة بالضغط العالي يتيح للزيت الرجوع مباشرة الى صندوق عمود المرفق للضاغط، ويفضل إبعاد فاصل الزيت عن الضاغط بقدر الامكان، لغرض تبريد بخار مائع التثليج الخارج من الضاغط وبالتالي بلوغ فاعلية أكبر في فصل الزيت. على الرغم من ان موائع التثليج الهالوكاربونية يمكن ان تذوب في الزيت بسهولة، الا أن انخفاض درجة حرارة مائع التثليج يؤدي الى انخفاض في نسبة الزيت الذائب فيه، وهذا يؤدي الى طفو الزيت في المبخرات المغمورة وبالتالي تحولها الى مواد صلبة تعمل على حدوث انسداد في الصمامات والانحناءات في الأنابيب. ويمكن في بعض انواع المنظومات نزف كمية من سائل مائع التثليج المختلط مع الزيت، شرط ان يكون وعاء النزف ضمن دورة التثليج مع تسخينه باستعمال أداة تسخين خارجية أو باستعمال بخار مائع التثليج بعد مرحلة الانضغاط العليا. وبالتسخين يتبخر سائل مائع التثليج تاركا الزيت في الاسفل ومن ثم يعاد الزيت الى الضاغط مرة أخرى. وكما مبين في الشكل (8-3/2).

8-3/2 أنواع منظومات التثليج متعددة الانضغاط (Types of compound compression system)

8-3/2/1 منظومة ثنائية الانضغاط بمبرد بيني بواسطة غاز التذرير

(Two-stage compression system with flash inter-cooler)

يبين الشكل (8-3/3) منظومة ثنائية الانضغاط بمبرد بيني يعمل بواسطة غاز التذرير. تقلل درجة تحميص بخار مائع التثليج بعد الانضغاط الأولي عن طريق خلطه مع غاز التذرير، ويكون الناتج بخار مائع التثليج عند درجة تحميص أقل. بعد عملية التمدد الأولية، يفصل غاز التذرير عن سائل مائع التثليج، بحيث يتسلم صمام تمدد المرحلة الدنيا سائل مائع التثليج فقط. تستعمل هذه المنظومة عادة مع موائع التثليج من النوعين HCF و HCFC.

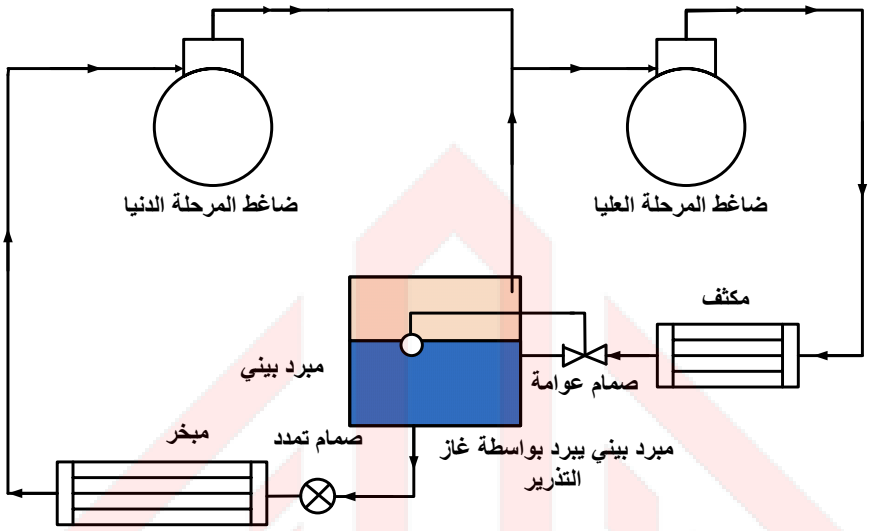


الشكل 8-3/2: فصل الزيت عن طريق النزف المستمر لخليط مائع التثليج والزيت.

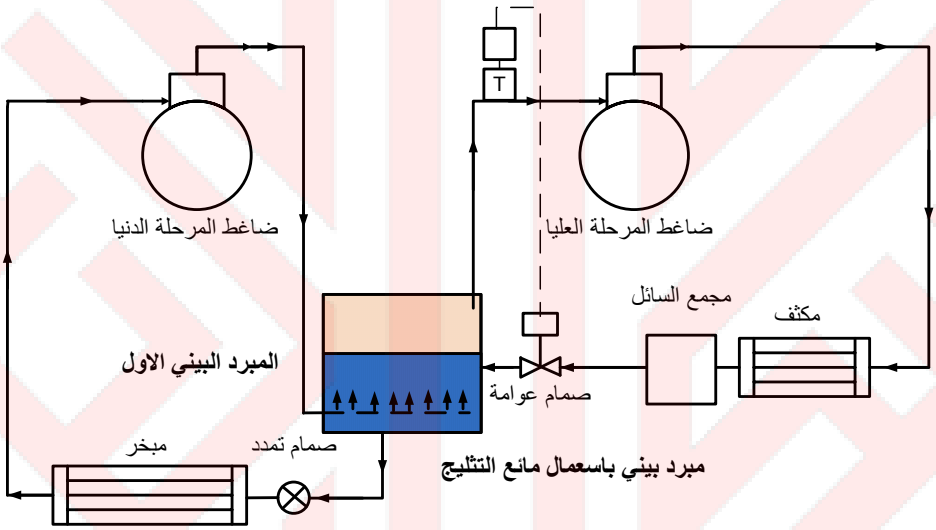
8-3/2/2 منظومة ثنائية الانضغاط بمبرد بيني يبرد بواسطة سائل مائع التثليج

(Two-stage compression system with liquid refrigerant inter-cooler)

تستعمل هذه المنظومة في حال كون درجة حرارة مبخر المرحلة الدنيا بحدود (-20) الى (-45 ^{o}C)، ويمكن استعمال الضواغط الترددية أو اللولبية فيها. ويبين الشكل (8-3/4) منظومة ثنائية الانضغاط بمبرد بيني يبرد بواسطة سائل مائع التثليج. يستعمل وعاء تسليم مائع التثليج بعد المكثف، وتتحقق السيطرة على مستوى مائع التثليج في المبرد البيني عن طريق صمام تمدد حراري يتحسس درجة حرارة تشبع مائع التثليج عند الضغط البيني. ويتسلم ضاغط المرحلة العليا بخار مائع تثليج مشبع. تستعمل هذه الطريقة عادة في المنظومات التي تستعمل الأموني [7].



الشكل 8-3/3: منظومة ثنائية الانضغاط بمبرد بيني يبرد بواسطة غاز التذرير.

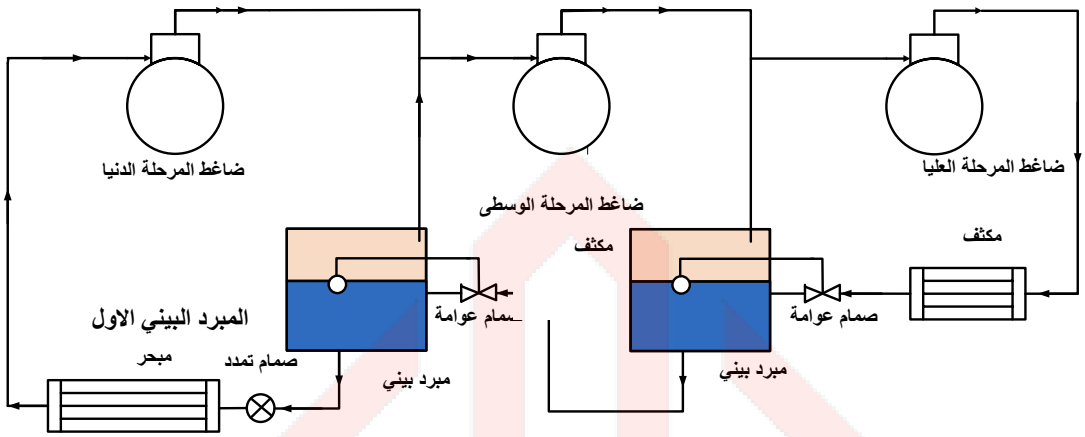


الشكل 8-3/4: منظومة ثنائية الانضغاط بمبرد بيني يبرد بواسطة سائل مائع التثليج.

8-3/2/3 منظومة ثلاثية الانضغاط بمرحلتي تبريد مع مبردات بينية تبرد بواسطة غاز التذرير

(Three-stage compression system with a two-stage flash inter-cooler)

تتميز بفعالية استعمال الطاقة. يخلط بخار مائع التثليج المحمص بعد ضاغط المرحلة الأولى مع غاز التذرير من المبرد البيني الأول ليكون بخار عند درجة تحميص قليلة، ثم يضغط بخار مائع التثليج في ضاغط المرحلة المتوسطة ليخلط عند النقطة مع غاز التذرير من المبرد البيني الثاني، ثم يضغط البخار للمرة الثالثة ومنه الى المكثف. ويبين الشكل (8-3/5) منظومة ثلاثية الانضغاط بمرحلتي تبريد بمبرد بيني يبرد بواسطة غاز التذرير.

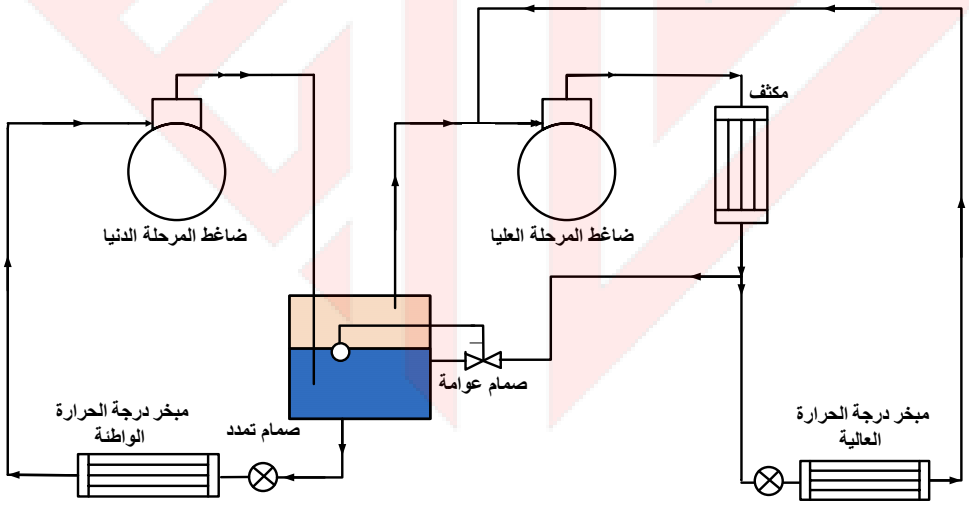


الشكل 8-5/3: منظومة ثلاثية الانضغاط بمرحلتي تبريد بينية يبرد بواسطة غاز التذرير.

