جمهورية العراق
وزارة التربيـــــة
المديرية العامة للتعليم المهني

العلوم الصناعية

الصناعي /تكييف الهواء والتثليج

الأول

تأليف

أ.د. عبد الهادي نعمة خليفة
أ.م.د. إصبيح وسمي مايد
أ.م.د. إحسان كاظم النعيمي
أ.م.د. حسنين محمد حسين

الطبعة السابعة
1446هـ - 2024 م

بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمة

شُكلت لجنة مختصة من قبل المديرية العامة للتعليم المهني لإعداد كتاب العلوم الصناعية ـ المرحلة الأولى ـ لطلبة إعداديات الصناعة تخصص تكييف الهواء والتثليج، كمساهمة جزئية ضمن خطة شاملة لتحديث المناهج التعليمية لجميع الاختصاصات المهنية لتواكب النهضة العلمية والتكنولوجية التي يشهدها بل يعيشها العالم اليوم، ومنها اختصاص تكييف الهواء والتثليج الذي يعتبر واحداً من أهم التخصصات المهنية في العالم، حيث تدخل هذه المهنة في الكثير من مجالات الحياة المختلفة، فعلى سبيل المثال وليس الحصر، نجد أجهزة التثليج مثل الثلاجات والمجمدات وبرادات الماء في كل منزل ناهيك عن أجهزة تكييف الهواء التي أصبحت من ضروريات الحياة العصرية التي تستخدم بكثرة في المنازل والمساكن وفي جميع الأبنية التجارية والخدمية ووسائط النقل المختلفة مثل السيارات والطائرات والقاطرات والسفن وغيرها.

وكذلك لا يكاد يخلو أي خط تصنيعي من عمليات التثليج والتكييف فيها، حيث نلاحظ استخدام منظومات التثليج والتكييف في جميع المصانع والمعامل مثل مصانع تعليب الأغذية وإنتاج المشروبات، فضلاً عن أن معظم الخطوط الإنتاجية من مصانع المواد والأجهزة الكهربائية والإلكترونية، ومعامل إنتاج الأقمشة والملابس، ومعامل إنتاج المواد الهندسية التي تدخل في جميع مجالات الحياة. وليس بالإمكان حصر وتعداد جميع النشاطات التجارية والخدمية والتصنيعية التي تكون منظومات التثليج وتكييف الهواء جزءاً أساسياً منها.

تم إعداد الكتاب بواقع أحد عشر فصلاً، تناولت العشرة الأولى منها مفاهيم وأساسيات علوم الموائع، وديناميك الحرارة، وموائع التثليج، ودورات التثليج البسيطة، فضلاً عن مُعدات أجهزة التثليج الأساسية، والتفريغ والشحن. ثُمَ تناول الفصل الأخير أساسيات ومفاهيم ومكونات الدوائر الكهربائية بالإضافة إلى القوانين المهمة التي لها علاقة بمبادئ الكهرباء التي يحتاجها الطالب في فترة دراسته وكذلك في أثناء ممارسته مهنة التثليج والتكييف بعد التخرج.

ولانضمام بلدنا العزيز مؤخراً لاتفاقية فيَنا والتوقيع على بروتوكول مونتريال بخصوص المحافظة على البيئة وحماية طبقة الأوزون وحل مشكلة الاحترار العالمي (GW) فقد تناول الكتاب موائع التثليج المؤثرة سلباً في هذا المجال من خلال الإشارة إلى موائع التثليج التي تم تحريم استخدامها والبدائل. والتطرق إلى كيفية الممارسات الصحيحة لمهنة تكييف الهواء والتثليج في مجال التفريغ والشحن.

لقد تم إدراج أمثلة محلولة في حسابات القوانين والمعادلات الرياضية وغيرها في المواضيع ذات العلاقة. فضلاً عن إعطاء أسئلة مختلفة في نهاية كل فصل ليتمكن الطالب بمساعدة مدرسي المادة من فهم

القوانين والمعادلات بشكل أكبر، واستيعاب تخصص تكييف الهواء والتثليج بصورة علمية وفنية صحيحة ومن ثم يكون قادراً على المهام الفنية التي سوف يُكّلف بها مستقبلاً من نصب أجهزة التثليج وصيانتها وتحليل العطلات التي سوف تصادفه وإيجاد الحلول المنطقية الصحيحة لها. إن الفصول الدراسية المذكورة آنفاً ستكون بعون الله القاعدة الأساسية للمراحل الدراسية اللاحقة، وساندة لكتاب التدريب العملي للمراحل الدراسية الثلاث.

ندعو الله عز وجل أن نكون قد وفقنا في جهدنا بإعداد هذا الكتاب، وسنكون شاكرين لكل الأخوة المعنيين بهذه المادة إذا ما رفدوا بملاحظاتهم وآرائهم حول الكتاب مع شكرنا واعتزازنا بالجميع.

..... والله الموفق

بغداد / 2009

مقدمة الطبعة الثانية

بعد أن تم إعتماد الكتاب ولعام دراسي كامل، وردت إلينا بعض الملاحظات من الأخوة المدرسين والمدرسات منهم المهندسة **فائقة فاضل عباس**/ إعدادية الكرخ الصناعية والمهندس **سمير توفيق حيدر**/ إعدادية الهارثة الصناعية، وقد تم الأخذ بها جميعاً لما نرى فيها من مصلحة لطلبتنا الأعزاء وخصوصاً المعادلات الرياضية التي تخص المادة العلمية في الكتاب، **وتم الاتفاق على أن تكون المعادلات المظللة باللون الأزرق الغامق هي من مسؤولية الطالب من حيث فهمها وحفظها، أما بقية المعادلات فمسؤولية الطالب تنحصر بفهم حدودها فحسب وتعطى كمعلومة للطالب في الاختبارات**. ونوَد في هذا المجال أن نشكر جميع الأخوة الذين ساهموا في إبداء ملاحظاتهم القيَمة.

لا يسعنا إلا أن نتقدم ببالغ شكرنا وتقديرنا العالي للأساتذة الأفاضل الذين ساهموا بتقييم الكتاب وإبداء ملاحظاتهم وتوجيهاتهم من الخبراء العلميين والخبير اللغوي ولولاهم لما كان هذا الكتاب أن يكون بين أيدي إخوتنا المدرسين وأبنائنا الطلبة بهذا المستوى من الإخراج والتنسيق واللغة والمفردات العلمية الرصينة وهم:

- **أ. د. خالد أحمد الجودي**– أستاذ مادة التكييف والتثليج في قسم الهندسة الميكانيكية / بغداد.
- **أ. د. إحسان يحيى حسين**– أستاذ مادة الموائع وانتقال الحرارة في قسم الهندسة الميكانيكية/ بغداد.
- **د. عبد العباس عبد الجاسم** – الخبير اللغوي – المديرية العامة للمناهج.

المؤلفون

بغداد -2011

إهداء

المحتويات

		ص
الفصل الأول	**تعريفات عامة**	8
	وحدات القياس	9
	القوة	12
	الشغل	12
	الطاقة الحركية	12
	طاقة الموضع	13
	مصادر الطاقة	13
	القدرة	13
	الحرارة	13
	درجة الحرارة	13
	طرائق قياس درجات الحرارة	14
	الضغط	17
	أدوات قياس الضغط	19
	ديناميك الحرارة	21
	الأنظمة الحرارية	22
	الحرارة والشغل	23
	الحرارة المحسوسة والكامنة	25
	اسئلة الفصل	26
الفصل الثاني	**خواص المادة النقية**	27
	المادة النقية	28
	أطوار المادة النقية	28
	تغير طور المادة النقية	29
	جداول البخار	33
	خواص الموائع	33
	المعادلة العامة للغازات	35
	جدول الخواص الحرارية للبخار	38
	جدول الخواص الحرارية R-134a	42
	اسئلة الفصل	46
الفصل الثالث	**ديناميك الحرارة**	47
	القانون الصفري لديناميك الحرارة	48
	الشغل في ديناميك الحرارة	48
	الإجراءات في ديناميك الحرارة	49
	القانون الأول لديناميك الحرارة	50
	القانون الأول للنظام المغلق	50
	القانون الأول للنظام المفتوح	54
	تطبيقات على قانون الجريان	57
	اسئلة الفصل	64
الفصل الرابع	**القانون الثاني لديناميك الحرارة**	65
	صيغة القانون الثاني	66
	صيغة كلفن - بلانك	66
	صيغة كلازيوس	66
	دورة كارنو	67
	دورة كارنو المعكوسة	70
	تحسين دورة كارنو المعكوسة	72
	الموائع وطرائق الجريان	73
	معادلة برنولي	75
	قياس تدفق الموائع الحجمي	76
	اسئلة الفصل	79
الفصل الخامس	**موائع التثليج**	80
	مقدمة	81
	مجاميع موائع التثليج	81
	خواص موائع التثليج	82
	ترقيم موائع التثليج	83
	تأثير موائع التثليج على الأوزون	86
	موائع التثليج البديلة	87
	المحاليل الملحية	88
	مخطط خواص موائع التثليج	89
	مخططات خواص موائع التثليج	93
	اسئلة الفصل	99
الفصل السادس	**دورة التثليج الأنضغاطية**	100
	مقدمة	101
	دورة أنضغاط البخار المشبعة	101
	تمثيل الدورة على مخطط الخواص	103
	معامل أداء دورة التثليج	104
	اسئلة الفصل	108
الفصل السابع	**الضواغط**	110
	مقدمة	111
	الضواغط الترددية	113
	الضواغط الدوارة	118
	الضواغط اللولبية	119
	الضواغط الطاردة المركزية	120
	اسئلة الفصل	122

المحتويات

		ص
الفصل الثامن	**المكثفات والمبخرات**	123
	المكثفات	124
	مقدمة المكثفات	124
	المكثفات المبردة بالهواء	124
	المكثفات المبردة بالماء	126
	المكثفات التبخيرية	129
	أبراج التبريد	130
	اسئلة الفصل – الجزء الاول	132
	المبخرات	133
	مقدمة المبخرات	133
	المبخرات المبردة للهواء	133
	المبخرات المبردة للسوائل	135
	أسئلة الفصل – الجزء الثاني	137
الفصل التاسع	**أدوات التمدد**	138
	مقدمة	139
	الأنبوب الشعري	139
	صمام التمدد الآلي	141
	صمام التمدد الحراري	142
	صمام التمدد اليدوي	143
	الصفيحة المثقوبة	144
	أسئلة الفصل	144
الفصل العاشر	**التفريغ والشحن**	145
	مقدمة	146
	استعادة مائع التثليج	146
	دلائل التسرب	148
	وسائل الكشف عن التسرب	149
	تفريغ منظومة التثليج من الرطوبة	151
	شحن منظومة التثليج	153
	الشحن بغاز مائع التثليج	154
	الشحن بسائل مائع التثليج	155
	أسئلة الفصل	156
الفصل الحادي عشر	**أساسيات كهربائية**	157
	التركيب الإلكتروني للذرة	158
	مبادئ الكهرباء	158
	التيار الكهربائي	159
	الجهد الكهربائي	161
	القدرة الكهربائية	162
	التيار المستمر	163
	المقاومة الكهربائية	163
	الدوائر الكهربائية المتفرعة	167
	المتسعات	171
	توصيل المتسعات	173
	مبادئ التيار المتناوب	176
	قانون أوم	177
	القدرة الكهربائية	179
	أسئلة الفصل	183

الفصل الأول تعريفات عامة

General Definitions

تعريفات عامة General Definitions

1- 1 وحدات القياس System of Units

هنالك نظامان رئيسيان لوحدات القياس، النظام المتري (متر، كيلوغرام، ثانية) والذي كان يستخدم في بعض الدول، والنظام البريطاني (قدم، باوند، ثانية) والذي يستخدم في دول الكومنولث والولايات المتحدة الأمريكية وغيرها، ثم جاء النظام الدولي ليوحد وحدات القياس عالميا وسُمي بنظام الوحدات العالمي (SI Units) الذي يتكون من ستة وحدات أساسية وكما هو مبين في الجدول (1-1).

جدول 1-1 الوحدات الأساسية لنظامي الوحدات العالمي والبريطاني SI & Imperial Base Units

الكمية المقاسة ورمزها	النظام العالمي		النظام البريطاني	
	وحدة القياس	الرمز	وحدة القياس	الرمز
الطول (l)	متر	m	قدم	ft
الكتلة (m)	كيلوغرام	kg	باوند	Ib
الزمن (t)	ثانية	s	ثانية	s
التيار الكهربائي (I)	أمبير	A	أمبير	A
درجة حرارة الديناميك الحراري (T)	كلفن	K	رانكن	R
شدة الإضاءة (I_V)	شمعة	cd	الشمعة	Candela

ما تبقى من الوحدات فهي وحدات مشتقة من الوحدات الأساسية، كما موضح لبعضٍ منها في الجدول (1-2)

جدول 1-2 الوحدات المشتقة من نظام الوحدات العالمي SI-Derived Units

الكمية المقاسة ورمزها	وحدة القياس	الرمز	أساس الوحدة
القوة (F)	نيوتن	N	كغم.م/ثا^2
الشغل (W) والطاقة (E)	جول	J	نيوتن.م
القدرة (P)	واط	W	جول/ثا
الضغط (p)	باسكال	Pa	نيوتن/م^2
فرق الجهد الكهربائي (V)	فولت	V	واط/أمبير
المقاومة (R)	أوم	Ω	فولت/أمبير

ويمكن ملاحظة أن جميع الوحدات غير الأساسية مشتقةٌ من الوحدات الأساسية لنظام الوحدات.
ويمثل الجدول (1-3) عوامل التحويل بين نظام الوحدات الدولي والنظام البريطاني للوحدات.

جدول 1-3 تحويل نظام الوحدات العالمي إلى نظام الوحدات البريطاني

الوحدات بالنظام العالمي	الوحدات بالنظام البريطاني أو أي وحدات شائعة أخرى	التحويل إلى النظام البريطاني أو إلى وحدات شائعة أخرى
الطول (l)	3.2808 ft	1 ft = 0.3048 m
1 m	39.37 in	1 in = 2.54 cm
		1 mile = 5280 ft
الكتلة (m) 1 kg	2.205 Ib	0.4536 kg = 1 Ib
	0.0685 slug	1 Ib = 16 oz
الكثافة (ρ) $1\ kg/m^3$	$0.06243\ Ib/ft^3$	
القوة (F) 1 N	$0.225\ Ib_f$	$1\ Ib_f = 4.448822\ N$
الضغط (P)	$0.145\ Ib_f/in^2$ (psi)	1 bar = 100 kPa
1 kPa	0.2953 in Hg	$1\ bar = 1\ kg_f/cm^2$
1 ضغط جوي (جو)	14.696 psi	101.325 kPa
1 atm	29.921 in Hg	760 mm Hg
الطاقة E	$0.7376\ Ib_f.ft$	1 Cal = 4.184 J
1 J	0.0009478 Btu	1 Btu = 1.055 kJ
	0.2388 Cal	
	$2.778 \times 10^{-7}\ kW.h$	
القدرة (P)	$0.7376\ Ib_f.ft/s$	1 hp = 745.7 W
1 W	3.4121 Btuh	1 hp = 2544 Btuh
	0.001341 hp	1 TR = 3.515 kW
		1 TR = 12000 Btuh
الحرارة النوعية (C)	0.23885 Btu/Ib.°F	
1 kJ/kg.°C		

ملاحظة: وحدة حرارة بريطانية/ساعة (Btuh)، ورمز طن التثليج TR

مثال 1

1. حول (60 ft/s) إلى m/s.
2. حول ($30\ m^3/h$) إلى Cubic feet per minute (cfm).
3. كتلة أسطوانة أوكسجين (12 kg)، ما هي كتلتها بالـ Ib.
4. إذا كان الضغط الجوي في مدينة البصرة (98 kPa)، جد مقدار الضغط بوحدات (psi) و (Ib/ft^2).
5. كمية الحرارة المفقودة من مكثف منظومة تثليج (300 W)، جدها بوحدات (Btuh)
6. مكيف سعته (7.2 kW) جد سعته بوحدات Btuh و TR.