8-4 منظومة التثليج ذات أكثر من ضاغط وأكثر من مبخر

(More than one compressor and more than one evaporator)

تحتوي المنظومة هنا على ضاغطين أو أكثر ويمكن أن يكون عدد المبخرات أكثر من عدد الضواغط وترتب كما في الفصل (8-2). وتكون المبخرات عند درجات حرارة مختلفة غالبا، وهي منظومات صناعية اعتياديا. ويمكن أن تستعمل في صناعة المثلجات حيث يتطلب الأمر عمل المنظومة الواحدة عند درجات حرارة مختلفة في وقت واحد. ويمكن أن تستعمل في منظومات الصناعات الكيميائية ايضا، وتحتوي على مبرد بيني وفاصل للطور كما في الفصل (8-3) وتعمل بمائع تثليج من نوع واحد. وما ينطبق من اعتبارات تصميمية تم ذكرها في الفصل (8-3) ينطبق على هذا النوع من المنظومات. ويبين الشكل (8-4/1) نموذجا لمنظومة تثليج تحتوي على ضاغطين ومبخرين يعملان عند درجات حرارة مختلفة [8] .



الشكل 8-4/1: منظومة تثليج تحتوي على ضاغطين ومبخرين.

8-5 منظومات التثليج التعاقبية (Cascade systems)

تسمى المنظومة بالتعاقبية اذا احتوت على مرحلتي انضغاط أو اكثر شرط ان يكون مائع التثليج في كل مرحلة انضغاط يختلف عن مائع التثليج في المرحلة الأخرى[1]. تتكون مثل هذه المنظومة من دورتي تثليج مستقلتين أو اكثر، ولكنهما مرتبطتان حراريا بواسطة المكثف المتعاقب (Cascade condenser) ، حيث يكون مكثف دورة درجة الحرارة المنخفضة مرتبطاً حرارياً مع مبخر دورة درجة الحرارة العالية. ويبين الشكل (8-1/5) منظومة تعاقبية بمرحلتين والشكل (8-2/5) منظومة تعاقبية بثلاث مراحل.

8-5/1 الاعتبارات التصميمية (Design considerations)

8-5/1/1 موائع التثليج (Refrigerants)

إن موائع التثليج المناسبة لهذه الأنواع من المنظومات هي R-22 والأمونيا R717 و R-507 و R-404A. وقد كان مائع التثليج R-503 (خليط R-13 و R-23) يستعمل لسنوات عديدة، ولكن بسبب تأثير المائع R-13 على طبقة الأوزون فقد استغني عن خليط مائع التثليج R-503، واستعمل مائع التثليج R-23 منفردا بدلا عنه. ويستعمل مائع التثليج R-508B حاليا في دورة درجات الحرارة المنخفضة، وهو يتميز بانخفاض درجة حرارة البخار المجهز مما يحقق استقرارية لمنظومة التزييت. وهو مائع تثليج غير قابل للاشتعال ولايؤثر على طبقة الأوزون. ويبين الجدول (8-1/5) بعض خواص مائع التثليج R-508B في حين أن الجدول (8-2/5) يقارن الأداء النظري لمنظومة تعاقبية تعمل بعدة موائع تثليج.

الجدول 8-1/5: بعض خواص مائع التثليج R-508B.

درجة الغليان عند 101.325 kPa	- 88°C
الدرجة الحرجة	37°C
الضغط الحرج	3935 kPa
الحرارة الكامنة للتبخر عند درجة الغليان	168.4 kJ/kg
مكافئ استنفاد طبقة الأوزون	0
قابلية الاشتعال R-12=1	غير قابل للاشتعال
مقدار التركيز الخطر عند التعرض له لمدة بين 8 الى 12 ساعة	1000 ppm

الجدول 8-5/2 : مقارنة الأداء النظري لمنظومة تعاقبية تعمل بعدة موائع تثليج.

الأداء	R-503	R-13	R-23	R-508B
السعة R-503 = 100	100	71	74	98
الفعالية R-503 = 100	100	105	95	103
ضغط التجهيز (kPa)	999	717	848	1013
ضغط السحب (kPa)	110	83	90	10
درجة حرارة تجهيز البخار بعد الضاغط (^oC)	107	92	138	87
ظروف الدورة : درجة حرارة المبخر ^oC 84.4-، درجة حرارة المكثف ^oC35-، الافراط في التبريد ^oC5.6، فعالية الانضغاط الأيزوتروبية 70%، نسبة حجم الخلوص4%				

8-5/1/2 زيت الضاغط (Compressor oil)

عند اختيار زيت ضاغط مع مائع التثليج R-508B في دورة درجة الحرارة المنخفضة يؤخذ بنظر الاعتبار 1- قابلية ذوبان الزيت في مائع التثليج، 2- الاستقرارية الكيميائية، 3- توافق المواد، 4- تصميم منظومة التثليج. ويجب إستشارة الجهة المصنعة للضاغط عند استعماله في دورة درجة الحرارة الواطئة. يفضل استعمال زيت من نوع البوليستر POEs لأن ان امكانية ذوبانه في مائع التثليج R-508B أحسن من ذوبان الزيوت المعدنية في مائعي التثليج R-13 و R-503. تستعمل زيوت البوليستر المخصصة للعمل عند درجات حرارة واطئة جدا مع مائع التثليج R-508B.

8-5/1/3 الضواغط (Compressors)

تستعمل ضواغط الازاحة الموجبة في جميع دورات المنظومات التعاقبية كبيرة السعة. عند استعمال الضواغط التجارية المتوافرة في الأسواق فيجب أن تدرس امكانية استعمالها لجانبي الدورة التعاقبية لغرض ايجاد وسيلة ربط لغرض الحصول على افضل ضغط بيني بين ضغط مبخر دورة الضغط العالي وضغط مكثف دورة الضغط الواطئ، وأقل درجة حرارة يمكن الحصول عليها.

8-5/1/3/1 دورة درجة الحرارة العليا (High temperature cycle)

ان دورة درجة الحرارة العليا قد تكون دورة مرحلة واحدة، أو دورة ثنائية المرحلة، وتستعمل فيها موائع التثليج التجارية التالية R-134a أو R-22 أو R-404a أو R-717. درجة حرارة المبخر قد تتراوح من ^oC 23- الى ^oC45- وتكون درجة حرارة التكثيف تقارب درجة حرارة المحيط الخارجي. ويمكن الاستفادة من الضواغط الترددية أو اللولبية التجارية. أما اذا كانت درجة حرارة انضغاط البخار أقل من ^oC 45- فيجب استعمال مبادل حرارة عند خط السحب لتحميص البخار الى درجة حرارة تساوي ^oC43- أو اكبر لتجنب هشاشة معدن خط السحب وصمامات وجسم الضاغط. وتتبع مواصفة ASME B31.3 لاختيار معدن الأنابيب ومكثف ومبخر المنظومة لتحمل انخفاض درجات الحرارة.

يجب أن تتلاءم نوعية زيت ضاغط دورة درجة الحرارة العالية مع مائع التثليج المستعمل مع توافر امكانية نقل الزيت ليعود مرة ثانية الى الضاغط من مبخر دورة درجة الحرارة الدنيا.

8-5/1/3/2 دورة درجة الحرارة الدنيا (Low temperature cycle)

تستعمل الضواغط القياسية في هذه الدورة، ويجب تحميص بخار خط السحب الى -43°C أو اكبر. يفضل استعمال مائعي التثليج R-23 أو R-508B. تتبع المواصفة ASME B31.3 أو المواصفة ASTM-A/ASME-SA105 لاختيار معدن الأنابيب والصمامات والأوعية بحيث تتناسب مع درجة حرارة تساوي -45°C أو أقل. يجب ان تتلاءم نوعية زيت الضاغط مع درجات الحرارة المنخفضة التي تعمل عليها المنظومة. ومن المهم أن لا تزيد كمية الزيت المنتقل مع بخار مائع التثليج على 5ppm لتقليل انتقال الزيت من الضاغط الى المبخر.

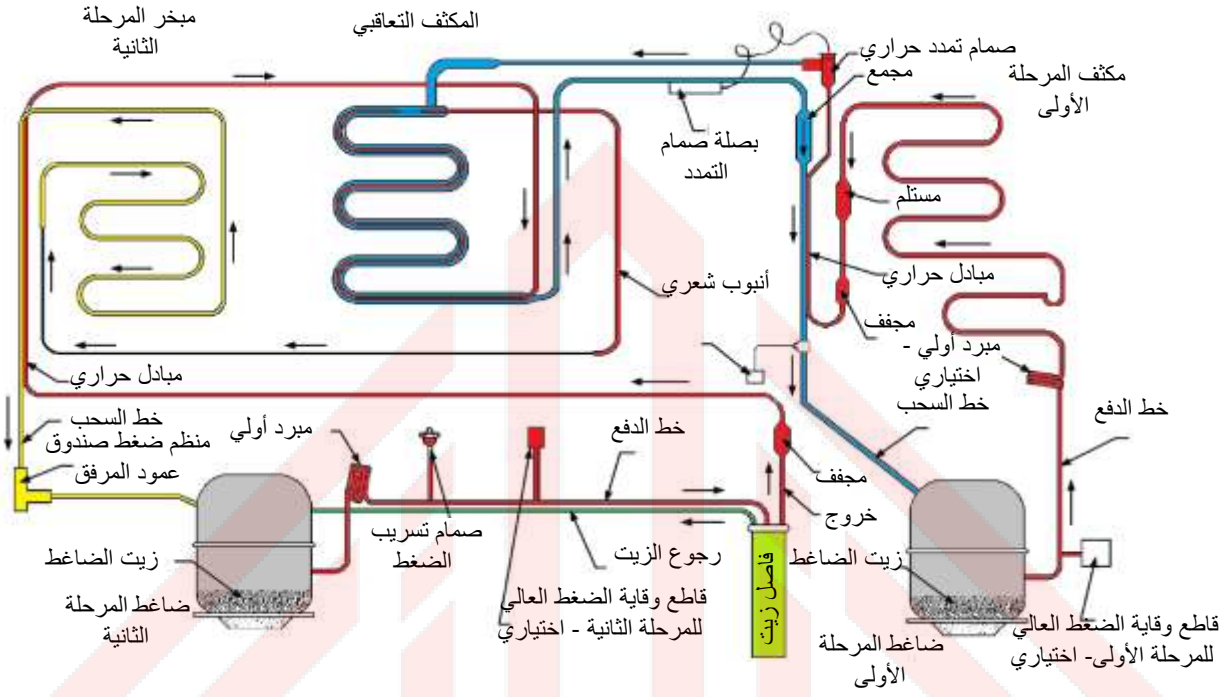
عند استعمال مبخرات التمدد المباشر فيجب أن تحقق سرعة عالية لبخار مائع تثليج في خط السحب بحيث يمكن أن تعيد الزيت الى الضاغط مرة أخرى. أما اذا وجد نظام السيطرة على سعة المنظومة فيجب ان تصمم المنظومة على أساس وجود خطي سحب للضاغط لمنع تجمع الزيت في المبخر. ويجب اختيار زيت لاينجمد عند درجات الحرارة الدنيا ويبقى في حالته السائلة ولاينجمد على السطح الداخلي لأنابيب المبخر.