الجواب

اعتماداً على جدول (1-3)

1. $60\ ft/sec \times 0.3048\ m/ft = 18.288\ m/s$
2. $30\ m^3/h \times (3.281\ ft/m)^3 \times h/60\ min = 17.66\ ft^3/min$
3. $12\ kg \times 2.205\ Ib/kg = 26.46\ Ib$
4. $98\ kPa \times 0.145\ (Ib/in^2) / kPa = 14.21\ psi$

   $= 14.21 \times (1/12\ in/ft)^2 = 0.09868\ Ib/ft^2$
5. $300\ W \times (3.414\ Btuh)/W = 1024.32\ Btuh$
6. $7200\ W \times 3.414(Btuh)/W = 24580.8\ Btuh$

   $7.2\ kW \div 3.5169\ kW/TR = 2.04\ TR$. or

   $24580.8 \div 12000\ Btuh/TR = 2.048\ TR$

2-1 القوة Force (F)

تُعرف القوة بأنها المؤثر الذي يغير أو يحاول أن يغير من شكل الجسم أو حالته الحركية. أي عندما تتغير سرعة جسم مقداراً أو اتجاهاً أو كلاهما تتوقع أن هنالك مسببا لهذا التغيير، ينتج هذا التغيير من تأثير المحيط على الجسم.

النيوتن: القوة اللازمة لإكساب جسم كتلته (1 kg) تعجيلا مقداره ($1\ m/s^2$) باتجاه القوة المؤثرة.

3-1 الشغل Work (W)

يُعرّف الشغل بأنه حاصل ضرب لمتجه القوة المسببة في متجه الإزاحة التي تَحركها الجسم تحت تأثير القوة، ويُحسب الشغل من المعادلة التالية:

$$W = F \times X$$

حيث أن:

W	الشغل	(J)
F	القوة	(N)
X	الإزاحة	(m)

ووحدة قياس الشغل هي الجول

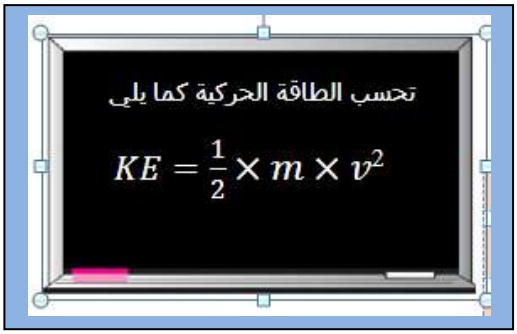
الجول: هو الشغل الذي تبذله قوة مقدارها (1 N) في تحريك جسم ما إزاحة مقدارها (1 m) باتجاهها.

4-1 الطاقة Energy

تُعرّف الطاقة أنها القابلية لإنجاز الشغل، وتكون الطاقة الميكانيكية مساوية للشغل المنجز على الجسم بتغير سرعته أو موضعه.

1-4-1 الطاقة الحركية Kinetic Energy

تُعرف الطاقة الحركية للجسم على أنها الطاقة الناتجة بسبب سرعته، عليه فإن أي جسم يتحرك يمتلك طاقة حركية، ويستطيع أن ينجز شغلا نتيجة طاقته الحركية. وتُحسب الطاقة الحركية من المعادلة التالية:



$$KE = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

حيث إن:

KE	الطاقة الحركية	J
m	كتلة الجسم	kg
v	السرعة	m/s

2-4-1 طاقة الموضع (الطاقة الكامنة) Potential Energy

هي قدرة الجسم على إنجاز شغل ما اعتماداً على موقع جزيئاته بعضها من بعض، أو اعتماداً على موقعه بالنسبة لأجسام أخرى مثل الكرة الأرضية. وتُحسب طاقة الموضع من المعادلة التالية:

$$PE = m \times g \times z$$

حيث أن:

PE	طاقة الموضع	J
g	التعجيل الأرضي	m/s^2
z	ارتفاع الجسم عن سطح الأرض	m

5-1 مصادر الطاقة Energy Resources

تقسم مصادر الطاقة إلى نوعين: الأول هو النوع التقليدي، والذي يشمل الوقود الاحفوري، وهو الوقود الذي يتم استخراجه من باطن الأرض بواسطة الحفر، مثل الفحم والنفط والغاز. وهنالك مصادر جديدة للطاقة، تم العمل عليها في سبعينيات القرن الماضي، وتشمل الطاقة النووية والطاقة الذرية، ويعمل حاليا على استخدام الطاقة المتجددة (Renewable Energy) التي لا تنضب مع مرور الزمن مثل الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، وطاقة باطن الأرض وغيرها من الطاقات التي لا تسبب تلوثاً للبيئة (صديقة للبيئة).

6-1 القدرة Power

القدرة هي المعدل الزمني لإنجاز الشغل، ووحدة قياسها هي الواط (**W**).

7-1 الحرارة Heat

تُعرف الحرارة على أنها صورة من صور الطاقة المنتقلة عبر حدود نظام ما إلى نظام آخر أو إلى المحيط. ويتم هذا الانتقال بسبب الفرق بدرجات الحرارة بين النظامين. ويحدث سريان الحرارة من النظام ذي درجة الحرارة الأعلى إلى النظام ذي درجة الحرارة الأدنى. لهذا تعتبر الحرارة مفهوماً انتقاليا.

وحدة قياس كمية الحرارة المنتقلة حسب النظام المتري هي السعرة (Cal) وفي النظام البريطاني وحدة حرارية بريطانية (Btu) وبالنظام العالمي للوحدات الجول (J).

8-1 درجة الحرارة Temperature

من المعروف أن مصطلح درجة الحرارة يعتمد على محاولة قياس مدى سخونة أو برودة الأجسام. ونتيجة للحاجة الماسة إلى تعبير رقمي يصف هذه السخونة أو البرودة، فقد وجدت عدة مقاييس لدرجات الحرارة، وهنالك ثلاثة أنظمة شائعة لقياس درجات الحرارة هي:

ت	نظام القياس	الوحدة	النظام
1	درجة الحرارة السيليزي	(˚C)	النظام العالمي
2	درجة الحرارة الفهرنهايتي	(˚F)	النظام البريطاني
3	درجة الحرارة المطلقة	(K)	النظام العالمي

ويمكن تحويل درجات الحرارة من نظام إلى آخر باستخدام العلاقات التالية:

درجة الحرارة الفهرنهايتية $^{\circ}F = \frac{9}{5}{}^{\circ}C + 32$

درجة الحرارة السيليزية $^{\circ}C = \frac{5}{9} \times (^{\circ}F - 32)$

درجة الحرارة المطلقة $\mathrm{K} = {}^{\circ}C + 273.15$

1- 9 طرائق قياس درجة الحرارة Methods of Temperature Measurement

تصنف مقاييس درجة الحرارة إلى مجموعات حسب نوع المادة المستخدمة في التحسس بدرجة الحرارة ونوع الخاصية المستخدمة في القياس، وفيما يلي مقاييس درجات الحرارة:

1-9-1 المحرار الزئبقي Mercury Thermometer

يصنف هذا المقياس في مجموعة مقاييس درجات الحرارة ذات السائل، حيث يتكون المقياس من أنبوب زجاجي شعري متصل من أسفله ببصلة زجاجية (مستودع الزئبق) ذات جدار رقيق لتأمين انتقال الحرارة عبر الجدار، كما في الشكل (1-1) وتكون البصلة عادة بشكل أسطواني أو كروي. تتم معايرة المقياس ووضع التدريج عليه بالاعتماد على درجة حرارة انصهار الجليد النقي ودرجة حرارة غليان الماء النقي عند الضغط الجوي القياسي.

يُعد الزئبق من أكثر المواد المستخدمة في مقاييس درجات الحرارة ذات السائل لسهولة مراقبته من خلال الزجاج، ولأنه لا يبلل سطح الأنبوب الزجاجي، ولأن معامل تمدده ذو قيمة عالية نسبيا تمكنه من تحسس تغيرات درجات الحرارة.

مجال استخدام المحرار الزئبقي محصورة بين درجة حرارة انجماد الزئبق (−38.87°C) ودرجة حرارة غليان الزئبق (356.58°C)

شكل 1-1 أنواع من مقاييس درجات الحرارة الزئبقية

2-9-1 مقياس درجة الحرارة الزجاجي الكحولي Alcohol Glass Thermometer

وهو مُشابه لمقياس درجة الحرارة الزئبقي من حيث التركيب وأسلوب المعايرة، يستخدم الكحول المضاف إليه صبغة حمراء من أجل الرؤية، إلا أنه لا يمكن استعمال هذا المقياس لدرجات الحرارة المنخفضة جداً أوطأ من (113°C−). ويوضح الشكل (1-2) مقياس درجة الحرارة الكحولي.

شكل 1-2 أنواع مقاييس درجات الحرارة الكحولية

3-9-1 مقياس درجة الحرارة بأنبوبة بوردن Bourdon Tube Thermometer

مقياس درجة الحرارة ذو أنبوبة بوردن ينتمي أيضا إلى مجموعة المقاييس ذات المائع، (يشار إلى السوائل والغازات بالمائع) ، ويشترط في هذه الحالة أن يكون المائع محصورا في حيز مغلق مثل بصيلة مملوءة بالمائع، توضع في المنطقة المراد قياس درجة حرارتها، وحَسَّب موقع هذه المنطقة عن أنبوبة بوردن أما أن توصل البصيلة بواسطة أنبوب شعري أو مباشرة مع أنبوبة بوردن، كما هو موضح في الشكل (1-3). يستخدم هذا النوع في قياس درجات الحرارة في الثلاجات ومجاري الهواء وغيرها. يستخدم في مدى من درجات الحرارة بين (35°C, 350°C−).

شكل 1-3 مقياس درجة الحرارة (أنبوبة بوردن)

4 -9-1 مقياس درجة الحرارة ثنائي المعدن Bi-Metallic Strip Thermometer

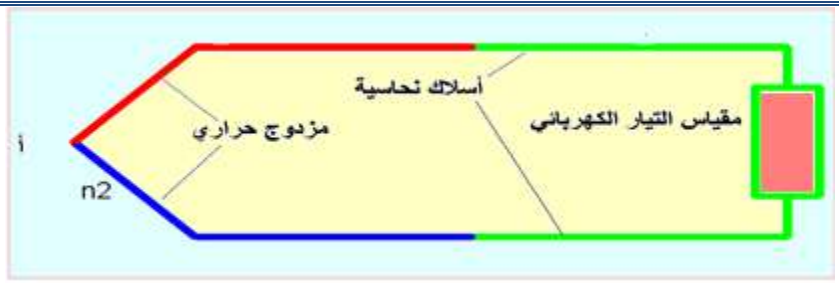
عبارة عن قطعتين رقيقتين من معدنين مختلفين في معامل التمدد الحراري، يتم ربطهما مع بعض بأحكام بواسطة لحام خاص، فينتج شريط ثنائي المعدن كما في الشكل (1-4 أ) ، عند تسخين ثنائي المعدن يحدث ميلان للشريط نتيجة تمدد أحد المعدنين أكثر من الآخر، هذه الحركة لثنائي المعدن و الناتجة عن تغيرات درجة الحرارة يمكن الاستفادة منها في أغراض مختلفة كما هو الحال في مقاييس درجات الحرارة ومنظمات درجات الحرارة (Thermostat)، ويبين الشكل (1-4 ب) مقياس درجة الحرارة ثنائي المعدن، ويمكن أن يكون ثنائي المعدن على شكل ملف تثبت إحدى نهايتيه وتربط الأخرى بمؤشر حر الحركة يدور على لوحة مدرجة تعطي قراءات لدرجات الحرارة كما في الشكل (1-4 ج). ويعتبر هذا النوع من المحارير ملائماً لمدى من درجات الحرارة بين (180°C, 420°C−).

أ ب ج

شكل 1-4 مقياس درجة الحرارة ثنائي المعدن

1-9-5 مقياس درجة الحرارة ذو المزدوج الحراري Thermocouple

يتكون المزدوج الحراري من سلكين معدنيين مختلفين مثل (حديد مع سبيكة نحاس ونيكل) ويعتمد اختيار المعادن أو السبائك المعدنية حسب مدى درجات الحرارة المطلوب قياسها كما في الشكل (1-5 أ). يتم وصل السلكين في النقطة (أ) التي تمثل نقطة التحسس بالحرارة، أما طرفا السلكين الآخرين فموصلان بمقياس للقوة الكهربائية، ويتغير فرق الجهد حسب ارتفاع درجة الحرارة عند النقطة (أ)، وفي المقاييس الحديثة تم استبدال مقياس التيار الكهربائي بتدريج يشير إلى درجة الحرارة مباشرة، كما هو مبين في الشكل (1-5 ب). تستعمل المزدوجات الحرارية بين درجتي حرارة $(-200°C, 1700°C)$.



شكل 1-5- أ طريقة ربط المزدوج الحراري

جهاز لقياس درجة حرارة

مزدوج حراري

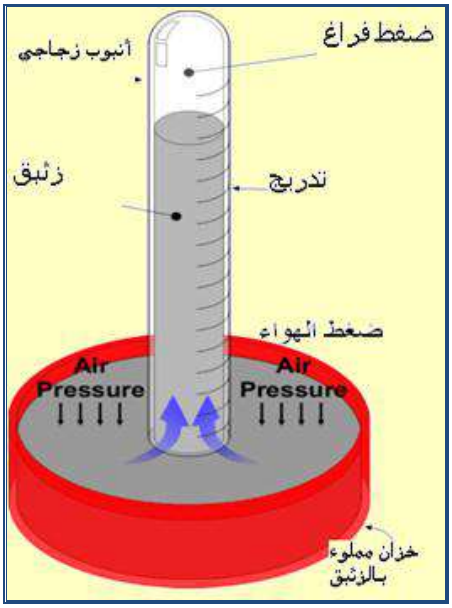
شكل 1-5 ب جهاز لقياس درجة الحرارة ذو المزدوج الحراري

10-1 الضغط Pressure

يُعرف الضغط بأنه مقدار القوة العمودية المسلطة على وحدة المساحة (قوة / مساحة) ووحدة قياسه حسب نظام الوحدات العالمي (N/m^2)، وتُعرف هذه الوحدة بالباسكال (Pa)، ويمكن استخدام مضاعفات هذه الوحدة مثل الكيلو باسكال (kPa) أو الميكا باسكال (MPa) وغيرها أما في النظام البريطاني فيستخدم (باوند/ قدم^2 psf) أو (باوند/ إنج^2 psi)، وهنالك العديد من الوحدات مثل (سم زئبق) (cm Hg) أو (إنج زئبق) (in Hg) أو (البار) (bar) الذي يساوي (100 kPa).

1-10-1 الضغط الجوي Atmospheric Pressure

الضغط الجوي في مكان ما هو مقدار الضغط الناتج عن وزن عمود الهواء (من الغلاف الجوي إلى سطح الأرض) على وحدة المساحة، ويكون الضغط الجوي على مستوى سطح البحر عند 20°C يساوي واحد ضغط جوي (101.3 kPa) ، ويزداد الضغط الجوي كلما انخفضنا عن مستوى سطح البحر ويقل عند الارتفاع عن سطح البحر. ومن ناحية أخرى يعتمد الضغط الجوي على درجة الحرارة فيرتفع الضغط الجوي مع انخفاض درجة الحرارة، ويقل مع ارتفاع درجة الحرارة. يقاس الضغط الجوي بالباروميتر الزئبقي وهو عبارة عن أنبوب مغلق من الأعلى مملوء بالزئبق مغمورة نهايته السفلى بحوض من الزئبق، كما هو مبين في الشكل (1-6)، قيمة الضغط الجوي هي 76 cm Hg عمود زئبق عند مستوى سطح البحر بدرجة حرارة مقدارها (20°C).



شكل 1-6 الباروميتر الزئبقي

مثال 2

1. أيهما أكبر الضغط الجوي في بغداد أم في أربيل؟ ولماذا؟
2. هل يختلف الضغط الجوي في الصيف عنه في الشتاء؟ ولماذا؟
3. حول 1.2 atm إلى (kPa ، psi ، cm Hg ، in Hg).

الجواب

1. يكون الضغط الجوي في بغداد اكبر منه في أربيل، بسبب إن ارتفاع اربيل عن مستوى سطح البحر هو أعلى منه في بغداد، لذلك يكون ارتفاع عمود الهواء في بغداد أكبر.

2. يعتمد الضغط الجوي على درجة الحرارة فيرتفع الضغط الجوي مع انخفاض درجة الحرارة، ويقل مع ارتفاع درجة الحرارة أي أنه في الشتاء أعلى مما هو عليه في الصيف.
اعتماداً على جدول (1-3)

3. $1.2\ \text{atm} \times 101.325\ \text{kPa/atm} = 121.59\ \text{kPa}$
$1.2\ \text{atm} \times 14.696\ \text{psi/atm} = 17.6352\ \text{psi}$
$1.2\ \text{atm} \times 76\ \frac{\text{cm}\ Hg}{\text{atm}} = 91.2\ \text{cm Hg}$
$1.2\ \text{atm} \times 29.921\ \text{in Hg/atm} = 35.9052\ \text{in Hg}$

1-10- 2 ضغط المقياس Gage Pressure

ضغط المقياس هو قيمة الضغط كما يظهر في أجهزة القياس باعتبار قيمة الضغط الجوي مساوية للصفر، لذلك تبدأ أغلب مقاييس الضغط بالتدريج من الصفر.

1-10-3 ضغط الخواء Vacuum Pressure

إذا كان الضغط في الحيز أقل من الضغط الجوي نقول إن الضغط داخل الحيز هو ضغط الخواء (ضغطاً خوائياً) وتكون قيمة القراءة تحت الضغط الجوي (قراءة سالبة).

1-10- 4 الضغط المطلق Absolute Pressure

ويمثل القيمة الحقيقية للضغط ويساوي مجموع الضغط الجوي والضغط المقاس. ويوضح الشكل (1-7) أنواع الضغوط أعلاه.

ضغط مطلق = ضغط جوي + ضغط مقاس

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{gage}$$

شكل 1-7 الضغط الجوي والضغط المقاس وضغط الخواء والضغط المطلق

مثال 3

1. جد الضغط المطلق في أسطوانة أوكسجين إذا كان الضغط المقاس فيها (5 bar) وكان الضغط الجوي (110 kPa).

2. ما هو الضغط المقاس في أسطوانة أوكسجين إذا كان الضغط المطلق (210 kPa) والضغط الجوي يساوي (98 kPa)؟

3. إذا كان الضغط في خزان ضغط خواء يساوي (20 kPa) وكان الضغط الجوي يساوي (100 kPa)، أوجد الضغط المطلق.

الجواب

1. $1\ bar = 100\ kPa$

$5\ Bar \times 100 = 500\ kPa$

$P_{abs} = P_{atm} + P_{gage}$

$P_{abs} = 500 + 110 = 610\ kPa$

2. $P_{abs} = P_{atm} + P_{ga}$

$P_{gage} = P_{abs} - P_{atm}$

$P_{gage} = 210 - 98 = 112\ kPa$

3. $P_{abs} = P_{atm} - P_{vaccum}$

$P_{abs} = 100 - 20 = 80\ kPa$

11-1 أدوات قياس الضغط Pressure Measurement Instruments

1-11-1 المانومتر Manometer

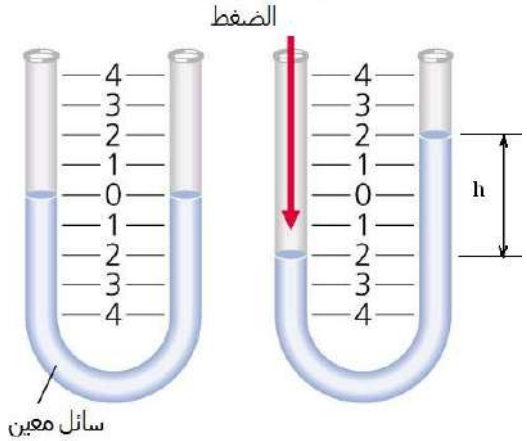
عبارة عن أداة بسيطة يستخدم لقياس فرق الضغط، وهو عبارة عن أنبوبة زجاجية مدرجة بشكل حرف (**U**) ويعتمد فرق الضغط على الفرق في ارتفاع السائل بين ساقي الأنبوبة ويرمز له بالحرف (**h**). ويمكن أن يكون المانومتر مائلا، وفي هذه الحالة تكون القراءة أكثر دقة في حالة قراءة فروقات قليلة بالضغط، وكما مبين في الشكل (1-8 ب).

يمكن حساب فرق الضغط من المعادلة التالية إذا كان المانومتر غير مائل:

$$P_d = h \times \rho \times 9.8$$

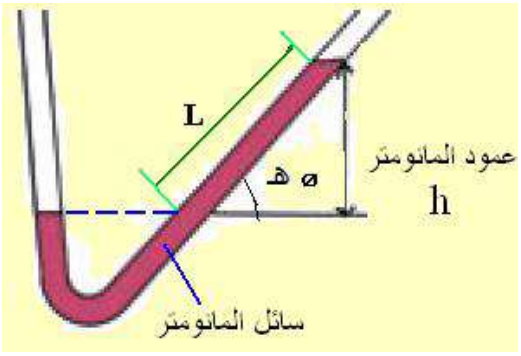
أما إذا كان المانومتر مائلا فنستخدم العلاقة التالية:

$$P_d = L \times \sin \emptyset \times \rho \times 9.8$$



مانومتر اعتيادي

- أ-



مانومتر مائل

- ب-

شكل 1- 8 المانومتر الاعتيادي والمائل

مثال 4

أ- أيهما يعطي قراءة أدق مانومتر على شكل حرف U أم مانومتر مائل؟ ولماذا؟

ب- إذا كان الفرق بين ذراعي مانومتر $30\ cm\ H_2O$ ، جد الفرق بالضغط بوحدات Pa.

ت- إذا كانت القراءة في المانومتر المائل بزاوية 30 درجة هي $75\ cm\ H_2O$ ، جد الفرق بالضغط بوحدات Pa.

الجواب

أ- المانومتر المائل يعطي قراءة أدق، كون الذراع المائل يعطي قراءة أكبر من الذراع العمودي ضمن مدى القياس وبهذا تزداد دقة القراءة.

ب- $P_d = h \times \rho \times 9.8$

كثافة الماء= $1000\ kg/m^3$ ، يجب أن يكون ارتفاع عمود السائل بوحدات (m).

$$P_d = \frac{30}{100} \times 1000 \times 9.8 = 2940\ Pa$$

ت- $P_d = L \times \sin \emptyset \times \rho \times 9.8$

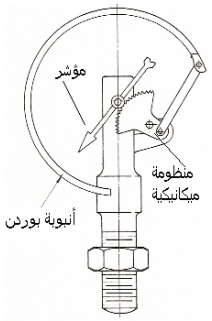
$$P_d = \frac{75}{100} \times \sin 30 \times 1000 \times 9.8$$

$$= \frac{75}{100} \times \frac{1}{2} \times 1000 \times 9.8 = 3675\ Pa$$

2-11-1 مقياس بوردن Bourdon Gage

يتكون هذا المقياس من أنبوبة معدنية بيضاوية المقطع ودائرية الشكل كما هي موضحة في الشكل (1-9 أ) وتغلق هذه الأنبوبة من إحدى نهايتيها، ويتصل بهذا الطرف منظومة ميكانيكية ذات مؤشر، في حين يوصل الطرف الآخر بالمكان الذي يراد قياس الضغط فيه، كما هو موضح في الشكل (1-9 ب)، فيقوم هذا الضغط بمحاولة فتح تحدب الأنبوب إلى الخارج مما ينتج عنه إزاحة ميكانيكية تنتقل عبر المنظومة الميكانيكية، وبالتالي إعطاء قراءة تتناسب مع الضغط الموجود في الحيز. ويستخدم مقياس بوردن عادة لقياس الضغوط المرتفعة وضغط الخواء. ويبين الشكل (1-9 ج) مقياس بوردن. والقراءة ويكون مقدار القراءة صفراً في حالة تساوي الضغط الخارجي للأنبوبة مع الضغط بداخلها. وبالإمكان معايرة المؤشر لقراءة الضغوط بمختلف الوحدات (Units) مثل Pa ، **psi** ، Bar، عمود زئبق (Hg)، وغيرها.

أ



ب

ج

شكل 1-9 أنبوبة بوردن ومقياس بوردن

3-11-1 أجهزة أخرى لقياس الضغط Other Pressure Measurement Instruments

هنالك عدة أجهزة لقراءة الضغط أغلبها إلكترونية أو كهربائية يمكن من خلالها تسجيل الضغط أو فرق الضغط من خلال مجسات خاصة، كما هو مبين في الشكل (1-10).

شكل 1-10 أجهزة إلكترونية وكهربائية لقياس الضغط

12-1 ديناميك الحرارة Thermodynamics

هو العلم الذي يهتم بالعلاقة بين الحرارة والشغل وخواص المواد التي لها علاقة بهم، وهو علم تجريبي جميع قوانينه وأساسياته مستخلصة من التجارب والمشاهدات.

1-12-1 النظام الديناميكي الحراري Thermodynamic System

النظام الديناميكي الحراري عبارة عن كمية من مادة ما أو عدة مواد محصورة بحدود واضحة (Boundaries) وموصوفة، ويمكن أن تكون الحدود ثابتة أو متحركة، وتسمى المنطقة المحيطة بالنظام بالمحيط (Surrounding).

ومن الأمثلة على النظام الحراري قنينة الغاز، حيث إن حدود النظام هي غلاف الأسطوانة المعدني والمادة المحصورة ضمن هذه الحدود هو الغاز نفسه.

1-13 الأنظمة الديناميكية الحرارية Thermodynamic Systems

تقسم الأنظمة الديناميكية الحرارية إلى نوعين رئيسيين هما:

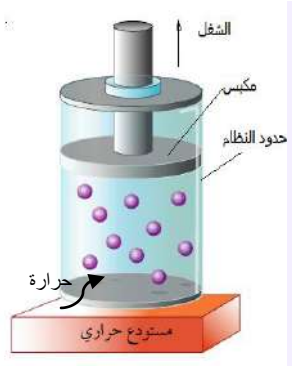
1-13-1 النظام الحراري المغلق Closed System

وهو نظام لا يمكن للكتلة فيه أن تعبر حدود النظام، في حين يمكن للحرارة والشغل أن تعبرا حدود النظام (أي إن كلمة مغلق تعني غلق حدود النظام باتجاه خروج ودخول الكتلة) ويبين الشكل (1-11 أ) نظاما مغلقاً.

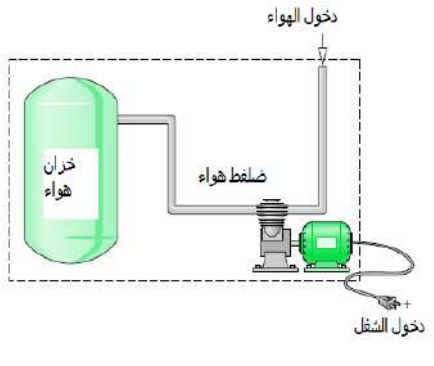
2-13-1 النظام الحراري المفتوح Open System

وهو النظام الذي يسمح فيه للكتلة (إضافة إلى الحرارة والشغل) بالعبور خلال حدود النظام، وهنالك نوعان من الأنظمة المفتوحة هما:

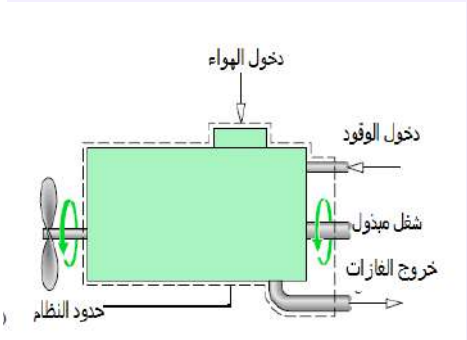
- **النظام المفتوح أحادي الجريان**: وفيه يمكن للكتلة إما الدخول أو الخروج من النظام خلال حدوده ولا يجوز للكتلة الدخول والخروج من النظام في وقت واحد، ومن الأمثلة على النظام المفتوح أحادي الجريان شحن أسطوانة هواء بواسطة ضاغط هواء، ويوضح الشكل (1-11 ب) نظاماً مفتوحاً أحادي الجريان.
- **النظام المفتوح متعدد الجريان**: وفيه يسمح للكتلة بالدخول والخروج من النظام خلال حدوده في وقت واحد، ويوضح الشكل (1-11 ج) نظاماً مفتوحاً متعدد الجريان.