8-5/1/4 اختيار معادن الأنابيب والأوعية (Vessel piping materials)

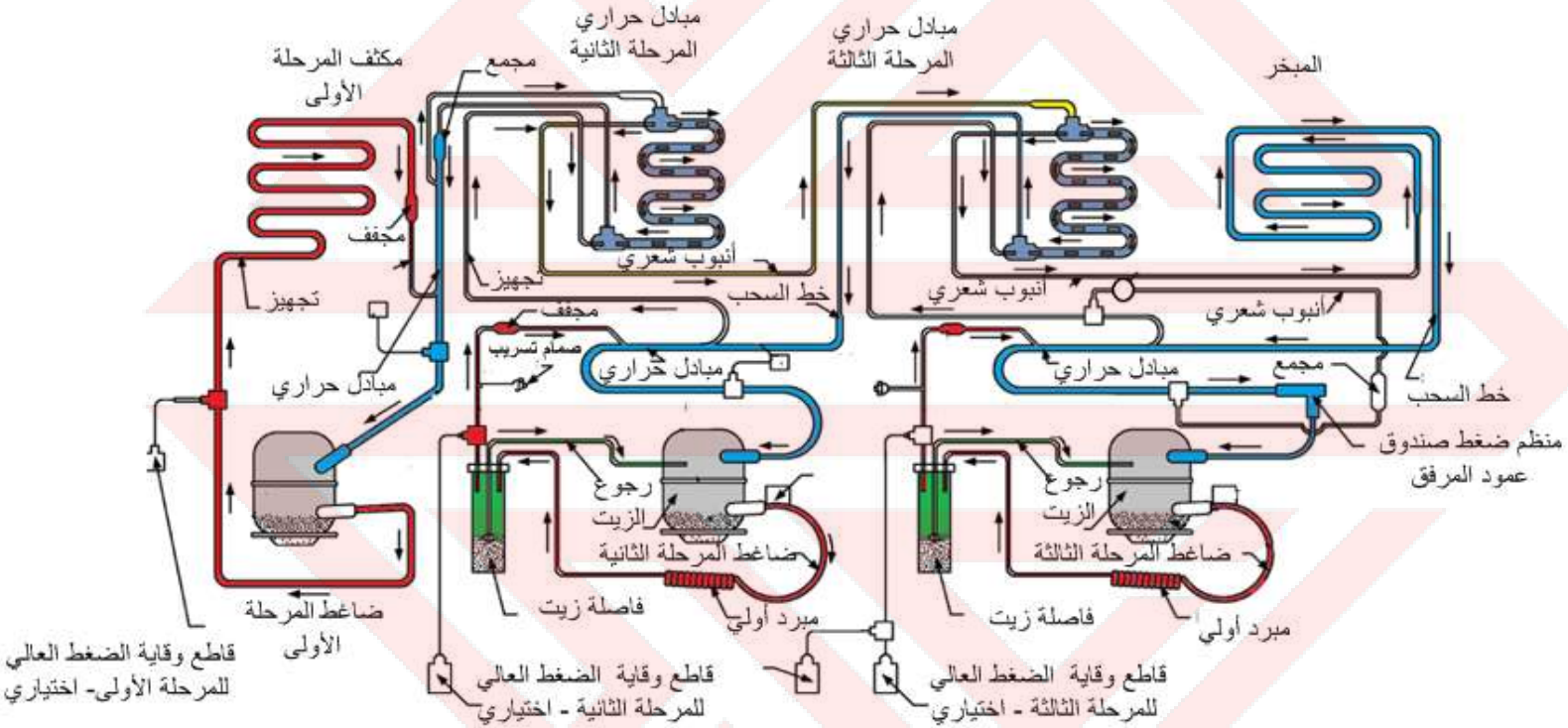
ان أفضل معدن يمكن استعماله في هذا المجال هو الصلب الكاربوني (carbon steel). ويفضل عدم استعماله عند درجات حرارة أقل من -29°C، ويستعاض عنه بالصلب المقاوم للصدأ من النوع 304 أو 316. ويمكن الاستعانة بالجدول (8-5/3) لاختيار معادن الدورة.

الجدول 8-5/3: أنواع المعادن المستعملة عند درجات الحرارة الدنيا.

درجة الحرارة	فولاذ كاربوني (Carbon steel)
-29 to -46 °C	SA-333-GR1
-46 to -73 °C	SA-333-GR7
-59 to -101 °C	SA-333GR3



الشكل 8-1/5: منظومة تثليج تعاقبية ثنائية المراحل.



الشكل 8-2/5: منظومة تثليج تعاقبية ثلاثية المراحل.

مراجع الباب 8

[1] ASHRAE, "***2010 ASHRAE Handbook : Refrigeration***", Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A., 2010.

[2] Stoecker, W.F. and Jones, J.W., "***Refrigeration and Air conditioning***" 2nd edition, McGraw-Hill, 1982.

[3] Stoecker, W.F., " ***Industrial Refrigeration Handbook***", McGraw- Hill, 2004.

[4] Sapali, S.N.," ***Refrigeration and Air conditioning***", PHI Learning Private limited,2009.

[5] ASHRAE, "***2009 ASHRAE Handbook : Fundamentals***",Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A.,2009.

[6] Arora, C.P., "***Refrigeration and Air conditioning***", 2nd edition, Tata McGrwa-Hill,2010.

[7] Ibrahim D., and Mehmet, K.," ***Refrigeration System and Applications***", 2nd edition, John Wiley and Sons, 2010.

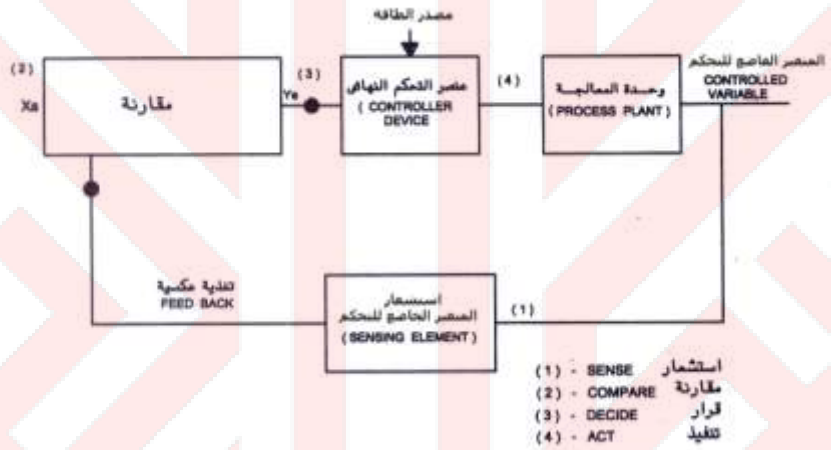
[8] Ananthan, P.N.," ***Basic Refrigeration and Air Conditioning***", 3rd edition, Tata McGraw Hill, 2006.

الباب 9

أجهزة التحكم التلقائي (Automatic Control Systems)

9-1 أنواع منظومات التحكم التلقائي (Types of automatic control systems)

يمكن تلخيص خطوات عمل منظومة (حلقة) التحكم (control loop) فى أربع خطوات وهى استشعار – مقارنة–قرار –تنفيذ كما مبين بالشكل (9-1/1) الذي يبين كذلك عناصر المنظومة الاساسية التي تقوم بهذه الوظائف. ويقوم "بالاستشعار" متحسس المتغير الخاضع للتحكم (sensing element) الذى يرسل القيمة المقاسة للمتغير الخاضع للتحكم كإشارة ادخال للمتحكم. ويقوم المتحكم بعملية "المقارنة" بين قيمة المتغير الخاضع للتحكم المقاسة والقيمة المرغوبة. كذلك يقوم بالعمليات الحسابية والمنطقية التى تنتهى "بقرار التحكم" على شكل إشارة لعنصر التحكم النهائى الذى يقوم بعملية "التنفيذ" التى من شأنها أن تعمل على تقليل الانحراف (deviation) بين القيمة المقاسة والقيمة المرغوبة. ويقوم متحسس المتغير الخاضع للتحكم بتحسس التغير الناتج من "فعل" عنصر التحكم النهائى. ويرسل إشارة بالقيمة الجديدة للمتحكم وتبدأ الحلقة فى دورة جديدة وهكذا[2,1].

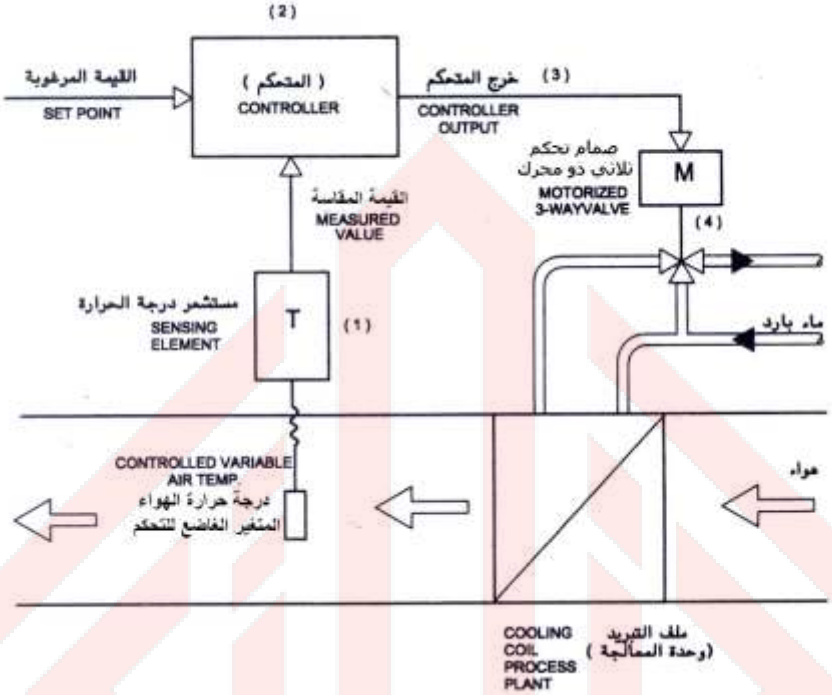


الشكل 9-1/1: حلقة التحكم المغلقة.