أ- نظام مغلق



ب- نظام مفتوح أحادي الجريان



ج- نظام مفتوح متعدد الجريان

شكل 1-11 أنواع الأنظمة الديناميكية الحرارية

14-1 الحرارة والشغل Work and Heat

في الشكل (1-12 أ) أسطوانة تحتوي على غاز محصور، فإذا زودنا الاسطوانة بكمية من الحرارة نلاحظ تمدد الغاز مما يؤدي إلى دفع المكبس إلى الأعلى مؤديا إلى إنجاز شغل، أي إنَ الحرارة المسلطة على النظام المغلق أدت إلى إنجاز شغل. أما في الشكل (1-12 ب) نلاحظ الاسطوانة نفسها تحتوي على غاز فإذا ضغطنا المكبس (أي سلطنا عليها شغلاً) فان الغاز في الاسطوانة سوف يُضغط وترتفع درجة حرارته، فهنا استطعنا أن نولد حرارة عن طريق بذل شغل. لذلك نلاحظ وجود علاقة بين الحرارة والشغل. وفي كلتا الحالتين وعند عدم وجود خسائر في الشغل أو الحرارة، نستنتج أن الحرارة تساوي الشغل ووحداتهما هي الجول (J).

أ ب

شكل 1-12 العلاقة بين الحرارة والشغل

15-1 الحرارة النوعية Specific Heat

وهي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كيلوغرام واحد من مادة ما درجة حرارية واحدة (K أو °C) ووحداتها هي (kJ/kg.K). هنالك نوعان من الحرارة النوعية للغازات هما: الحرارة النوعية بثبوت الضغط (C_p) وهي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كيلوغرام واحد من المادة درجة كلفن واحدة عندما يكون الضغط المسلط على المادة ثابتا. والحرارة النوعية بثبوت الحجم (C_v)، وهي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كيلوغرام واحد من المادة درجة كلفن واحدة عندما يكون حجم المادة ثابتاً.

1-15-1 نسبة الحرارة النوعية بثبوت الضغط إلى الحرارة النوعية بثبوت الحجم (K)

يرمز إلى النسبة بين الحرارة النوعية بثبوت الضغط إلى الحرارة النوعية بثبوت الحجم بالحرف (**K**) وقيمتها دائماً أكبر من (1)، وذلك لكون الحرارة النوعية بثبوت الضغط أكبر من الحرارة النوعية بثبوت الحجم.

$$K = \frac{C_p}{C_v}$$

2-15-1 الفرق بين الحرارة النوعية بثبوت الضغط والحرارة النوعية بثبوت الحجم (R)

يرمز إلى الفرق بين الحرارة النوعية بثبوت الضغط والحرارة النوعية بثبوت الحجم بالحرف (**R**) علماً أن وحدة قياسها هي (kJ/kg.K)، وتعرف (R) أنها ثابت الغاز، وحسب العلاقة:

$$R = C_p - C_v$$

ويبين الجدول (1-4) الحرارة النوعية بثبوت الضغط والحرارة النوعية بثبوت الحجم لبعض الغازات.

جدول 1-4 الحرارة النوعية بثبوت الضغط والحرارة النوعية بثبوت الحجم لبعض الغازات (**للاطلاع**)

الغاز	الرمز الكيميائي	الحرارة النوعية kJ/kg.K		ثابت الغاز kJ/kg.K	نسبة الحرارة النوعية
		ثبوت الضغط	ثبوت الحجم	(R)	(K)
البخار المحمص	H_2O	1.872	1.41	0.462	1.327
الهواء	-----	1.004	0.717	0.287	1.400
أوكسجين	O_2	0.922	0.662	0.26	1.393
ثاني اوكسيد الكاربون	CO_2	0.842	0.653	0.189	1.289
أول اوكسيد الكاربون	CO	1.041	0.744	0.297	1.399
مائع التثليج 12 (R-12)	CCL_2F_2	0.616	0.547	0.069	1.126
مائع التثليج 22 (R-22)	$CHCLF_2$	0.658	0.562	0.096	1.171
مائع التثليج 134 (R-134a)	CF_3CH_2F	0.852	0.771	0.081	1.106

أما بالنسبة للمواد السائلة والصلبة فهنالك حرارة نوعية واحدة لا تعتمد على الضغط أو الحجم والجدول (1-5) يبين الحرارة النوعية لبعض المواد الصلبة والسائلة عند درجة حرارة الغرفة.

جدول 1-5 الحرارة النوعية لبعض المواد الصلبة والسائلة الشائعة (للاطلاع)

المواد الصلبة	الحرارة النوعية kJ/kg.K	المواد السائلة	الحرارة النوعية kJ/kg.K
حديد	0.42	ماء	4.18
خشب	1.26	هواء	1.005
إسفلت	0.92	الأمونيا	4.84
طابوق	0.84	مائع التثليج 12 (R-12)	0.97
خرسانة	0.88	مائع التثليج 22 (R-22)	1.26
زجاج	0.8	مائع التثليج 134 (R-134a)	1.43
نحاس	0.42	الزئبق	0.16
رصاص	0.13	بروبان	0.97

1- 16 الحرارة المحسوسة والكامنة Sensible and Latent Heat

1-16-1 الحرارة المحسوسة Sensible Heat

وهي كمية الحرارة التي تغير درجة حرارة المادة دون تغير طورها (أي تبقى على حالتها، فإذا كانت سائلة تبقى سائلة عند ارتفاع أو انخفاض درجة الحرارة)، حيث إن التغير يشمل درجة حرارة المادة فقط، وتحسب كمية الحرارة المحسوسة عن طريق حاصل ضرب كتلة المادة وحرارتها النوعية والفرق في درجات الحرارة قبل وبعد التسخين أو التبريد.

كمية الحرارة المحسوسة Q_s = كتلة المادة m × الحرارة النوعية للمادة C_p × فرق درجات الحرارة T_d

$$Q_s = m \times C_p \times T_d$$

مثال 5

احسب كمية الحرارة اللازمة لتسخين 10 kg من الماء من 60°C إلى 95°C

الجواب

$$Q_s = m \times C_p \times T_d$$

الحرارة النوعية للماء: 4.18 kJ/kg .K من جدول (1-5)

$$Q_s = 10 \times 4.18 \times (95-60) = 1463 \text{ kJ}$$

2-16-1 الحرارة الكامنة Latent Heat

هي الحرارة التي تعمل على تغيير طور المادة دون تغير درجة حرارتها، فمثلا أن الماء يغلي بدرجة (100°C) عند الضغط الجوي، ويستمر الماء بالغليان عند هذه الدرجة إلى أن يتحول الماء إلى بخار بالكامل، لذلك فإن الحرارة اللازمة لتحويل الماء من سائل عند (100°C) إلى بخار عند (100°C) تُسمى بالحرارة الكامنة لتبخر الماء، أما الثلج فإنه يبدأ بالانصهار عند (0°C) ويستمر بالانصهار إلى أن يتحول جميع الثلج إلى ماء عند (0°C)، لذلك فإن الحرارة اللازمة لتحويل الثلج من صفر ْس إلى ماء عند صفر ْس تُسمى بالحرارة الكامنة لانصهار الجليد.

تساوي الحرارة الكامنة لتبخر الماء عند (100°C) وبالضغط الجوي (2257.03 kJ/kg) أما الحرارة الكامنة لانصهار الجليد فتساوي (333.3 kJ/kg).

أسئلة الفصل الأول

س1:

أ- إذا كانت سرعة خروج الهواء من فتحة مبردة يساوي (0.5 m/s)، جد سرعة خروج الهواء بوحدات (ft/min).

ب- مبردة هواء تدفع الهواء بمعدل (4500 cfm)، جد معدل تدفق هواء المبردة بوحدات (m^3/h).

ت- كتلة أسطوانة غاز الطبخ بحدود (33 kg) وهي مشحونة بسائل البروبين، جد كتلتها بوحدات (Ib).

ث- إذا كان الضغط الجوي في مدينة بغداد (100 kPa)، جد مقدار الضغط الجوي بوحدات (Ib/ft^2) و (psi).

ج- مكيف سعته (2 TR)، جد سعة المكيف بوحدات الكيلو واط (kW)، وبوحدات (وحدة حرارة بريطانية بالساعة Btuh).

ح- ما هو الضغط المسلط على قاعدة خزان مساحته ($0.1\ m^2$) إذا كان الخزان ملئ بالماء الذي كثافته ($1000\ kg/m^3$)، علماً إن الخزان معرض إلى الضغط الجوي القياسي وارتفاع الخزان (1.2 m)؟

خ- يقرأ المقياس ضغطاً مقداره 150 kPa، في حين أن الضغط الجوي يساوي (99 kPa)، أوجد الضغط المطلق.

د- مكيف سعته (7.2 kW)، جد سعته بوحدات (Btuh) و (TR).

س2: جسم كتلته (150 kg)، يسير بسرعة (20 m/s)، جد مقدار الطاقة الحركية للجسم.

س3: حجر وضع على ارتفاع (20 m)، وكانت كتلته تساوي (1.3 kg)، جد الطاقة الكامنة للحجر.

س4: إذا كانت درجة حرارة الهواء في الصيف تساوي (45°C) ، جد مقدارها بوحدات الفهرنهايت.

س5:

أ- جد الضغط المطلق في أسطوانة أوكسجين إذا كان الضغط المقاس فيها (3.5 bar) وكان الضغط الجوي (110 kPa).

ب- ما هو الضغط المقاس في أسطوانة أوكسجين إذا كان الضغط المطلق (500 kPa) والضغط الجوي يساوي (101 kPa)؟

س6:

أ- إذا كان الضغط في أسطوانة لأحد موائع التثليج يساوي (20 Pa) وكان الضغط الجوي يساوي (96 kPa) ، أوجد الضغط المطلق.

ب- إذا كان الفرق بين ذراعي مانوميتر (4 cm Hg)، جد الفرق بالضغط بوحدات الباسكال.

ت- إذا كانت القراءة في مانوميتر مائل بزاوية (45°) هي (43 cm)، جد الفرق بالضغط بوحدات الباسكال إذا كان المائع هو الماء.

س7: عرف الأنظمة الحرارية، وأذكر أنواعها.

الفصل الثاني خواص المادة النقية

Properties of a Pure Substance

خواص المادة النقية

Properties of a pure Substance

1-2 المادة النقية Pure Substance

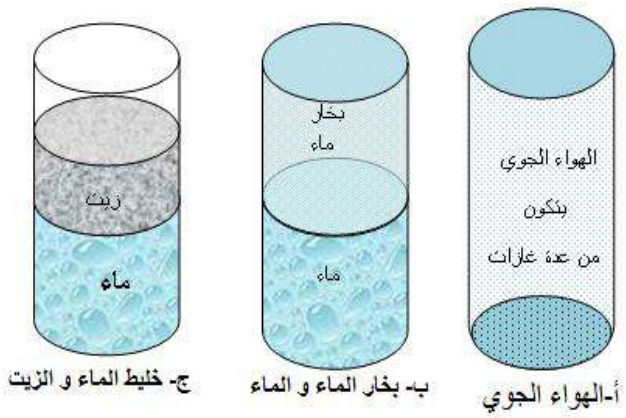
هي المادة التي تتميز بمركب كيميائي ثابت، مثل الماء والنتروجين والأوكسجين وغيرها.

وتعتبر الخلائط المتجانسة للغازات والسوائل مواد نقية، مثل الهواء الجوي الذي يتكون من الأوكسجين والنتروجين وثاني اوكسيد الكاربون وغيرها من الغازات، كما في الشكل (2-1 أ). وكذلك خليط بخار الماء وسائل الماء يعتبر خليطا متجانسا لأن التركيب الكيمائي لكليهما واحد، كما هو موضح في الشكل (2-1 ب)، في حين أن خليط الماء والزيت لا يعتبر خليطاً متجانساً، بسبب عدم اختلاط الزيت بالماء كما في الشكل (2-1 ج).

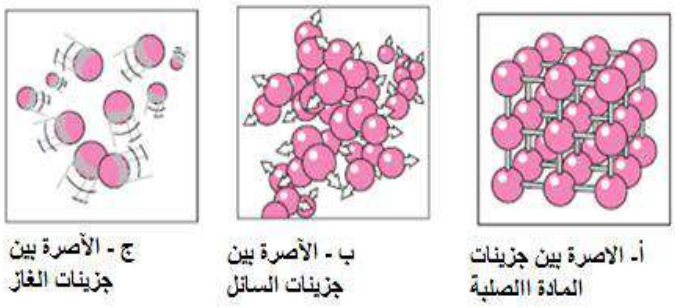
1-1-2 أطوار المادة النقية Phases of a pure Substance

من خلال مشاهداتنا اليومية نلاحظ أن المواد ممكن أن تكون في أطوار مختلفة، فعند درجة حرارة الغرفة نلاحظ أن النحاس يكون في حالة صلبة، والزئبق يكون سائلا، في حين أن الهواء يكون في حالة غازية، وعلى هذا الأساس يمكن أن نقول إن هنالك ثلاثة أطوار أساسية للمادة، هي الطور الصلب والطور السائل والطور الغازي.

يتميز الطور الصلب للمادة بآصرة قوية بين جزيئاته مما تعطيه شكلا ثابتا وحجما ثابتاً، كما هو مبين في الشكل (2-2 أ)، في حين أن هذه الآصرة تقل قوتها في الطور السائل مما تعطي المادة حجما ثابتاً وشكلاً يأخذ شكل الإناء المحفوظ فيه، كما هو مبين في الشكل (2-2 ب)، أما في الطور الغازي فان هذه الآصرة تكون ضعيفة جداً ولهذا يعتبر الغاز ذا حجم وشكل متغيرين، كما في الشكل(2-2 ج).



شكل 2-1 المواد النقية وغير النقية



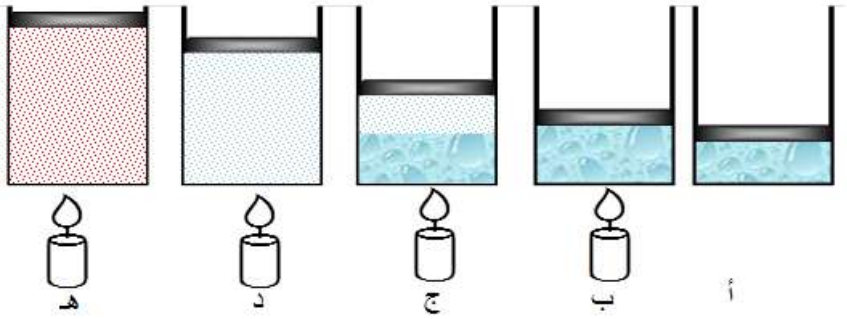
شكل 2-2 أنواع الأواصر بين الجزيئات حسب طور المادة

2-2 تغير طور المادة النقية- آلية تكون البخار Vapor Formation

إذا تم أخذ واحد كيلوغرام من الماء النقي عند درجة حرارة (20°C) مثلاً، ووضع في نظام مغلق يتكون من أسطوانة ومكبس محكم، وكان الضغط المسلط على المكبس يساوي الضغط الجوي القياسي (101.325 kPa)، كما هو مبين في الشكل (2-3 أ)، يسمى الماء في هذه الحالة ماء فائق التبريد Subcooled Liquid. عند تسخين النظام الذي يحتوي على الماء فائق التبريد، تبدأ درجة حرارة الماء بالارتفاع دون تغير طوره مع زيادة بسيطة في الحجم النوعي للماء مع ملاحظة بقاء الضغط المسلط على المكبس ثابتاً، بسبب حرية حركة المكبس، وعند الاستمرار بالتسخين تصل درجة حرارة الماء إلى (100°C) كما هو مبين في الشكل (2-3 ب).