تقسم منظومات التحكم الى اربعة انواع اعتمادا على كيفية نقل الاشارة من عنصر القياس أو التحسس الى وحدة التصحيح وكما يأتي:

9-1/1 منظومات التحكم تلقائية الفعل (Self acting control system)

يستعمل هذا النوع من المنظومات عناصر الضغط أو القوة أو الحركة الناتجة من عنصر القياس كاشارة ومصدر مباشر للقوة في وحدة التصحيح. الصمام ثنائي المسالك مثال على ذلك، حيث تنتج القارورة الحسية المملوءة بالسائل قوة ضغط تتسلط على الرق المرتبط بساق الصمام. وتتناسب القوة المسلطة مع درجة الحرارة التي تحسست بها القارورة لتتحقق السيطرة على معدل تدفق الماء أو البخار في الأنبوب بدون اي قدرة خارجية أو تضخيم للإشارة. ان هذا النوع من التحكم بسيط وتناسبي بطبيعته كما مبين بالشكل (9-2/1).



الشكل 9-2/1: منظومة تبريد بحلقة تحكم مغلقة.

9-2/1 منظومات التحكم الكهربائية/ الالكترونية (Electrical/electronic control systems)

وهي أكثر المنظومات استعمالاً لسهولة توليفها مع انواع التطبيقات المتباينة. وتستفيد هذه المنظومات من التغيرات في الجهد الكهربائي لنقل الإشارات الحصول على التيار اللازم لتحريك عنصر التحكم النهائي (وحدة التصحيح). وتعمل المنظومات الكهربائية بجهد كهربائي قدره 24 فولت بواسطة محولة صغيرة. أما المنظومات الكهربائية فتكون قوة الإشارة الصادرة عن عنصر القياس اضعف بكثير. وتقوم المضخمات الالكترونية بتضخيم قيم الإشارات إلى مقادير ملائمة تمكنها من تحريك عنصر وحدة التصحيح. وتصدر الإشارات اعتياديا عن محارير مقاومة أو مزدوجات حرارية أو ثرمستور. وقد اخذ هذا النوع من المنظومات بالانتشار السريع آخذاً محل المنظومات الكهربائية في كثير من الاستعمالات. حيث ظهرت أجهزة التحكم الرقمية مع أجهزة حاسبة تمكن من متابعة الأجزاء المختلفة من موقع مركزي وعلى شاشات تلفزيونية.

9-3/1 منظومات التحكم التي تعمل بالهواء المضغوط (Pneumatic control systems)

يجهز الهواء المضغوط في هذه المنظومة من ضاغط هواء بعد تجفيفه إلى أداة وجهاز تحكم فيها بواسطة أنابيب نحاسية. ويقوم جهاز التحكم بتقليل الضغط الى قيمة بحدود 124 الى 172 كيلوباسكال بحيث يتناسب مع الظرف الخاضع للمسيطر وذلك بنزف (bleeding) قسم من الهواء إلى الخارج. وينتقل الضغط المنخفض أو ضغط السيطرة بحدود 20.7 الى 81.7 كيلوباسكال بعد ذلك إلى وحدة التصحيح مسبباً حركته مع تغيرضغط السيطرة. يفضل استعمال هذه المنظومات في المباني التي يخشى أن تولد فيها منظومات التحكم الأخرى، مثل الكهربائية، شرارات قد تسبب انفجار غاز أو مادة اخرى.

9-1/4 منظومات التحكم الهيدروليكية (Hydraulic control systems)

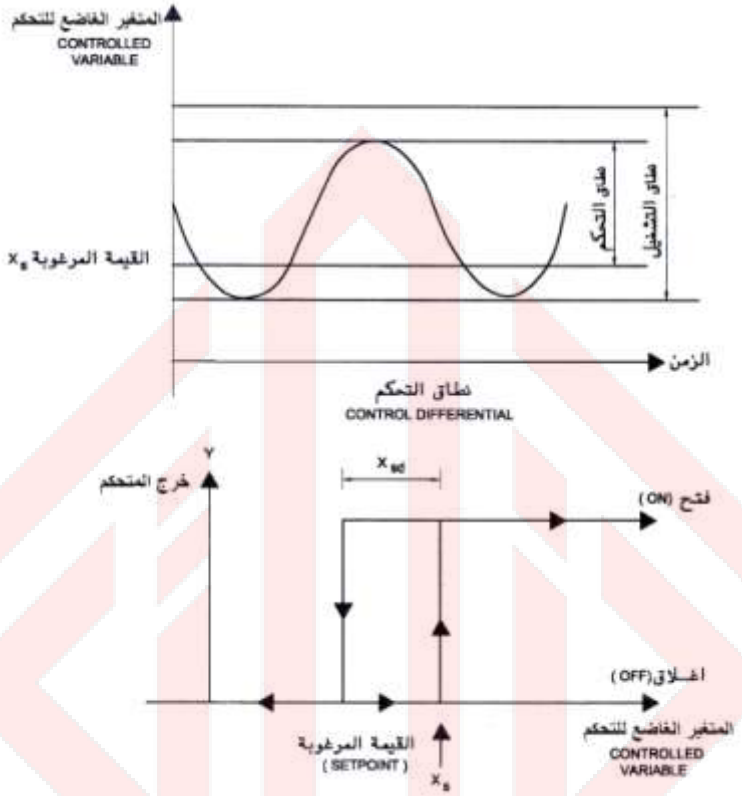
هذه المنظومة مشابهة لمنظومات الهواء المضغوط. ولكنها تستعمل الزيت أو الماء أو أي سائل أخر لنقل الإشارة بدل الهواء. وتستعمل منظومات التحكم الهيدروليكية لنقل إشارات بقوى اكبر من تلك الممكنة في المنظومات التي تعمل بالهواء المضغوط. ويكمن جل استعمالها في منظومات التثليج حيث يستعمل ضغط زيت التزييت العالي في منظومة تحكم مثل رفع تحميل اسطوانات الضاغط وحماية منظومة تزيت أجزاء الضاغط للحفاظ عليها. وللحصول على تفاصيل اكثر راجع الفصل (37) في مجلد الاسس (fundamentals) لجمعية اشري لعام1997 [3] والفصل (45) في مجلد التطبيقات (applications) لجمعية اشري لعام 1999 [4].

9-2 طرائق التحكم التلقائي (Self acting methods)

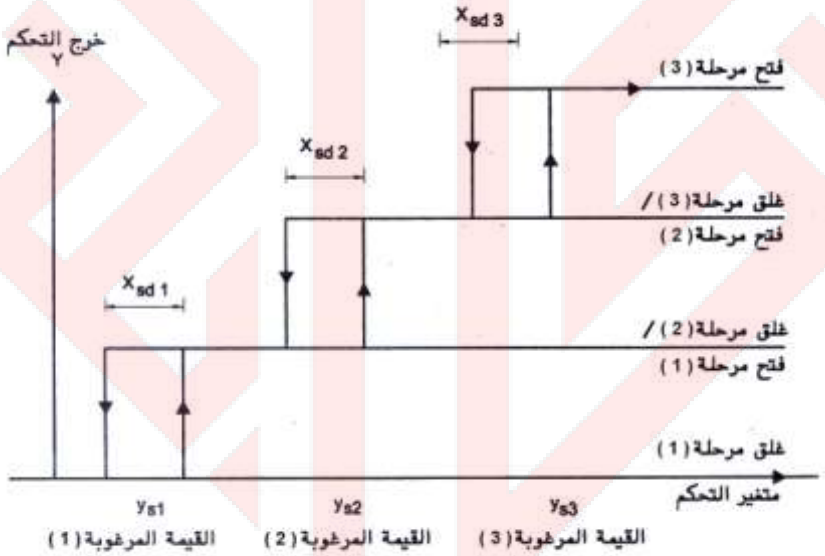
9-2/1 التحكم ثنائي الموقع (Two positions (on-off) control)

هنالك قيمتان فقط للمتغير الخاضع للتحكم في التحكم ثنائي الموقع البسيط هما القيمة القصوى وقيمة الصفر. إذ يقوم عنصر القياس في المتحكم التلقائي بتشغيل القدرة الكلية عند هبوط درجة الحرارة في حالة التدفئة مثلاً الى القيمة الدنيا للتفاوت ويطفئ القدرة الى الصفر عند الوصول إلى الحد الأعلى للتفاوت. أي (إيقاف/تشغيل) أو (غلق/فتح) كما في مبين بالشكل (9-2/1). ويمكن تحسين التحكم ثنائي الموقع البسيط للحصول على تغير في القدرة بحيث يعطي حدود تفاوت (differential gap) أصغر في منظومات التدفئة خاصة. ويتحقق ذلك بوضع عنصر تسخين صغير بالقرب من عنصر التحسس(عنصرالقياس) لدرجة الحرارة في منظم الحرارة (الثرموستات) (thermostat). فإذا كانت درجة حرارة المحيط واطئة فان عنصر التسخين سيفقد الحرارة بمعدل اسرع ويأخذ وقتا اطول لوصول درجة حرارته ودرجة حرارة عنصر التحسس القريب منه الى الحد الاعلى لحدود التفاوت والتي عندها يوقف مجموعة التسخين عن العمل. وبهذا تعمل مجموعة التسخين لفترات اطول عندما تكون درجة الحرارة هواء الغرفة واطئة. تسمى هذه الطريقة التحكم ثنائي الموقع المؤقت. وتستعمل لان التوافق التام بين الحمل والقدرة لا يحصل بصورة عامة مع التحكم ثنائي الموقع البسيط[3,2] .

يعتبر نمط التحكم الخطوي من انماط التحكم ثنائي الموقع حيث تحصل في وحدة المعالجة في عدة مراحل متتابعة متلاحقة. مثال على ذلك السخانات الكهربائية متعددة المراحل أو ذات المراحل متعددة السرعات. ويقوم المتحكم بإصدار عدة اشارات نتاج مناظرة لذلك العدد والقيمة المرغوبة التي ضبطت لكل مرحلة تحكم. كذلك يمكن ضبط نطاق التحكم لكل مرحلة حتى نضمن استقرار المنظومة، وهذا ملائم للاستعمال في حالة المنظومات ذات السعات الكبيرة لتجنب خروج متغير المتحكم عن نطاق التحكم المرغوب فيه كما مبين بالشكل (9-2/2).



الشكل 9-2/1: منظومة التحكم ثنائى الموقع.



الشكل 9-2/2: منظومة التحكم الخطوة خطوة.

9-2/2 التحكم التناسبي (Proportional control mode)

إذا كانت الإشارة الصادرة عن جهاز التحكم متناسبة تناسباً مباشراً مع الانحراف فإن فعل التحكم يسمى تناسباً بسيطاً. ويستعمل اصطلاحاً الفعل المباشر والفعل العكسي للدلالة على اسلوب تحرك وحدة التصحيح استجابة للإشارة التي تتسلمها من عنصر القياس. ومثال على ذلك اذا كانت غرفة مبردة تعاني كسباً حراريا وانها تبرد بوحدة ملف ومروحة مغذاة بالماء المثلج وان نتاجها ينظم بواسطة صمام ثنائي الموقع، فعند ارتفاع درجة حرارة الغرفة سيرسل الثرموستات (منظم الحرارة) اشارة اقوى الى الصمام وبهذا يكون فعله مباشراً. أي ان الإشارة تزداد قوة مع ازدياد قيمة الظرف المسيطر عليه. وإذا كانت استجابة الصمام بأن يسمح بازدياد معدل تدفق الماء (المتغير الخاضع للتحكم) فإن هذا الفعل يسمى فعلاً مباشراً (direct action). أي ان استجابة وحدة التصحيح تعمل بالتحكم في المتغير الخاضع للتحكم بالاتجاه نفسه مع المتغير في الظرف المسيطر عليه. والآن إذا افترضنا ارتفاع درجة حرارة الغرفة شتاء فان الفعل المطلوب هو تقليل تدفق الماء الساخن إلى الملف. أي إن التغير في المتغير الخاضع للتحكم بعكس اتجاه التغير في الظرف المسيطر عليه ويسمى هذا الفعل تحكما تناسبيا عكسيا (reverse action).

9-2/3 التحكم العائم (Floating (three- position) control mode)

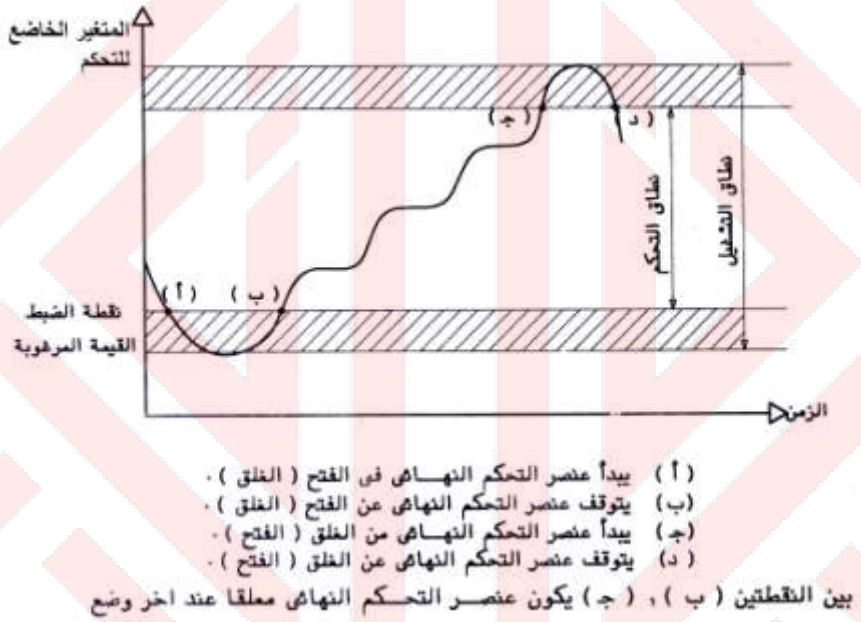
يسمى التحكم العائم بهذا الاسم لان وحدة التصحيح تكون في موقع ثابت طالما وقعت قيمة الظرف المسيطر عليه بين حدين معينين. وعندما تصل قيمة الظرف المسيطر عليه الى الحد الأعلى من هذين الحدين وتتعداه تتحرك وحدة التصحيح، ولنقل انها تفتح، بمعدل ثابت. ثم بافتراض ان قيمة الظرف المسيطر عليه تبدأ بالهبوط استجابة للحركة التصحيحية هذه، فانها ستقل إلى الحد الاعلى وعندها تتوقف حركة وحدة التصحيح وتبقى مكانها الجديد مفتوحة جزئياً. وتبقى على هذه الحالة إلى أن يصل الظرف المسيطر عليه مجدداً الى احد الحدين. أي إن وحدة التصحيح تجهز بإشارة للحركة باتجاه معين اعتماداً على الانحراف. ويعطي الانحراف الموجب حركة لوحدة التصحيح باتجاه معين في حين يسبب الانحراف السالب حركة بالاتجاه المعاكس. وهنالك مجال ميت أو عائم بين الحدين يقرر اشارة الانحراف. ويبين الشكل(9-3/2) العلاقة بين المتغير الخاضع للتحكم والزمن فى نطاق التحكم العائم. وعند استعمال نطاق التحكم العائم يجب مراعاة ملاءمة سرعة محركات عناصر التحكم النهائية لزمن استجابة نطاق متغيرالخاضع للتحكم حتى نضمن استقرار المنظومة ومنع التذبذب فى أوضاع عنصر التحكم النهائى[3,2].

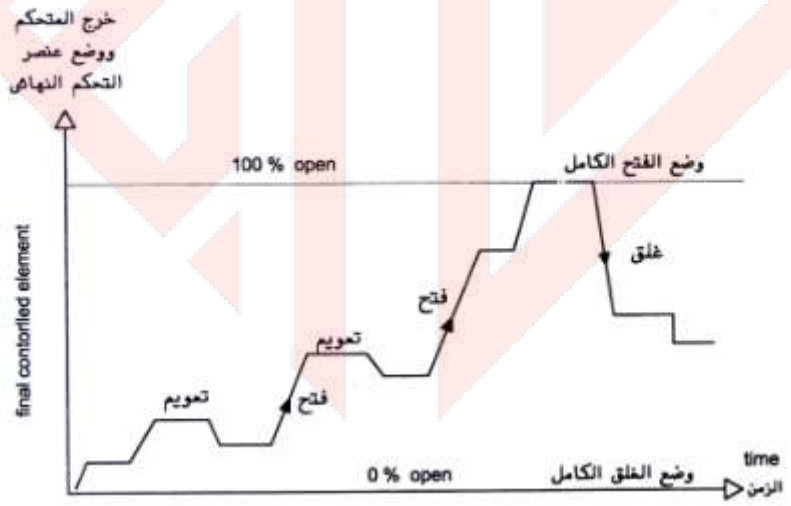
9-2/4 التحكم التضميني (المستمر) (Modulating control mode)

يتخذ نتاج التحكم في نمط التحكم التضميني (المستمر) أحد ثلاثة أوضاع(غلق-تقويم-فتح). وفيها يكون التحكم النهائي مجهزاً بمحرك ثنائي الاتجاه. وتبعاً لوضع نتاج التحكم يكون وضع عنصر التحكم النهائي إما مغلقاً أو مفتوحاً أو ثابتاً عند نقطة بين الوضعين ويسمى كذلك نمط التحكم ثلاثي الوضع.

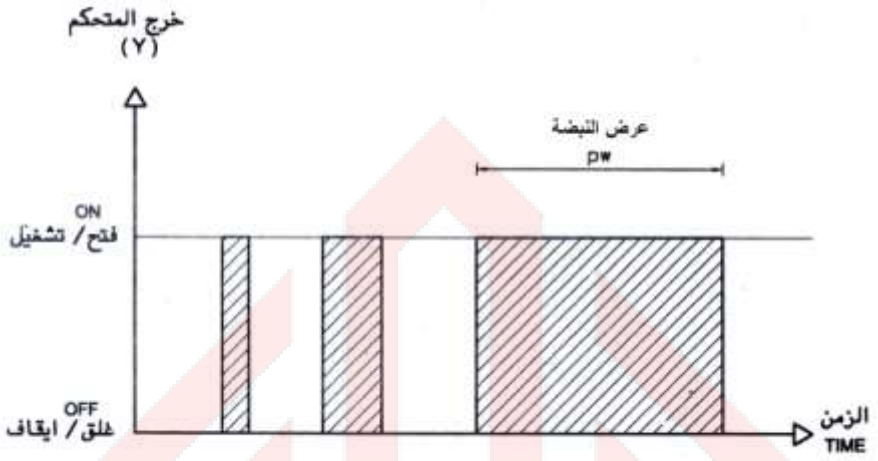
في منظومات التكييف المركزي التي يتغير فيها الحمل بشكل كبير يلزم استعمال منظومة تحكم تلقائي تتحكم في السعة بشكل منظم ومستمر، وحتى يمكن تحقيق دقة عالية والحفاظ على المتغير الخاضع للتحكم عند القيمة المرغوبة خلال نطاق تحكم مقبول يسمى نطاق التحكم التضميني. وفي تلك المنظومة يكون نتاج

المتحكم متغيراً بصورة متصلة ومستمرة لتحقيق التغير المطلوب في السعة لملاحقة التغير في المتغير الخاضع للتحكم. يعتمد التحكم التضميني على خرج ثنائى الوضع بنبضات كهربائية ويقوم المتحكم بتعديل عرض النبضة بما يتلاءم مع الخطأ. ويلائم هذا النتاج عنصر التحكم النهائي مثل المحرك الكهربائي ذى الخطوات. ويحدد نتاج المتحكم عرض النبضات كما هو مبين في الشكلين (9-2/4) و(9-2/5) بدلا من وضع عنصر التحكم النهائى وبالتالي لا توجد تغذية عكسية لمعرفة وضع عنصر التحكم النهائى كما فى التحكم التضمينى الحقيقى المستمر، ولذلك يطلق على تلك المنظومة بالتحكم التضمينى ويطلق عليها أيضا منظومة النبضة والسكون[3,2] .