عند درجة حرارة (100°C) وضغط جوي قياسي، تسمى درجة الحرارة هذه بدرجة حرارة التشبع Saturation Temperature ويكون الماء عندها مهيئا للتبخر، ويسمى سائلا مشبعاً. عند إضافة كمية أخرى من الحرارة يبدأ جزءاً من الماء بالتحول من الطور السائل إلى الطور الغازي مع ثبوت درجة حرارة الماء عند درجة حرارة التشبع (100°C) المناظرة لضغط التشبع (101.325 kPa)، ويحتوى النظام في هذه الحالة على الماء بطوريه السائل والبخار، كما هو مبين في الشكل (2-3 ج) ويسمى بخار المائع في هذه الحالة بالبخار الرطب. مع استمرار التسخين تثبت درجة الحرارة عند (100°C) وكذلك يثبت الضغط عند (101.325 kPa) إلى أن يتحول جميع السائل إلى بخار، ويزداد الحجم النوعي للمادة بشكل ملحوظ.

ويستمر التبخر حتى يتم تبخر آخر قطرة ماء. وعند تبخر آخر قطرة من الماء تبقى درجة الحرارة ثابتة عند (100°C) وكذلك الضغط يثبت عند (101.325 kPa)، كما مبين في الشكل (2-3 د)، وعندها يحتوي النظام على بخار ماء فقط عند درجة حرارة التشبع وضغط التشبع. ويسمى المائع عند هذه الحالة بالبخار الجاف المشبع، عند الاستمرار بالتسخين تبدأ درجة حرارة البخار بالزيادة لتصبح أكبر من درجة حرارة التشبع مع بقاء الضغط ثابتا، كما في الشكل (2-3 هـ)، وعندها نحصل على ما يُسمى بالبخار المحمص Superheated Vapor.



شكل 2-3 آلية تكون بخار الماء

عند الرجوع إلى الشرح السابق نلاحظ ورود عدة مصطلحات تم كتابتها باللون الأحمر، وتحتاج هذه المصطلحات إلى بعض التوضيح:

- درجة حرارة التشبع Saturation Temperature: وهي درجة الحرارة التي يبدأ عندها السائل بالتبخر عند ضغط معين وتسمى أيضا بدرجة حرارة غليان السائل عند ذلك الضغط، في حين يسمى الضغط بضغط التشبع المناظر لدرجة حرارة التشبع، ويوضح الجدول (2-1) العلاقة بين درجة حرارة التشبع وضغط التشبع للماء.
- السائل فائق التبريد Subcooled Liquid: إذا وجدت المادة في طورها السائل عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط معين يسمى عندها السائل سائلاً فائق التبريد. فإذا كانت درجة حرارة الماء عند الضغط الجوي تساوي (99°C)، فيسمى السائل فائق التبريد، لأن درجة حرارة تشبع الماء تساوي (100°C)عند الضغط الجوي ، وكما هو مبين في الشكل (2-3 أ).
- السائل المشبع Saturated Liquid: إذا وجدت المادة في طورها السائل عند درجة حرارة التشبع وضغط التشبع فعندها يسمى السائل بالسائل المشبع، وكما هو مبين في الشكل (2-3 ب).
- البخار الرطب Wet Vapor: إذا تواجدت المادة بطوريها السائل والغازي في وقت واحد عند درجة حرارة التشبع وضغط التشبع، عندها يسمى بخار المادة بالبخار الرطب، ويقاس مقدار جفاف البخار الرطب بالتعبير نسبة الجفاف. ونسبة الجفاف (كسر الجفاف) Dryness Fraction هي النسبة بين كتلة بخار المادة إلى مجموع كتلتي البخار والسائل، فإذا احتوى النظام، كما مبين في الشكل (2-3 ج) على (200 g) من البخار و (800 g) من السائل، عندها تكون نسبة الجفاف تساوي:

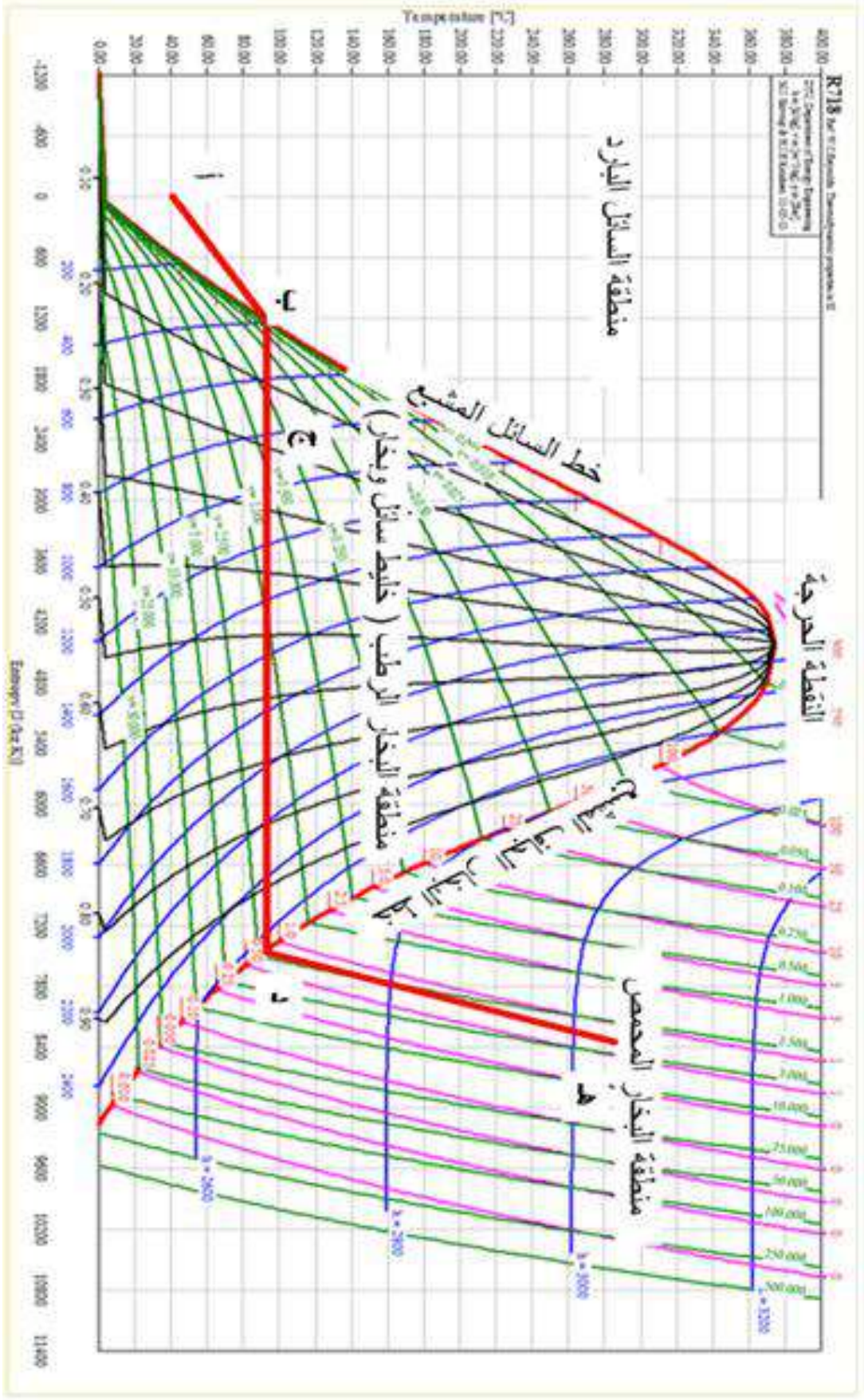
$$\frac{200}{800+200} \times 100\% = 20\%$$ أي إن: 20% من كتلة السائل هي في طور البخار.

- البخار الجاف المشبع Dry Saturated Vapor: إذا تواجدت المادة في طور البخار فقط عند درجة حرارة التشبع وضغط التشبع يسمى عندها البخار بالبخار الجاف المشبع، وكما هو موضح في الشكل (2-3 د).
- البخار المحمصSuperheated Vapor: وينتج عن تسخين البخار الجاف المشبع، إلى درجة حرارة أكبر من درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط التشبع، وكما هو مبين في الشكل (2-3 هـ).

ويمكن رسم الإجراءات من أ إلى هـ المذكورة، وكما موضح في الشكل (2-3) على (مخطط درجة الحرارة – الإنتروبي) الخاص بالماء، كما هو مبين في الشكل (2-4)، ويبين فيها عملية رفع درجة حرارة الماء من (20°C) وهو سائل فائق التبريد (النقطة أ)، إلى (100°C) سائل مشبع (النقطة ب)، ثم إلى خليط من بخار رطب وسائل مشبع عند درجة حرارة تشبع (100°C)، بنسبة جفاف مقدارها 20% (النقطة ج) وإلى بخار جاف مشبع النقطة (د) وأخيرا إلى بخار محمص (النقطة هـ). يمكن ملاحظة الفرق بين الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة من الشكل (2-4)، حيث إن الحرارة المحسوسة يمكن ملاحظتها بالخط الواصل بين النقطتين أ و ب، والتي أدت إلى رفع درجة حرارة الماء من (20°C) إلى (100°C)، وكذلك بالخط الواصل بين النقطتين د و هـ التي قامت برفع درجة حرارة البخار من (100°C) إلى درجة حرارة أعلى، أما الخط الواصل بين النقطتين ب و د فيمثل الحرارة الكامنة التي قامت بتحويل الماء المشبع بثبوت درجة الحرارة عند (100°C) إلى بخار جاف مشبع عند (100°C)، وتسمى الحرارة الكامنة اللازمة لتحويل (1 kg) من الماء المشبع إلى بخار مشبع بالحرارة الكامنة للتبخر.

جدول 2-1 العلاقة بين درجة حرارة التشبع و ضغط التشبع للماء

درجة حرارة التشبع (˚C)	ضغط التشبع (kPa)	درجة حرارة التشبع (˚C)	ضغط التشبع (kPa)
10−	0.26	30	4.25
5−	0.40	40	7.39
0	0.61	50	12.35
5	0.87	100	101.325
10	1.23	150	475.8
15	1.71	200	1554
20	2.34	250	3973
25	3.17	300	8581



شكل 2-4 آلية تكون البخار على مخطط (درجة الحرارة- إنتروبي) للماء

3-2 جداول البخار Steam Tables

تبين جداول البخار خواص البخار الحرارية عند درجة حرارة التشبع أو عند ضغط التشبع وتشمل هذه الخواص الحجم النوعي للبخار والسائل المشبعين، والطاقة الداخلية للبخار والسائل المشبعين والمحتوى الحراري للبخار والسائل المشبعين، ويبيّن الجدول (2-2) الخواص الحرارية للماء اعتماداً على درجة حرارة التشبع في حين أن الجدول (2-3) يبيّن الخواص الحرارية للماء اعتماداً على ضغط التشبع، أما الجدول (2-4) يوضّح الخواص الحرارية لمائع التثليج R-134a اعتماداً على درجة حرارة التشبع، والجدول (2-5) يبيّن الخواص الحرارية لمائع التثليج ذاته اعتماداً على ضغط التشبع.

4-2 خواص الموائع Fluid Properties

أدناه بعض خواص الموائع المهمة والتي عادة تذكر في جداول البخار الحرارية، والتي عن طريق معرفة قيمها يتم احتساب كمية الحرارة المنتقلة والشغل وغيرهما:

- الحجم النوعي (حن) Specific Volume (ט) هو النسبة بين مقدار الحجم وكتلة المائع (مقلوب الكثافة) وحدة قياسه م^3/كغم (m^3/kg) وبالإمكان قياس الحجم النوعي ولهذا يعتبر خاصية مقاسه.
- الطاقة الداخلية (طِ) Internal Energy (U) وهي الطاقة التي يمتلكها المائع والتي تعتمد على درجة حرارة المائع ونوعيته ووحدة قياسها كيلوجول (kJ)، وهي من الخواص المحسوبة التي لايمكن قياسها. ويتم عادة ذكر الطاقة الداخلية النوعية (**u**) ووحدة قياسها كيلوجول/كغم (kJ/kg) في الجداول.
- المحتوى الحراري (مح) Enthalpy (H) هو تعبير رياضي يمثل حاصل جمع كل من الشغل الداخلي للمائع والطاقة الداخلية ووحدة قياسها كيلوجول (kJ)، وهو من الخواص المحسوبة.

$$\mathbf{H = U + (P \times V)}$$

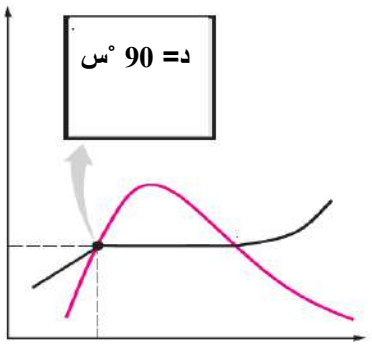
ويعطى قيمة إسناد لمحتوى حراري مقدارها صفر لدرجة حرارة معينة مثل الصفر للماء أو −40 درجة سيليزية لموائع التثليج، وهنالك المحتوى الحراري النوعي (**h**) ووحدة قياسه كيلوجول/كغم (kJ/kg).

- الإنتروبي Entropy (S) هو تعبير رياضي يمثل مقدار الحرارة المنتقلة نسبة إلى درجة الحرارة، ووحدة قياسها كيلوجول/ كلفن (kJ/K)، وهي من الخواص المحسوبة. وهي مثل المحتوى الحراري من حيث اعتماد مرجع إسناد عند درجة حرارة معينة، وهناك الإنتروبي النوعي (**s**) ووحدة قياسه كيلوجول/كغم.كلفن (kJ/kg.K).

مثال 1

أوجد الضغط و الحجم النوعي والطاقة الداخلية والمحتوى الحراري للماء في حالة السائل المشبع عند درجة حرارة 90°C.

الجواب



بما أن الخاصية المعطاة هي درجة الحرارة نستخدم الجدول (2-2) (أساس درجة الحرارة)، نستخرج الخواص للسائل المشبع كما يلي:

$P = 70.183\ kPa$

$\upsilon = 0.001036\ m^3/kg$

$u_{liquid} = 376.97\ kJ/kg$

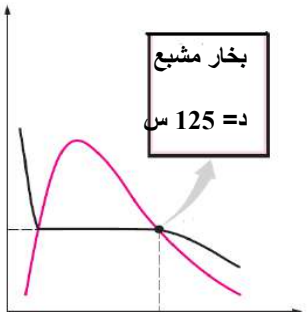
$h_{liquid} = 377.04\ kJ/kg$

مثال 2

خزان يحتوي على بخار ماء مشبع، كتلة بخار الماء في الخزان 0.5 kg، جد حجم الخزان والضغط داخله عند درجة حرارة مقدارها (125°C).

الجواب

بما أن الخاصية المعطاة هي درجة الحرارة نستخدم الجدول (2-2) والذي أساسه درجة الحرارة، ونستخرج الخواص للبخار المشبع وكما يلي:



$P = 232.32\ kPa$

$\upsilon = 0.77012\ m^3/kg$

$$\upsilon = \frac{V}{m}$$

$$V = m \times \upsilon$$

$$V = 0.5 \times 0.77012 = 0.38506\ m^3$$

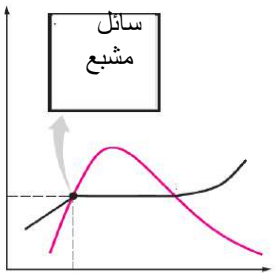
مثال 3

خزان سعته 80 لتراً، يحتوي على سائل مشبع لمائع التثليج R-134a عند ضغط 160 kPa، جد كتلة السائل ودرجة حرارته والمحتوى الحراري، واحسب كذلك كتلة المائع إذا أحتوى الخزان على بخار مشبع.

الجواب

بما أن الخاصية المعطاة هي الضغط نستخدم الجدول (2-5) والذي أساسه الضغط، ونستخرج الخواص السائل المشبع والبخار المشبع وكما يلي:

$$\upsilon = 0.0007437\ m^3/kg$$



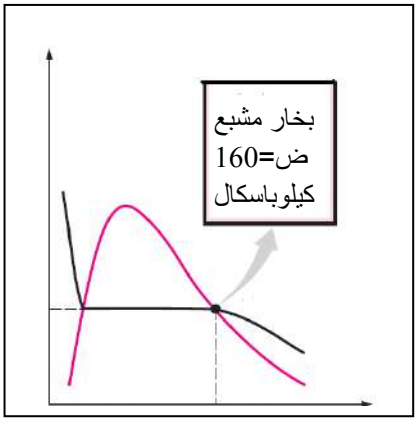
$$h_{liq} = 31.21\ kJ/kg$$

$$T = 15.6^{\circ}C$$

$$\upsilon = \frac{V}{m}$$

$$m = \frac{V}{\upsilon}$$

$$m = \frac{80 \times 10^{-3}}{0.0007434} = 107.6\ kg\ liquid$$



إذا احتوى الخزان على بخار مشبع
نستخرج الحجم النوعي للبخار المشبع

$$\upsilon_{vapor} = 0.12348\ m^3/kg$$

$$m = \frac{V}{\upsilon}$$

$$m = \frac{80 \times 10^{-3}}{0.12348} = 0.647\ kg\ vapor_{saturation}$$

5-2 المعادلة العامة للغازات General Equation of Gases

تعرف العلاقة التي تربط بين خواص المادة بمعادلة الحالة لتلك المادة، فإذا عُرفت خاصيتان للمادة فإن الخواص الأخرى يمكن إيجادها من المعادلة العامة للغازات، ويُربط الضغط بالحجم وبدرجة الحرارة بمعادلة واحدة تسمى المعادلة العامة للغازات، وكما هو مبين في المعادلة التالية:

$$P\ V = m\ R\ T$$

إذ إن:

V	حجم الغاز	m^3
P	ضغط الغاز	kPa
m	كتلة الغاز	kg
R	ثابت الغاز	kJ/kg.K
T	درجة الحرارة	K

ويمثل ثابت الغاز الفرق بين الحرارة النوعية بثبوت الضغط والحرارة النوعية بثبوت الحجم، أي: إن

ثابت الغاز(R) = الحرارة النوعية بثبوت الضغط (C_p) – الحرارة النوعية بثبوت الحجم (C_v)

$$R = C_p - C_v$$

ويختلف ثابت الغاز حسب نوع الغاز، وكما هو مبين في الجدول (1-4) في الفصل الأول والذي يعطي ثوابت بعض الغازات.

مثال 4

كتلة من الهواء مقدارها 3 kg عند درجة حرارة (25°C)، وضغط مقداره 101.325 kPa، أوجد حجم الهواء، وأوجد كذلك كثافته وحجمه النوعي.

الجواب

المعادلة العامة للغازات هي

$$P\,V = m\,R\,T$$

حيث أن:

V : حجم الغاز (مطلوب في السؤال)

P : ضغط الغاز ويساوي 101.325 kPa

m : كتلة الغاز وتساوي 3 kg

R : ثابت الغاز للهواء يساوي 0.287 من جدول (1-4)

T : درجة حرارة الهواء وتساوي (273+25) = 298 K

$$V = \frac{\mathbf{m\,R\,T}}{\mathbf{P}}$$

$$V = \frac{\mathbf{298 \times 0.287 \times 3}}{\mathbf{101.325}} = \mathbf{2.53}\ m^3$$

$$\text{الكثافة} = \frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}}$$

$$\rho = \frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{V}}$$

حيث أن:

ρ : كثافة الغاز

$$\rho = \frac{\mathbf{3}}{\mathbf{2.53}} = 1.18\ kg/m^3$$

$$\upsilon = \frac{\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{m}} = \frac{\mathbf{2.53}}{\mathbf{3}}$$

$$\upsilon = 0.843\ m^3/kg$$

مثال 5

أسطوانة معدنية سعتها 30 لتراً تحتوي على أوكسجين عند درجة حرارة (17°C)، وضغط 100 Bar، استُعمِلَ جزء من الأوكسجين في عمليات اللحام في ورشة التبريد، فأنخفض الضغط إلى 75 bar ودرجة حرارة (7°C)، احسب كتلة الأوكسجين التي استخدمت.

الجواب

كتلة الأوكسجين التي استخدمت = كتلة الأوكسجين قبل الاستعمال – كتلة الأوكسجين بعد الاستعمال

كتلة الأوكسجين التي استخدمت $m_o = m_1 - m_2$

$$P\ V = m\ R\ T$$

V_1 = حجم الأسطوانة (30×10^{-3}) = $0.03\ m^3$

P_1 = ضغط الغاز قبل الاستعمال ويساوي (100×100) = 10000 kPa

m_1 = كتلة الغاز قبل الاستعمال مطلوبة

R = ثابت الغاز للأوكسجين يساوي 0.26 من جدول (1-4)

T_1 = درجة حرارة الهواء قبل الاستعمال وتساوي (273+17) = 290 K

V_2 = حجم الأسطوانة (30×10^{-3}) = $0.03\ m^3$ (حجم الأسطوانة ثابت)

P_2 = ضغط الغاز بعد الاستعمال ويساوي (100×75) = 7500 kPa

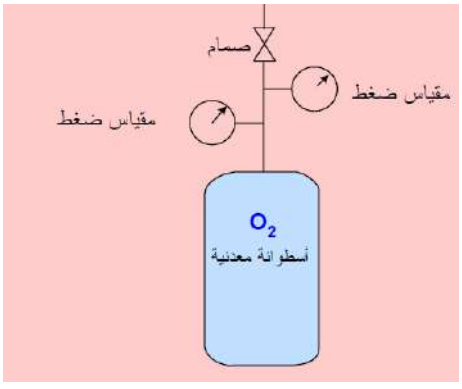
m_2 = كتلة الغاز بعد الاستعمال مطلوبة

T_2 = درجة حرارة الغاز بعد الاستعمال وتساوي (273+7) = 280 K

$$m_1 = \frac{\mathbf{P \times V}}{\mathbf{R \times T}}$$

$$m_1 = \frac{\mathbf{10000 \times 0.03}}{\mathbf{0.26 \times 290}} = 3.978\ kg$$

$$m_2 = \frac{\mathbf{7500 \times 0.03}}{\mathbf{0.26 \times 280}} = 3.09\ kg$$



$m_o = 3.978 - 3.09 = 0.888\ kg$

جدول 2-2 الخواص الحرارية لبخار الماء المشبع (أساس درجة الحرارة)

درجة الحرارة	ضغط التشبع	الحجم النوعي m^3/kg		الطاقة الداخلية kJ/kg			المحتوى الحراري kJ/kg			انتروبي kJ/kg.K		
°C	kPa	سائل	غاز	سائل	سائل غاز	غاز	سائل	سائل غاز	غاز	سائل	سائل غاز	غاز
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

درجة الحرارة	ضغط التشبع	الحجم النوعي m^3/kg		الطاقة الداخلية kJ/kg			المحتوى الحراري kJ/kg			انتروبي kJ/kg.K		
°C	kPa	سائل	غاز	سائل	سائل غاز	غاز	سائل	سائل غاز	غاز	سائل	سائل غاز	غاز
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10,556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11,284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

جدول 2-3 الخواص الحرارية لبخار الماء المشبع (أساس الضغط)

ضغط التشبع kPa	درجة لحرارة °C	الحجم النوعي m^3/kg		الطاقة الداخلية kJ/kg			المحتوى الحراري kJ/kg			انتروبي kJ/kg.K		
		سائل	غاز	سائل	سائل غاز	غاز	سائل	سائل غاز	غاز	سائل	سائل غاز	غاز
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

ضغط التشبع kPa	درجة الحرارة °C	الحجم النوعي m^3/kg		الطاقة الداخلية kJ/kg			المحتوى الحراري kJ/kg			انتروبي kJ/kg.K		
		سائل	غاز	سائل	سائل غاز	غاز	سائل	سائل غاز	غاز	سائل	سائل غاز	غاز
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
0,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
1,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
2,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
3,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
4,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
5,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
6,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
7,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
8,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
9,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
0,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
1,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
2,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
2,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

جدول 2-4 الخواص الحرارية لمائع التثليج R-134a (أساس درجة الحرارة)

د	ضغط	حجم نوعي		طاقة داخلية			محتوى حراري			انتروبي	
°C	kPa	m^3/kg		kJ/kg			kJ/kg			kJ/kg.K	
		حن سائل	حن غاز	ط د سائل	ط د غاز-سائل	ط د غاز	مح سائل	مح غاز	مح غاز-سائل	انتروبي سائل	انتروبي غاز
-40	51.64	0.0007055	0.357	149.93	204.49	354.42	149.97	372.85	222.88	0.803	1.759
-39	54.38	0.0007069	0.340	151.11	203.88	354.99	151.15	373.48	222.33	0.808	1.758
-38	57.24	0.0007083	0.324	152.29	203.27	355.56	152.33	374.11	221.78	0.813	1.756
-37	60.22	0.0007098	0.309	153.47	202.67	356.13	153.51	374.74	221.23	0.818	1.755
-36	63.32	0.0007113	0.295	154.65	202.05	356.71	154.70	375.37	220.66	0.823	1.754
-35	66.55	0.0007127	0.281	155.84	201.43	357.27	155.89	375.99	220.10	0.828	1.752
-34	69.91	0.0007142	0.269	157.04	200.81	357.85	157.09	376.62	219.53	0.833	1.751
-33	73.40	0.0007157	0.257	158.24	200.17	358.41	158.29	377.24	218.95	0.838	1.750
-32	77.04	0.0007172	0.245	159.43	199.55	358.99	159.49	377.87	218.37	0.843	1.749
-31	80.81	0.0007187	0.234	160.64	198.91	359.56	160.70	378.49	217.79	0.848	1.747
-30	84.74	0.0007202	0.224	161.85	198.27	360.12	161.91	379.11	217.20	0.853	1.746
-29	88.81	0.0007218	0.214	163.07	197.63	360.69	163.13	379.73	216.61	0.858	1.745
-28	93.05	0.0007233	0.205	164.28	196.98	361.26	164.35	380.35	216.01	0.863	1.744
-27	97.44	0.0007249	0.196	165.50	196.33	361.83	165.57	380.97	215.40	0.868	1.743
-26	101.99	0.0007264	0.188	166.73	195.67	362.40	166.80	381.59	214.79	0.873	1.742
-25	106.71	0.000728	0.180	167.95	195.02	362.97	168.03	382.21	214.18	0.878	1.741
-24	111.60	0.0007296	0.173	169.18	194.35	363.53	169.26	382.82	213.56	0.883	1.740
-23	116.67	0.0007312	0.166	170.41	193.69	364.11	170.50	383.44	212.94	0.888	1.739
-22	121.92	0.0007328	0.159	171.65	193.02	364.67	171.74	384.05	212.31	0.893	1.738
-21	127.36	0.0007345	0.153	172.90	192.35	365.24	172.99	384.67	211.68	0.898	1.737
-20	132.99	0.0007361	0.146	174.14	191.67	365.81	174.24	385.28	211.04	0.903	1.736
-19	138.81	0.0007378	0.141	175.39	190.99	366.37	175.49	385.89	210.40	0.908	1.735
-18	144.83	0.0007394	0.135	176.64	190.30	366.94	176.75	386.50	209.75	0.912	1.735
-17	151.05	0.0007411	0.130	177.90	189.61	367.51	178.01	387.11	209.10	0.917	1.734
-16	157.48	0.0007428	0.125	179.15	188.92	368.07	179.27	387.71	208.44	0.922	1.733
-15	164.13	0.0007445	0.120	180.42	188.22	368.64	180.54	388.32	207.78	0.927	1.732
-14	170.99	0.0007463	0.115	181.68	187.52	369.20	181.81	388.92	207.11	0.932	1.731
-13	178.08	0.000748	0.111	182.96	186.81	369.76	183.09	389.52	206.44	0.937	1.730
-12	185.40	0.0007498	0.107	184.22	186.10	370.32	184.36	390.12	205.76	0.942	1.730
-11	192.95	0.0007515	0.103	185.50	185.38	370.89	185.65	390.72	205.08	0.947	1.729
-10	200.73	0.0007533	0.099	186.78	184.67	371.45	186.93	391.32	204.39	0.952	1.728
-9	208.76	0.0007551	0.095	188.06	183.95	372.02	188.22	391.92	203.69	0.956	1.728
-8	217.04	0.0007569	0.092	189.36	183.22	372.57	189.52	392.51	202.99	0.961	1.727
-7	225.57	0.0007588	0.089	190.65	182.48	373.13	190.82	393.10	202.29	0.966	1.726
-6	234.36	0.0007606	0.085	191.94	181.76	373.70	192.12	393.70	201.58	0.971	1.726
-5	243.41	0.0007625	0.082	193.23	181.01	374.25	193.42	394.28	200.86	0.976	1.725
-4	252.74	0.0007644	0.079	194.54	180.27	374.81	194.73	394.87	200.14	0.981	1.724
-3	262.33	0.0007663	0.077	195.84	179.53	375.37	196.04	395.46	199.42	0.986	1.724
-2	272.21	0.0007682	0.074	197.15	178.77	375.92	197.36	396.04	198.68	0.990	1.723
-1	282.37	0.0007701	0.071	198.46	178.01	376.47	198.68	396.62	197.95	0.995	1.723
0	292.82	0.0007721	0.069	199.77	177.25	377.03	200.00	397.20	197.20	1.000	1.722
1	303.57	0.000774	0.067	201.10	176.49	377.58	201.33	397.78	196.45	1.005	1.721
2	314.62	0.000776	0.064	202.42	175.72	378.14	202.66	398.36	195.70	1.010	1.721
3	325.98	0.0007781	0.062	203.74	174.95	378.69	203.99	398.93	194.94	1.014	1.720
4	337.65	0.0007801	0.060	205.07	174.17	379.24	205.33	399.50	194.17	1.019	1.720
5	349.63	0.0007821	0.058	206.40	173.39	379.79	206.67	400.07	193.40	1.024	1.719
6	361.95	0.0007842	0.056	207.74	172.60	380.34	208.02	400.64	192.62	1.029	1.719
7	374.59	0.0007863	0.054	209.08	171.81	380.89	209.37	401.21	191.84	1.034	1.718
8	387.56	0.0007884	0.052	210.41	171.02	381.43	210.72	401.77	191.05	1.038	1.718
9	400.88	0.0007906	0.051	211.76	170.21	381.98	212.08	402.33	190.25	1.043	1.718
10	414.55	0.0007927	0.049	213.11	169.41	382.52	213.44	402.89	189.45	1.048	1.717
11	428.57	0.0007949	0.048	214.46	168.60	383.06	214.80	403.44	188.64	1.053	1.717
12	442.94	0.0007971	0.046	215.82	167.79	383.61	216.17	404.00	187.83	1.058	1.716
13	457.69	0.0007994	0.045	217.17	166.97	384.15	217.54	404.55	187.01	1.062	1.716
14	472.80	0.0008016	0.043	218.54	166.14	384.68	218.92	405.10	186.18	1.067	1.715
15	488.29	0.0008039	0.042	219.91	165.31	385.21	220.30	405.64	185.34	1.072	1.715
16	504.16	0.0008062	0.041	221.27	164.48	385.75	221.68	406.18	184.50	1.077	1.715
17	520.42	0.0008085	0.039	222.65	163.63	386.28	223.07	406.72	183.66	1.081	1.714
18	537.08	0.0008109	0.038	224.00	162.81	386.82	224.44	407.26	182.82	1.086	1.714