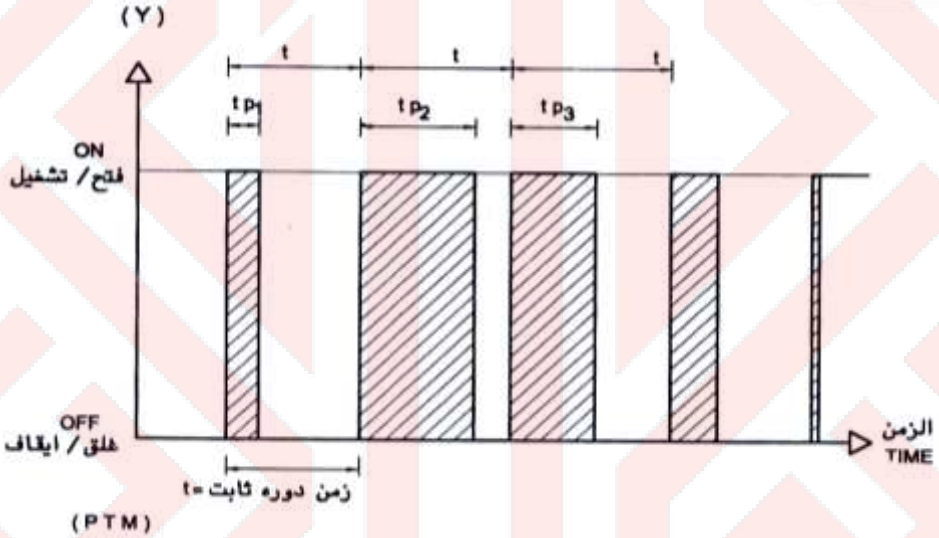




الشكل 9-2/3: العلاقة بين خرج المتحكم والزمن فى نظام التحكم ثلاثى الوضع.



الشكل 9-4/2: التحكم بتعديل عرض النبضة.



الشكل 9-5/2: التحكم بتعديل زمن النبضة.

9-3 مكونات منظومات التحكم التلقائي (Components of self acting systems)

9-3/1 عنصر التحسس (ناقل الاشارة) (Sensing element)

يتولى عنصر التحسس(المستشعر) أو ما يسمى بعنصر القياس التحسس على المتغير الخاضع للتحكم مع إرسال إشارة دخول إلى المتحكم. وتصنف المتحسسات إلى متحسسات حرارة أو رطوبة أو ضغط أو منسوب أو تدفق. ويختار المتحسس على وفق عدة عوامل تعتمد على التطبيق المستعمل فيه وطريقة ومكان تركيبه واستعماله. ويراعى عند الاختيار ملاءمة حدود التحسس المقاسة ودقتها وملاءمة إشارة المتحسس لجهاز التحكم كذلك ملاءمته لنوع المائع والمصدر الكهربائي.

9-3/2 المتحكم (منظم التحكم) (Controller)

المتحكم أو ما يسمى جهاز التحكم يقوم أولاً بعملية المقارنة بين قيمة المتغير المقاسة والقيمة المرغوبة. ويقوم بالعملية الحسابية والمنطقية التي تنتهي بإصدار قرار يرسله المتحكم على شكل إشارة نتاج إلى عنصر التحكم النهائي (وحدة التصحيح) بهدف الوصول إلى قيمة متغير التحكم المقاسة مساوية للقيمة

المرغوبة والحفاظ عليها كما في الشكل (9-1/3). ويعتمد نتاج المتحكم على نوع منظومة التحكم التي اختيرت على اساس مقدار الانحراف المسموح وسرعة الاستجابة والاستقرار. وانواع منظومات التحكم هي:

9-3/2/1 منظومة التحكم التناسبي (Proportional control)

وفيها يكون نتاج المتحكم متناسبا مع الخطأ. أي الفرق بين القيمة المقاسة والقيمة المطلوبة لمتغير المتحكم.

$$Y = K_p \cdot e \qquad (9-1/3)$$

حيث: K_p ثابت التناسب وينشأ عن اعتماد منظومة التحكم التناسبي على تذبذب القيمة المقاسة لمتغير التحكم صعودا وهبوطا عن القيمة المرغوبة حتى تستقر المنظومة عند فرق ثابت بين القيمتين يسمى بالحيود.

9-3/2/2 منظومة التحكم التناسبي والتكاملي (Proportional and integral control)

وفيها يكون نتاج المتحكم (Y) مكوناً من مجموع كل من: التناسب مع الخطأ والتناسب مع التكامل الزمني للخطأ. وفيها يكون معدل التغير في الناتج متناسبا مع قيمة الانحراف.

$$Y = K_p \cdot e + K_i \int e.dt \qquad (9-2/3)$$

حيث: K_i ثابت التكامل.

وتستعمل منظومة التحكم التكاملي مع منظومة التحكم التناسبي لتقليل أو إلغاء الحيود عند حد معين. ويمثل تكامل الخطأ التكامل الزمني للخطأ.

ولتقليل الحيود يجب أن يكون ثابت التناسب كبيراً، لان زيادة قيمته تعني زيادة حساسية السيطرة نسبة إلى حزمة تناسب ضيقة. ولكن الإفراط في تشغيل عالي الحساسية مع حزمة تناسب ضيقة جدا يحول التحكم التناسبي إلى تحكم ثنائي الموقع.

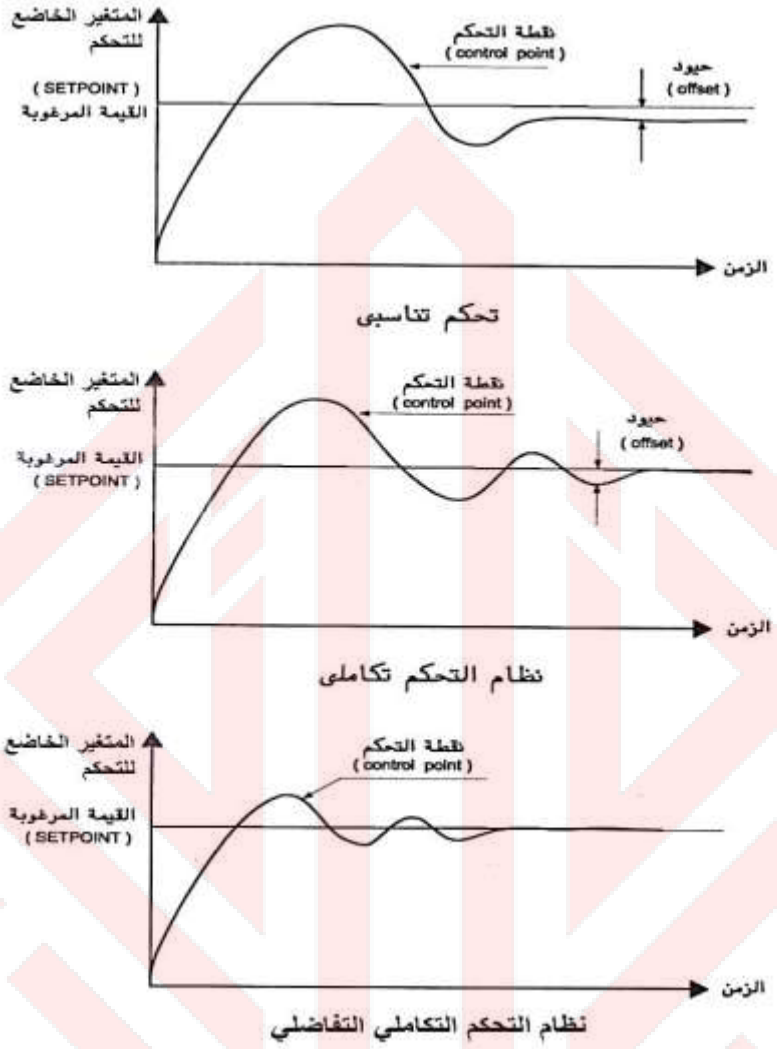
9-3/2/3 منظومة التحكم التناسبي والتكاملي والتفاضلي
(Proportional, integral and derivative control)

وفيها يكون نتاج المتحكم (Y) مكوناً من مجموع كل من: التناسب مع الخطأ والتناسب مع التكامل الزمني للخطأ والتناسب مع التفاضل الزمني للخطأ.

$$Y = K_p \cdot e + K_i \int e.dt + K_d.de/dt \qquad (9-3/3)$$

حيث: K_d ثابت التفاضل

وللحصول على منظومة تحكم مستقر والحد من التذبذب بعيدا عن القيمة المرغوبة، تستعمل منظومة التحكم التكاملي والتناسبي سوية مع منظومة التحكم التناسبي بشرط عمل توليف للمنظومتين بدقة. ويمثل تفاضل الخطأ معدل تغير الخطأ مع الزمن. وفي هذه المنظومة يكون تغيير النتاج في المتحكم متناسباً مع معدل التغير في الانحراف[5,3].



الشكل 9-1/3: العلاقة بين متغير التحكم بالنسبة للزمن لكل من التحكم التناسبي مع التكاملي والتحكم التناسبي التكاملي والتفاضلي.

9-3/3 اداة التحكم النهائي (وحدة التصحيح) (Correcting unit)

يقوم عنصر التحكم النهائي (وحدة التصحيح) بتنفيذ قرارات المتحكم، التي من شانها ان تعمل على تقليل الفرق بين القيمة المقاسة والقيمة المرغوبة لمتغير التحكم والذي يعرف بالخطأ. ومن الأنواع شائعة الاستعمال لعناصر التحكم في منظومات التثليج هي الصمامات وصفائح تنظيم الهواء.

ويمكن تصنيف وظائف الصمامات الأوتوماتيكية المستعملة في تطبيقات تكييف الهواء والتثليج إلى امور ثلاثة. أولاً فتح او غلق مجرى المائع استجابة لتغير في درجة الحرارة او الضغط، وثانياً تنظيم معدل تدفق المائع استجابة لإشارة في منظومة التحكم، وثالثاً الحفاظ على ضغط معلوم للمائع. وتعد الصمامات التي تشتغل بملف لولبي كهربائي (solenoid valve) من أكثر الصمامات الأوتوماتيكية المستعملة لعملية الفتح والغلق في منظومات التثليج. ويعد صمام التمدد الثرموستاتي (thermo expansion valve) الأكثر استعمالا لتنظيم معدل تدفق مائع التثليج. ويستعمل الصمام ثلاثي المسالك في تنظيم معدل تدفق الماء المثلج. وأخيرا

يستعمل صمام الضغط الثابت للحفاظ على ضغط ثابت في المبخر أو سحب ثابت للضاغط في دورات التثليج الانضغاطية.