د	ضغط	حجم نوعي		طاقة داخلية			محتوى حراري			انتروبي	
°C	kPa	m^3/kg		kJ/kg			kJ/kg			kJ/kg.K	
		حن سائل	حن غاز	ط د سائل	ط د غاز-سائل	ط د غاز	مح سائل	مح غاز	مح غاز سائل	انتروبي سائل	انتروبي غاز
19	554.14	0.0008133	0.037	225.39	181.96	407.35	225.84	407.80	181.96	1.091	1.714
20	571.60	0.0008157	0.036	226.76	181.10	407.86	227.23	408.33	181.09	1.095	1.713
21	589.48	0.0008182	0.035	228.16	180.22	408.38	228.64	408.86	180.22	1.100	1.713
22	607.78	0.0008206	0.034	229.55	179.33	408.88	230.05	409.38	179.34	1.105	1.713
23	626.50	0.0008231	0.033	230.94	178.45	409.39	231.46	409.91	178.45	1.110	1.712
24	645.66	0.0008257	0.032	232.34	177.55	409.89	232.87	410.42	177.55	1.114	1.712
25	665.26	0.0008283	0.031	233.74	176.65	410.39	234.29	410.94	176.65	1.119	1.712
26	685.30	0.0008309	0.030	235.15	175.73	410.88	235.72	411.45	175.73	1.124	1.711
27	705.80	0.0008335	0.029	236.56	174.81	411.37	237.15	411.96	174.81	1.129	1.711
28	726.75	0.0008362	0.028	237.97	173.89	411.86	238.58	412.47	173.89	1.133	1.711
29	748.17	0.0008389	0.027	239.39	172.95	412.34	240.02	412.97	172.95	1.138	1.710
30	770.06	0.0008416	0.026	240.81	172.01	412.82	241.46	413.47	172.00	1.143	1.710
31	792.43	0.0008444	0.026	242.24	171.05	413.29	242.91	413.96	171.05	1.147	1.710
32	815.28	0.0008473	0.025	243.67	170.09	413.76	244.36	414.45	170.09	1.152	1.709
33	838.63	0.0008501	0.024	245.11	169.12	414.23	245.82	414.94	169.12	1.157	1.709
34	862.47	0.000853	0.024	246.54	168.14	414.68	247.28	415.42	168.14	1.161	1.709
35	886.82	0.000856	0.023	247.99	167.15	415.14	248.75	415.90	167.15	1.166	1.709
36	911.68	0.000859	0.022	249.44	166.15	415.59	250.22	416.37	166.15	1.171	1.708
37	937.07	0.000862	0.022	250.89	165.14	416.03	251.70	416.84	165.14	1.176	1.708
38	962.98	0.0008651	0.021	252.35	164.12	416.47	253.18	417.30	164.12	1.180	1.708
39	989.42	0.0008682	0.020	253.81	163.09	416.90	254.67	417.76	163.09	1.185	1.707
40	1016.40	0.0008714	0.020	255.27	162.05	417.32	256.16	418.21	162.05	1.190	1.707
41	1043.94	0.0008747	0.019	256.75	161.00	417.75	257.66	418.66	161.00	1.194	1.707
42	1072.02	0.0008779	0.019	258.22	159.95	418.17	259.16	419.11	159.94	1.199	1.707
43	1100.67	0.0008813	0.018	259.70	158.87	418.57	260.67	419.54	158.87	1.204	1.706
44	1129.90	0.0008847	0.018	261.19	157.79	418.98	262.19	419.98	157.79	1.208	1.706
45	1159.69	0.0008882	0.017	262.68	156.69	419.37	263.71	420.40	156.69	1.213	1.706
46	1190.08	0.0008917	0.017	264.18	155.59	419.77	265.24	420.83	155.59	1.218	1.705
47	1221.05	0.0008953	0.016	265.68	154.47	420.15	266.77	421.24	154.47	1.223	1.705
48	1252.63	0.0008989	0.016	267.19	153.33	420.52	268.32	421.65	153.33	1.227	1.705
49	1284.82	0.0009026	0.015	268.70	152.19	420.89	269.86	422.05	152.19	1.232	1.704
50	1317.62	0.0009064	0.015	270.23	151.02	421.25	271.42	422.44	151.03	1.237	1.704
51	1351.05	0.0009103	0.015	271.75	149.85	421.60	272.98	422.83	149.85	1.241	1.704
52	1385.10	0.0009142	0.014	273.28	148.66	421.94	274.55	423.21	148.66	1.246	1.703
53	1419.80	0.0009182	0.014	274.83	147.46	422.29	276.13	423.59	147.46	1.251	1.703
54	1455.15	0.0009223	0.013	276.37	146.24	422.61	277.71	423.95	146.24	1.256	1.703
55	1491.16	0.0009265	0.013	277.92	145.01	422.93	279.30	424.31	145.01	1.260	1.702
56	1527.83	0.0009308	0.013	279.48	143.76	423.24	280.90	424.66	143.75	1.265	1.702
57	1565.17	0.0009351	0.012	281.05	142.48	423.53	282.51	424.99	142.49	1.270	1.702
58	1603.20	0.0009396	0.012	282.62	141.19	423.81	284.13	425.32	141.20	1.275	1.701
59	1641.92	0.0009441	0.012	284.20	139.89	424.09	285.75	425.64	139.89	1.280	1.701
60	1681.34	0.0009488	0.011	285.79	138.57	424.36	287.39	425.96	138.57	1.284	1.700
61	1721.47	0.0009536	0.011	287.39	137.23	424.62	289.03	426.26	137.23	1.289	1.700
62	1762.33	0.0009585	0.011	288.99	135.86	424.85	290.68	426.54	135.86	1.294	1.699
63	1803.90	0.0009635	0.011	290.61	134.47	425.08	292.35	426.82	134.47	1.299	1.699
64	1846.22	0.0009687	0.010	292.23	133.07	425.30	294.02	427.09	133.07	1.304	1.698
65	1889.29	0.0009739	0.010	293.87	131.63	425.50	295.71	427.34	131.63	1.309	1.698
66	1933.11	0.0009794	0.010	295.51	130.18	425.69	297.40	427.58	130.18	1.313	1.697
67	1977.70	0.000985	0.009	297.16	128.70	425.86	299.11	427.81	128.70	1.318	1.697
68	2023.07	0.0009907	0.009	298.83	127.19	426.02	300.83	428.02	127.19	1.323	1.696
69	2069.24	0.0009966	0.009	300.51	125.65	426.16	302.57	428.22	125.65	1.328	1.695
70	2116.20	0.0010027	0.009	302.19	124.09	426.28	304.31	428.40	124.08	1.333	1.695
71	2163.97	0.001009	0.008	303.89	122.49	426.38	306.07	428.56	122.49	1.338	1.694
72	2212.56	0.0010155	0.008	305.60	120.86	426.46	307.85	428.71	120.86	1.343	1.693
73	2261.99	0.0010222	0.008	307.33	119.20	426.53	309.64	428.84	119.19	1.348	1.693
74	2312.27	0.0010291	0.008	309.07	117.49	426.56	311.45	428.94	117.49	1.353	1.692
75	2363.40	0.0010363	0.007	310.82	115.76	426.58	313.27	429.03	115.76	1.358	1.691
76	2415.41	0.0010437	0.007	312.59	113.98	426.57	315.11	429.09	113.98	1.364	1.690
77	2468.30	0.0010514	0.007	314.37	112.16	426.53	316.97	429.13	112.16	1.369	1.689

د	ضغط	حجم نوعي		طاقة داخلية			محتوى حراري			انتروبي	
°C	kPa	m^3/kg		kJ/kg			kJ/kg			kJ/kg.K	
د	ض	حن سائل	حن غاز	ط د سائل	ط د غاز سائل	ط د غاز	مح سائل	مح غاز	مح غاز سائل	انتروبي سائل	انتروبي غاز
78	2522.08	0.0010595	0.007	316.19	95.69	411.87	318.86	429.15	110.29	1.374	1.688
79	2576.78	0.0010679	0.007	318.02	93.98	411.99	320.77	429.13	108.36	1.379	1.687
80	2632.41	0.0010766	0.006	319.86	92.26	412.11	322.69	429.09	106.4	1.384	1.686
81	2688.98	0.0010857	0.006	321.71	90.49	412.20	324.63	429.01	104.38	1.390	1.684
82	2746.51	0.0010953	0.006	323.59	88.67	412.27	326.6	428.91	102.31	1.395	1.683
83	2805.02	0.0011054	0.006	325.51	86.78	412.28	328.61	428.75	100.14	1.401	1.682
84	2864.51	0.0011159	0.006	327.44	84.82	412.26	330.64	428.56	97.92	1.406	1.680
85	2925.02	0.0011271	0.006	329.41	82.83	412.24	332.71	428.33	95.62	1.412	1.679
86	2986.56	0.001139	0.005	331.41	80.75	412.16	334.81	428.05	93.24	1.417	1.677
87	3049.15	0.0011515	0.005	333.44	78.60	412.04	336.95	427.71	90.75	1.423	1.675
88	3112.81	0.0011649	0.005	335.51	76.33	411.84	339.14	427.31	88.17	1.429	1.673
89	3177.58	0.0011793	0.005	337.62	74.00	411.62	341.37	426.84	85.46	1.435	1.671
90	3243.47	0.0011948	0.005	339.78	71.52	411.31	343.66	426.29	82.63	1.441	1.669
91	3310.52	0.0012116	0.004	342.00	68.95	410.95	346.01	425.65	79.64	1.447	1.666
92	3378.75	0.00123	0.004	344.28	66.20	410.48	348.44	424.91	76.47	1.454	1.663
93	3448.22	0.0012502	0.004	346.64	63.26	409.90	350.95	424.04	73.09	1.460	1.660
94	3518.95	0.0012728	0.004	349.08	60.15	409.24	353.56	423.03	69.46	1.467	1.656
95	3591.01	0.0012983	0.004	351.64	56.73	408.36	356.3	421.83	65.53	1.474	1.652
96	3664.44	0.0013277	0.004	354.34	52.99	407.33	359.21	420.38	61.17	1.482	1.648
97	3739.35	0.0013624	0.003	357.24	48.78	406.02	362.33	418.62	56.29	1.490	1.642
98	3815.83	0.0014051	0.003	360.41	43.91	404.31	365.77	416.41	50.64	1.499	1.636
99	3894.03	0.001461	0.003	364.03	37.96	401.99	369.72	413.48	43.77	1.510	1.627
100	3974.24	0.0015443	0.003	368.56	29.89	398.45	374.7	409.1	34.4	1.523	1.615
101	4057.05	0.0017576	0.002	377.29	12.33	389.62	384.42	398.59	14.18	1.548	1.586
101.1	4067	0.0019523	0.002	383.22	0.01	383.23	391.16	391.16	0	1.566	1.566