وتقوم صفائح تنظيم تيار الهواء (air dampers) بتنظيم معدل تدفق الهواء المكيف. وقد تتكون صفائح التنظيم من صفيحة واحدة أو تتكون من مجوعة صفائح مرتبطة مع بعضها بعتلات متوازية الحركة (parallel blades) أو متعاكسة (opposed blades) تمتد على طول المجرى وعندما تنغلق تغلق مجرى الهواء تماما. وترتبط الصمامات وصفائح التنظيم بمحرك قد يكون كهربائيا وهو الشائع أو يعمل بالهواء المضغوط.

4/3-9 ملحقات أخرى (لاقط كهرومغناطيسي، مرحل، موقت) (Contactor, relay and timer)

المرحل عبارة عن مفتاح كهربائي ذي ملف لولبي ونقاط اتصال كهربائية تكون عادة اما مفتوحة أو مغلقة. يستعمل المرحل في تشغيل الاحمال الكهربائية الصغيرة أو مصابيح استدلال في آن واحد. فمثلا يستعمل مفتاح الجريان الموصول على التوالي مع ملف المرحل في السيطرة على عمل الضواغط والمراوح الصغيرة في دورة التثليج الانضغاطية وعمل مصابيح استدلال التشغيل والاطفاء. فمع وجود الجريان يربط ملف المرحل بخط الدائرة الكهربائية الرئيسة جاعلا إياه في حالة فعالة. وبذلك تتغير حالة النقاط الكهربائية من غلق إلى فتح أو عكس ذلك. ويدعى هذا النوع من المرحلات بمرحل التشابك. وتستعمل انواع أخرى من المرحلات كبادئ حركة في ضواغط التثليج الصغيرة المستعملة في الثلاجات والمجمدات وبرادات الماء. ويتلخص عملها في فصل ملف البدء بعد وصول سرعة المحرك الكهربائي 75 % من السرعة عند الحمل الكلي. وهنالك ثلاثة أنواع أساسية من هذه المرحلات تصنف بحسب مصدر التأثير في فصل ملف البدء. ومصدر التأثير إما أن يكون حراريا لذا تسمى بمرحل السلك الساخن أو تياراً ويسمى بمرحل التيار أو فولتية ويسمى بمرحل الفولتية.

اما اللاقطات الكهربائية فهي مشابهة إلى المرحلات إلا انها تستعمل مع الأحمال الكبيرة. فهي ايضا مكونة من ملف كهربائي ونقاط اتصال كهربائية عاملة وأخرى مساعدة كجزء من الدائرة الكهربائية. تستعمل اللاقطات الكهربائية للسيطرة على توصيل أو قطع المصدر الكهربائي عن الضواغط والمراوح الكبيرة في دورة التثليج الانضغاطية.

تتكون المؤقتات الزمنية من محرك كهربائي أحادي الطور ذي نوع سنكروني (synchronous) مشابه لما يستعمل في الساعات الجدارية وذراع على هيئة عتبة (cam) ومجموعة عتلات وتروس لتشغيل نقاط الاتصال الكهربائية. تستعمل المؤقتات الزمنية لإغراض مختلفة، منها لتأخير التشغيل لزمن محدد مسبقا، كما في تأخير اشتغال الضاغط بعد مروحة المكثف في دورة التثليج الانضغاطية. وتستعمل في التشغيل والإطفاء المتناوبين بزمن محدد كما في عملية السيطرة على عمل مسخن إزالة الصقيع. كذلك تستعمل في الإطفاء وتوقف العمل بدء زمن محدد من بدء التشغيل كما في تشغيل ملف البدء في المحركات الكهربائية وإطفائه بعد زمن محدد[8,6] .

9-4 مقاييس ومفاتيح الحماية التلقائية (Self protecting measuring devices and switches)

9-4/1 أدوات القياس (Measuring devices)

9-4/1/1 ادوات قياس وضبط درجة الحرارة (Temperature measurement)

تتلخص وظيفة أدوات قياس وتثبيت درجة الحرارة بأن تقاس درجة حرارة الظرف الخاضع للسيطرة بواسطة عنصر القياس. وقد يكون الوسط المسيطر عليه هواء الغرفة أو الماء المثلج في ملف تبريد أو وحدة تثليج ماء أو ماءٌ ساخناً أو البخار أو غيره. ثم تتولى اداة القياس انتاج إشارة مناظرة لقيمة الظرف المسيطر عليه والتي قد تستعمل لتقليل الانحراف. وقد يكون ذلك بفتح أو غلق صمام أو فتح أو غلق صفائح تنظيم أو تشغيل جهاز أو ايقافه عن العمل وما إلى ذلك من غاية مقصودة من جهاز التحكم. وقد تكون الإشارة الناجمة عن عنصر القياس على عدة اشكال بحسب طبيعة عمله. فقد تكون على شكل قوة أو إزاحة ميكانيكية أو ضغط أو اختلاف في فرق الجهد الكهربائي أو التيار الكهربائي وهكذا. ويسمى عنصر القياس وملحقات الضبط وتوليد الاشارة فيما يخص درجة الحرارة بمثبت درجة الحرارة أو الثرموستات. ومن اكثر عناصر القياس استعمالاً في حقل تكييف الهواء مايلي[9,7]:

9-4/1/1/1 محارير الاتصال الزئبقية (Mercury contact thermometer)

وهي محارير زئبقية مجهزة بنقاط اتصال كهربائية داخل ساق المحرار، وعند ارتفاع أو انخفاض عمود الزئبق تغلق الدائرة الكهربائية أو فتحها مولدة بذلك الإشارة المطلوبة. ويعطي اختيار المحرار المناسب مع درجة الدقة المناسبة قياسا مباشراً دقيقاً ومعتمداً عليه. وتتوافر هذه المحارير بمجال من 40- درجة مئوية وهي درجة انجماد الزئبق الى حوالي 540 درجة مئوية وهي درجة تلدن الزجاج. وتعد محارير الاتصال ملائمة جدا للتحكم ثنائي الموقع.

9-4/1/1/2 محارير ذات شريحة ثنائية المعدن (Bimetal strip thermometer)

ويتلخص عمل هذه المحارير المتكونة من تثبيت شريحتين من معدنين مختلفين إلى بعضهما حيث يسبب اختلاف معامل التمدد الحراري لهما انثناءهما سوية عند تغير درجة الحرارة مؤديا بذلك إلى غلق أو فتح دائرة كهربائية. ومجال عمل هذه المحارير من 80- إلى 420 درجة مئوية. ويستعمل هذا النوع من المحارير للسيطرة على درجة حرارة الهواء اعتياديا.

9-4/1/1/3 قوارير تمدد الموائع (Fluid expansion phials)

وهي قوارير صغيرة أو بصيلات تملأ بمائع ذي معامل تمدد حراري مناسب.وترتبط بواسطة أنبوب شعري (capillary tube) الى اسطوانة متعرجة (bellows) أو إلى أنبوب بوردن (Bourdon) أو الى رق (diaphragm). وتتولد نتيجة تمدد المائع حركة مستقيمة في الاسطوانة المتعرجة أو لولبية في انبوب بوردن أو حركة دفع في الرق. وتستعمل هذه الحركات لتوليد إشارات تناسبية أو فتح وغلق دورة كهربائية. وتستعمل هذه العناصر بصورة خاصة في اجهزة الثرموستات للسيطرة على درجة حرارة الموائع غير الهواء، بان توضع القوارير الصغيرة في تماس مع انبوب ماء مثلج أو ماء ساخن أو بخار ماء أو مائع تثليج أو غيره. حيث تنصب القارورة في المكان المناسب وتربط بالثرموستات بأنبوب شعري طويل. ويوضع الثرموستات اعتياديا

في لوحة سيطرة وحدة التثليج. وتملأ القارورة بكمية ثابتة محددة المقدار من المائع تتناسب مع حدود درجة الحرارة ونوع التطبيق. وحدود استعمالها من 35− الى 350 درجة مئوية. وقد يستعمل الغاز بدلا من السائل وعند ذاك يعد العنصر محرار ضغط وليس محرار تمدد مائع.

9−4/1/1/4 المزدوج الحراري (Thermocouple)

تبعا للظاهرة الكهروحرارية وعند ربط زوج من سلكين معدنين مختلفين بحيث يؤلفان حلقة، واذا كانت نقطتا الاتصال بدرجتي حرارة مختلفتين فان تيارا سيسري في هذه الحلقة. وتعتمد قيمة واتجاه التيار على فرق درجات الحرارة وعلى المزدوج المعدني. ويستعمل التيار الكهربائي أو فرق الجهد الكهربائي، اذا كانت الحلقة غير مغلقة، كمتغير للقياس. ويتراوح مجال درجات استعمال المزدوجات الحرارية من 260− إلى حوالي 2600 درجة مئوية اعتمادا على نوع المزدوج الحراري المستعمل.

ومن المزدوجات الشائعة :الحديد والكونستنتان، النحاس والكونستنتان، وسبائك الكروميل والاليوميل. وتتوافر اسلاك المزدوجات بأقطار مختلفة من الدقيق جدا الى السميك نسبيا لملاءمة نوع الاستعمال. وتستعمل عناصر قياس درجات الحرارة هذه مع دائرة كهربائية ومؤشر أو مسجل رقمي في لوحة سيطرة مركزية.

9−5/1/1/4 محارير المقاومة (Resistance thermometer)

تعمل محارير المقاومة بمبدأ تغير مقاومة الموصل الكهربائي مع درجة حرارته. وتستعمل هذه الخاصية لبعض الموصلات للقياس الدقيق أو التغذية المرتدة (feed back) وعلى غرار استعمال المزدوج الحراري. ويعتمد مجال درجات عمل هذه المحارير على نوع المادة المستعملة، ويتراوح من 265- إلى حوالي 650 درجة مئوية.

9−6/1/1/4 الثرمستور (Thermistor)

وهو من أشباه الموصلات ويصنع من أوكسيدات المعادن. ويعطي علاقة أسية عكسية بين المقاومة الكهربائية ودرجة الحرارة. وتكون استجابته غير خطية ولكنها شديدة الحساسية لحد 100 درجة مئوية. ومن المعادن الشائعة في صناعة الثرمستور البلاتنيوم لانه ذو استقرارية وموثوقية عالية. وقد اخذت الكثير من الشركات بصناعة ثرموستات الغرف من دائرة كهربائية تعتمد على الثرموستور عنصرا للقياس ولا تحتوي على اية اجزاء ميكانيكية متحركة ولا نقاط اتصال كهربائية مفتوحة قد تسبب صدور شرارات كهربائية. فهو بذلك مناسب تماما ليستعمل في الاماكن التي يشترط فيها عدم حصول اي شرارة كهربائية مثل المناطق التي تحتوي غازات أو مواد قابلة للاشتعال أو الانفجار.

9−2/1/4 ادوات قياس وضبط الرطوبة (Humidity measurement)

هنالك نوعان من عناصر قياس الرطوبة هما الميكانيكي والكهربائي. ويرتبط عنصر القياس بأجزاء اخرى تحول التغير الحاصل في الرطوبة إلى فعل ميكانيكي أو كهربائي أو غيره مع وجود ادوات ضبط وتدريجات مرقمة. ويسمى المنظم التلقائي كاملا جهاز ضبط الرطوبة أو الهيومدستات (humidstat). ويتحكم عادة بعمل جهاز ترطيب أو نفاثات الترطيب بالماء أو البخار. يستعمل النوع الميكانيكي مادة ماصة للرطوبة (مسترطبة) مثل شعر الإنسان أو الحصان أو الجلد الرقيق وماشابه. ويتغير طول هذه المواد مع تغير

الرطوبة النسبية. وتستعمل عادة على شكل شريط يتصل بعتلات ميكانيكية لإحداث حركة ميكانيكية من تمدد وتقلص في شريط المادة المسترطبة تتحول فيما بعد الى اشارة كهربائية لغلق وفتح دائرة كهربائية مثلا أو ميكانيكية مثل تغير الضغط في خط سيطرة يعمل بالهواء المضغوط.

ويستعمل النوع الكهربائي مسترطبا مثل بروميد الليثيوم الذي تتغير مقاومته الكهربائية مع تغير الرطوبة. ومع تغير الرطوبة تنتج عادة تغيرات ضئيلة في التيار الكهربائي يجب تضمينها الكترونيا للحصول منها على تحكم تناسبي في الدائرة الكهربائية [8,7].

9-4/1/3 ادوات قياس وضبط الضغط وفرق الضغط (Pressure measurement)

وفيها يقوم عنصر القياس بقياس التغيرات الحاصلة في المتغير المراد السيطرة عليه وهو الضغط مولدا تأثيراً مناسباً على محول الإشارة. وقد تكون الإشارة على شكل قوة أو إزاحة ميكانيكية أو ضغط. ويمكن تقسيم عناصر تحسس الضغط الى صنفين اعتمادا على حدود الضغط، الأول لقياس الضغط (pressure) والثاني لقياس الخواء (vacuum). وتكون عناصر القياس عادة اما اسطوانة مرنة متعرجة أو انبوبة بوردن أو رقاً. وتنقل الحركة الميكانيكية الى مؤشر مع تدرج للضغط لقياسه. ويجب ان يكون تدرج الضغط ومداه مناسبين للتطبيق المطلوب[9,7].

9-4/1/4 ادوات قياس وضبط التدفق (Flow measurement)

ادوات وقياس وضبط التدفق هي بالأساس ادوات أمان لحماية ضواغط مثلجات الماء عند نقص معدل جريان الماء المثلج أو ماء المكثف. ولهذا الغرض تستعمل الصفيحة المثقوبة (orifice plate). وتوضع الصفيحة المثقوبة مع نقاط توصيل الضغط بإحكام في المكان المناسب في مجرى الهواء أو الماء، حيث يشير فرق الضغط الحاصل بين وجهيها الى معدل الجريان. ومع انخفاض معدل الجريان يهبط فرق الضغط. ويستعمل هبوط الضغط هذا في فعل ميكانيكي لقطع الدائرة الكهربائية عن منظومة التثليج[9,8] .

9-4/2 مفاتيح الحماية (safety switches)

9-4/2/1 مفتاح الحماية من درجة الحرارة العالية (High temperature switch)

يعمل مفتاح الحماية من درجة الحرارة العالية عادة بواسطة شريحة ثنائية المعدن، توضع على التوالي مع دائرة سيطرة المنظومة لكي تفصل أو تغلق نقاط الاتصال في دائرة التغذية الكهربائية عند وصول درجة الحرارة الى القيمة العالية الخطرة. فمثلا يستعمل هذا المفتاح لحماية ملفات المحرك الكهربائي لضاغط التثليج من ارتفاع درجة الحرارة عن الحد المسموح وذلك بقطع الدائرة الكهربائية وإطفاء الضاغط. ويستعمل المفتاح كذلك في تشغيل مروحة المكثف عند ارتفاع درجة حرارة المكثف عن الحد المسموح [10,8].

9-4/2/2 مفتاح مانع الانجماد (Antifreeze switch)

وهو مفتاح حساس للحرارة. هنالك طرائق مختلفة للتحسس بالحرارة، منها من خلال شريحة ثنائية المعدن ونقاط اتصال كهربائية أو نقاط اتصال زئبقية. يوضع مفتاح مانع الانجماد على التوالي مع دائرة سيطرة

منظومة التثليج. ويقوم بقطع التيار عن محرك الضاغط وايقافه عند انخفاض درجة حرارة المائع عن قيمة محددة مسبقا منعا لحدوث انجماد ذالك المائع.

9-4/2/3 مفتاح الحماية من الضغط العالي والمنخفض (Pressure switch)

تستعمل مفاتيح الضغط الأوتوماتيكية لحماية الضاغط في دورات التثليج الانضغاطية وايقافه عن العمل بإشارة من المفتاح. ويتكون مفتاح الضغط من اسطوانة متعرجة تتحرك بالتمدد مربوطة بأنبوب شعري يتصل مباشرة بضغط النقطة التي يراد قياس ضغطها وترتبط الاسطوانة المتعرجة (bellows) بمجموعة عتلات متصلة بمفتاح كهربائي بحيث تفصل أو تغلق دائرة كهربائية مسببة ايقاف الضاغط عن العمل أو اعادة تشغيله. ويوجد تدرج مع نوابض قابلة للتنظيم لضبط ضغط ايقاف الضاغط وضغط اعادة تشغيله. واهم ثلاثة انواع منها، مفتاح الضغط العالي (high pressure switch) ومفتاح الضغط الواطئ (low pressure switch) ومفتاح ضغط الزيت (oil pressure switch).

يقوم مفتاح الضغط العالي بقياس ضغط المكثف أو ضغط الدفع في الضاغط اي ضغط الجانب العالي من الدورة وايقاف الضاغط عن العمل عندما يفوق قيمة محددة على تدرجه. وعندما يرتفع الضغط تتحرك الاسطوانة المتعرجة في مفتاح الضغط العالي ومعها عتلات التركيبة لفتح اتصال كهربائي مسببا قطع التيار الكهربائي عن محرك الضاغط وايقافه. ويقوم مفتاح الضغط الواطئ بقياس ضغط السحب في الضاغط اي ضغط الجانب الواطئ. وعندما ينخفض الضغط عن قيمة محددة على تدرجه تتحرك الاسطوانة المتعرجة في مفتاح الضغط الواطئ ومعها عتلات التركيبة لفتح اتصال كهربائي مسببا قطع التيار الرئيس عن محرك الضاغط وايقافه. ثم عند ضغط الجانب الواطئ يقوم بتوصيل الدائرة الكهربائية واعادة تشغيل الضاغط. اما مفتاح ضغط الزيت فيقوم بايقاف الضاغط عند انخفاض ضغط زيت تزييت الضاغط عن قيمة محددة مسبقا [10,8].

9-4/2/4 مفتاح الحماية من الحمل العالي (التيار العالي) (Overload switch)

يصمم مفتاح الحمل العالي لحماية محرك الضاغط أو المراوح في دورة التثليج الانضغاطية من التلف عند حدوث الحمل العالي. ان معظم مرحلات الحمل العالي تعمل بالحرارة. وبما أن مفتاح الحمل العالي يكون حساساً لتيار المحرك فان مسخن مرحل الحمل العالي يكون موصولاً على التوالي مع المحرك. وبذلك يقوم بقطع التيار الرئيس عن المحرك وايقافه عند ارتفاع درجة حرارته نتيجة ارتفاع التيار المار فيه. هنالك نوعان اساسيان من مفاتيح الحمل العالي وهما النوع ذو الموصل الذائب والنوع ذو الشريحة ثنائية المعدن[10,8] .

9-4/2/5 مفتاح مسخن الزيت (Oil heater switch)

يصمم مفتاح مسخن الزيت لحماية الضاغط من التلف وذلك بالسيطرة على عمل مسخن الزيت والحفاظ على درجة حرارته بفعل ثرموستات في دورة التثليج الانضغاطية بضاغط طارد مركزي. أو من خلال لاقط

كهرومغناطيسي أو مرحل كهربائي موصول على التوالي مع محرك الضاغط الترددي أو الدوراني يعمل خلال توقف الضاغط في دورة التثليج الانضغاطية.

مراجع الباب 9

[1] Joudi K., "***Principles of Air Conditioning & Refrigeration***", Iraq, 1988.

[2] "***Arabian Code for Air conditioning and Refrigeration in Buildings***", 2008.

[3] ASHRAE, "***1997 ASHRAE Handbook : Fundamentals***", The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A., 1997

[4] ASHRAE, "***1999 ASHRAE Handbook : Applications***", The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A.,1999.

[5] ASHRAE, "***2000 ASHRAE Handbook : Systems***", The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, Georgia, U.S.A. , 2000.

[6] Althouse, A. C., Turnquist, A., and Bracciano, A. , "***Modern Refrigeration and Air Conditioning***" , The Goodheart - Wilkox Co., Inc. Illinois, U.S.A. ,1996.

[7] Miller,R. and Miller,M.R., "***Air Conditioning and Refrigeration***", McGraw-Hill, U.S.A., 2006.

[8] Stephen, L. H. and Benniel, L. S., "***Electricity and Control for Heating, Ventilating and Air Conditioning***", Delmar Publishers, U.S.A. ,1998.

[9] Edward H.J., "***Control for Heating, Ventilating and Air Conditioning***", McGraw-Hill, U.S.A., 1980.

[10] ANSI/ASHRAE , "***Safety Code for Refrigeration***", The American National Standards Institute, U.S.A., 1994.

دائـــرة المبانـــي

مشروع المدونات و المواصفات العراقية

www.codat.imariskan.gov.iq

E.mail:moch.codat@codat.imariskan.gov.iq

moch.codat@yahoo.com

moch.codat@gmail.com