جدول (2-5) الخواص الحرارية لمائع التثليج R-134a أساس الضغط

		الحجم النوعي		الطاقة الداخلية			المحتوى الحراري			الإنتروبي		
kPa	°C	m^3/kg		kJ/kg			kJ/kg			kJ/kg . K		
P	T	v_f	v_{fg}	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
60	36.95	0.0007098	0.31121	3.798	250.32	209.12	3.841	223.95	227.79	0.01634	0.94807	0.96441
70	33.87	0.0007144	0.26929	7.680	203.20	210.88	7.730	222.00	229.73	0.03267	0.92775	0.96042
80	31.13	0.0007185	0.23753	11.15	201.30	212.46	11.21	220.25	231.46	0.04711	0.90999	0.95710
90	28.65	0.0007223	0.21263	14.31	199.57	213.88	14.37	218.65	233.02	0.06008	0.89419	0.95427
100	26.37	0.0007259	0.19254	17.21	197.98	215.19	17.28	217.16	234.44	0.07188	0.87995	0.95183
120	22.32	0.0007324	0.16212	22.40	195.11	217.51	22.49	214.48	236.97	0.09275	0.85503	0.94779
140	18.77	0.0007383	0.14014	26.98	192.57	219.54	27.08	212.08	239.16	0.11087	0.83368	0.94456
160	15.60	0.0007437	0.12348	31.09	190.27	221.35	31.21	209.90	241.11	0.12693	0.81496	0.94190
180	12.73	0.0007487	0.11041	34.83	188.16	222.99	34.97	207.90	242.86	0.14139	0.79826	0.93965
200	10.09	0.0007533	0.099867	38.28	186.21	224.48	38.43	206.03	244.46	0.15457	0.78316	0.93773
240	5.38	0.0007620	0.083897	44.48	182.67	227.14	44.66	202.62	247.28	0.17794	0.75664	0.93458
280	1.25	0.0007699	0.072352	49.97	179.50	229.46	50.18	199.54	249.72	0.19829	0.73381	0.93210
320	2.46	0.0007772	0.063604	54.92	176.61	231.52	55.16	196.71	251.88	0.21637	0.71369	0.93006
360	5.82	0.0007841	0.056738	59.44	173.94	233.38	59.72	194.08	253.81	0.23270	0.69566	0.92836
400	8.91	0.0007907	0.051201	63.62	171.45	235.07	63.94	191.62	255.55	0.24761	0.67929	0.92691
450	12.46	0.0007985	0.045619	68.45	168.54	237.00	68.81	188.71	257.53	0.26465	0.66069	0.92535
500	15.71	0.0008059	0.041118	72.93	165.82	238.75	73.33	185.98	259.30	0.28023	0.64377	0.92400
550	18.73	0.0008130	0.037408	77.10	163.25	240.35	77.54	183.38	260.92	0.29461	0.62821	0.92282
600	21.55	0.0008199	0.034295	81.02	160.81	241.83	81.51	180.90	262.40	0.30799	0.61378	0.92177
650	24.20	0.0008266	0.031646	84.72	158.48	243.20	85.26	178.51	263.77	0.32051	0.60030	0.92081
700	26.69	0.0008331	0.029361	88.24	156.24	244.48	88.82	176.21	265.03	0.33230	0.58763	0.91994
750	29.06	0.0008395	0.027371	91.59	154.08	245.67	92.22	173.98	266.20	0.34345	0.57567	0.91912
800	31.31	0.0008458	0.025621	94.79	152.00	246.79	95.47	171.82	267.29	0.35404	0.56431	0.91835
850	33.45	0.0008520	0.024069	97.87	149.98	247.85	98.60	169.71	268.31	0.36413	0.55349	0.91762
900	35.51	0.0008580	0.022683	100.83	148.01	248.85	101.61	167.66	269.26	0.37377	0.54315	0.91692
950	37.48	0.0008641	0.021438	103.69	146.10	249.79	104.51	165.64	270.15	0.38301	0.53323	0.91624
1000	39.37	0.0008700	0.020313	106.45	144.23	250.68	107.32	163.67	270.99	0.39189	0.52368	0.91558
1200	46.29	0.0008934	0.016715	116.70	137.11	253.81	117.77	156.10	273.87	0.42441	0.48863	0.91303
1400	52.40	0.0009166	0.014107	125.94	130.43	256.37	127.22	148.90	276.12	0.45315	0.45734	0.91050
1600	57.88	0.0009400	0.012123	134.43	124.04	258.47	135.93	141.93	277.86	0.47911	0.42873	0.90784
1800	62.87	0.0009639	0.010559	142.33	117.83	260.17	144.07	135.11	279.17	0.50294	0.40204	0.90498
2000	67.45	0.0009886	0.009288	149.78	111.73	261.51	151.76	128.33	280.09	0.52509	0.37675	0.90184
2500	77.54	0.0010566	0.006936	166.99	96.47	263.45	169.63	111.16	280.79	0.57531	0.31695	0.89226
3000	86.16	0.0011406	0.005275	183.04	80.22	263.26	186.46	92.63	279.09	0.62118	0.25776	0.87894

أسئلة الفصل الثاني

س1:
جِد الضغط، الحجم النوعي، الطاقة الداخلية والمحتوى الحراري للماء في حالة السائل المشبع عند درجة حرارة 50°C.

س2:
جِد الضغط، الحجم النوعي، الطاقة الداخلية والمحتوى الحراري للماء في حالة البخار المشبع عند درجة حرارة 110°C.

س3:
خزان سعته 100 لتر، يحتوي على سائل مشبع لمائع التثليج R-134a عند ضغط 140 kPa، أوجد كتلة المائع ودرجة حرارته والمحتوى الحراري. واحسب كذلك كتلة المائع إذا أحتوى الخزان على بخار مشبع.

س4:
بُرِد غاز عند درجة حرارة مقدارها 27°C، تحت ضغط ثابت، حتى أصبحت درجة حرارة الغاز 7°C، فإذا كان الحجم الابتدائي للغاز يساوي 8 m^3، فما هو الحجم النهائي، وما هو الشغل المبذول على النظام إذا كانت كتلة الغاز تساوي 10 kg، ثابت الغاز يساوي 0.32 kJ/kg.K

س5:
أوجد الحجم والكثافة والحجم النوعي لغاز الأوكسجين كتلته 25 kg عند درجة حرارة 70°C وضغط مقداره (101 kPa).

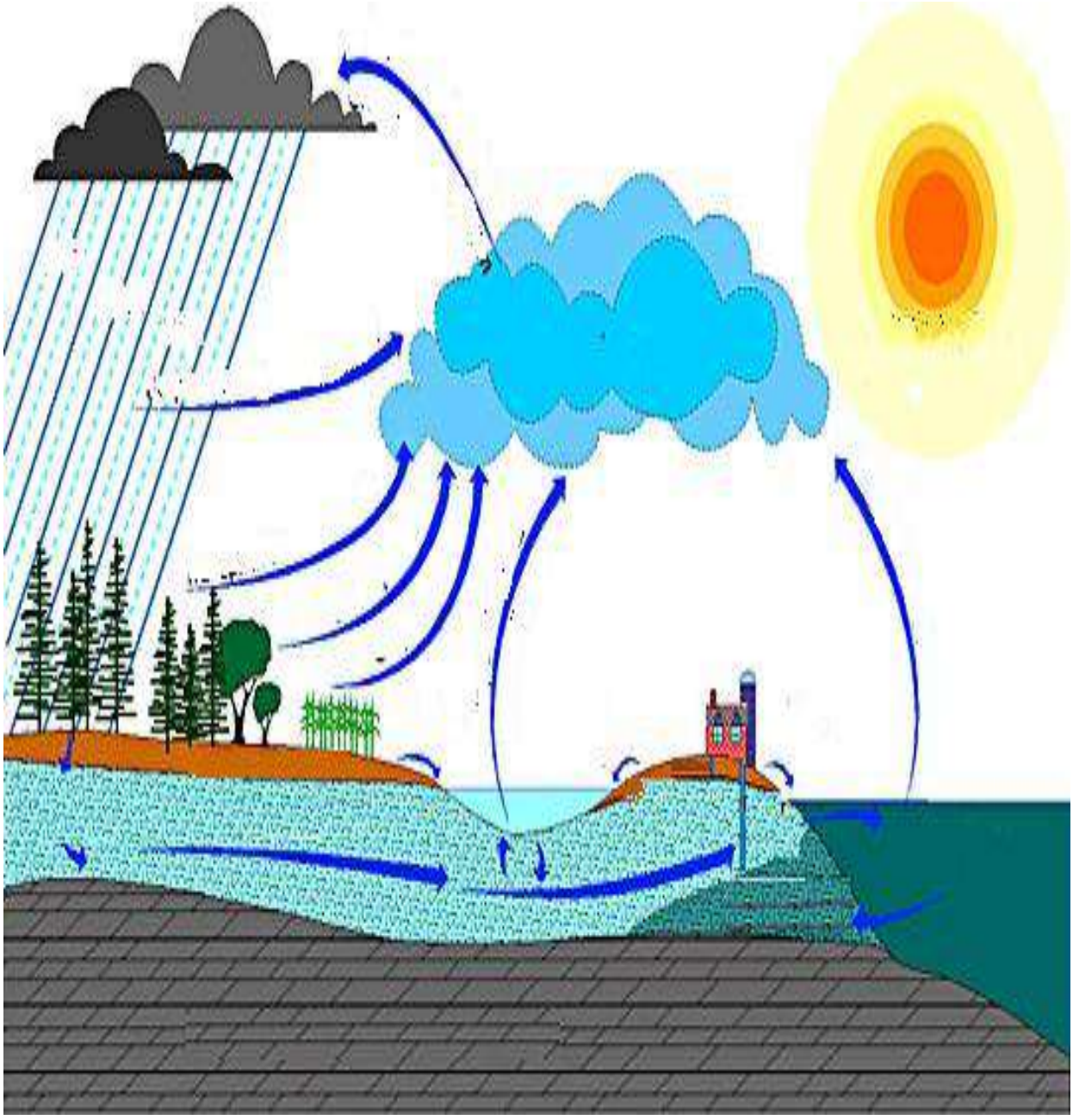
س6:
خزان حجمه 0.4 m^3 يحتوي على بخار ماء مشبع. أوجد كتلة بخار الماء والضغط داخل الخزان عند درجة حرارة (115°C).

س7:
هواء تحت الضغط الجوي حجمه 3 m^3 ودرجة حرارته 25°C، أوجد كتلته وحجمه النوعي.

الفصل الثالث

ديناميك الحرارة

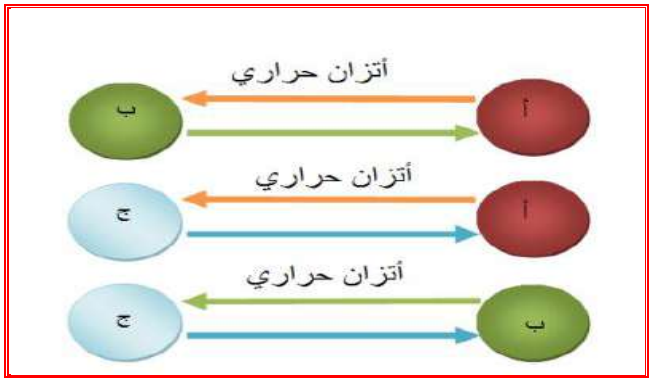
Thermodynamics



ديناميك الحرارة Thermodynamics

1-3 القانون الصفري لديناميك الحرارة The Zeroth Law of Thermodynamics

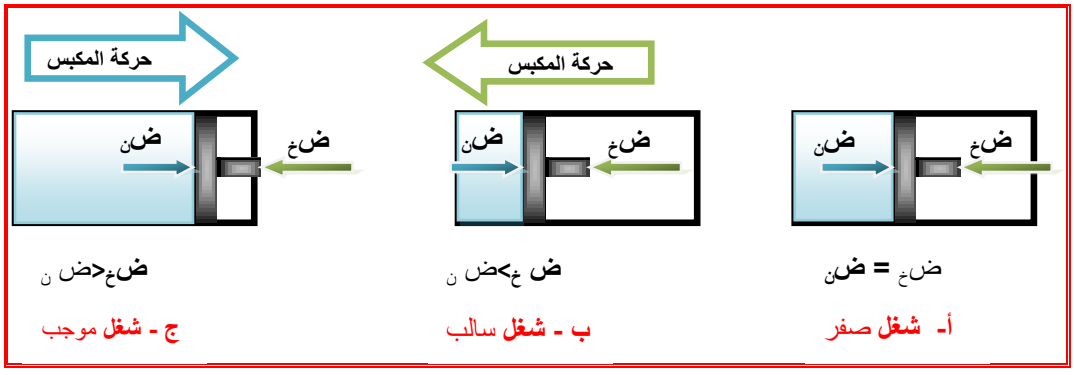
إذا كان نظامان في حالة أتزان حراري مع نظام ثالث كُلٍ على انفراد، فان النظامين متزنان حرارياً مع بعضهما، ويبين الشكل (3-1) تطبيق للقانون الصفري لديناميك الحرارة. فإذا كان الجسم (أ) متزناً حرارياً مع الجسم (ب)، وكذلك متزناً حرارياً مع الجسم (ج)، فإن الجسم (ب) متزن حرارياً مع الجسم (ج).



شكل 3-1 القانون الصفري للديناميك الحراري

2-3 تعريف الشغل في ديناميك الحرارة Definition of Wok in Thermodynamics

عرفنا الشغل سابقا بأنه عند تأثير قوة على جسم ما وإزاحته مسافة معينة فإن القوة تكون قد أنجزت شغلاً. ولتعريف الشغل ضمن علم ديناميك الحرارة، نبين الآتي: لنفرض أن نظاماً مغلقاً كما هو مبين في الشكل (3-2) ويحتوي هذا النظام على غاز معين عند ضغط معين، فإذا كان الضغط داخل النظام (ضن) يساوي الضغط الخارجي المحيط بالنظام (ضخ) فان المكبس يكون في حالة اتزان ولا يتحرك من مكانه، أي: إن الشغل يساوي صفراً، كما هو موضح في الشكل (3-2 أ). أما إذا كان الضغط الخارجي (ضخ) أكبر من الضغط داخل النظام (ضن) فإن المكبس سيتحرك إلى الداخل مؤديا إلى ضغط الغاز وفي هذه الحالة يكون المحيط قد أنجز شغلا على النظام ، أي: إن هنالك شغلاً مبذولاً وستكون إشارة الشغل سالبة، كما هو موضح في الشكل (3-2 ب)، أما إذا كان الضغط داخل النظام (ضن) أكبر من الضغط الخارجي(ضخ) فإن المكبس سيتحرك إلى الخارج مؤديا إلى تمدد الغاز وفي هذه الحالة يكون النظام قد أنجز شغلا على المحيط وعليه سيكون الشغل موجباً، كما هو مبين في الشكل (3-2 ج).



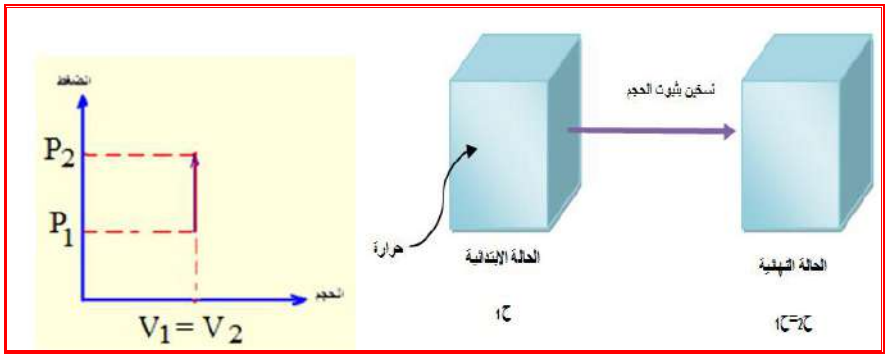
شكل 3-2 الشغل في الديناميك الحراري

3-3 الإجراءات في ديناميك الحرارة Thermodynamics Processes

يمكن تقسيم الإجراءات في ديناميك الحرارة إلى أربعة إجراءات أساسية هي:

أ- إجراء ثبوت الحجم (آيسوكورك) Isochoric Process

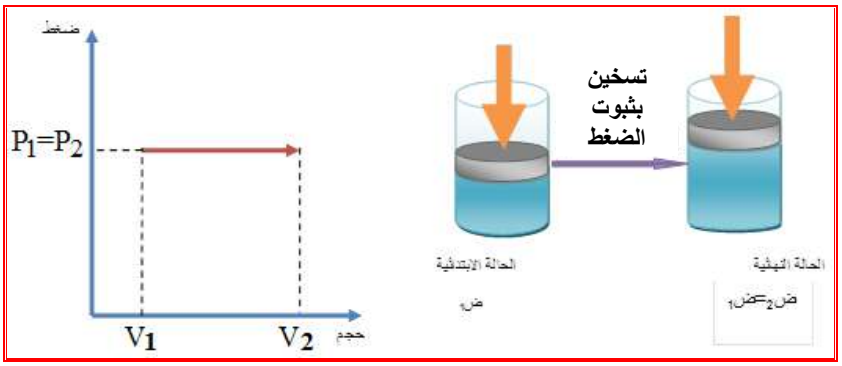
كما مبين في الشكل (3-3).



شكل 3-3 إجراء ثبوت الحجم

ب- إجراء ثبوت الضغط (آيسوبارك) Isobaric Process

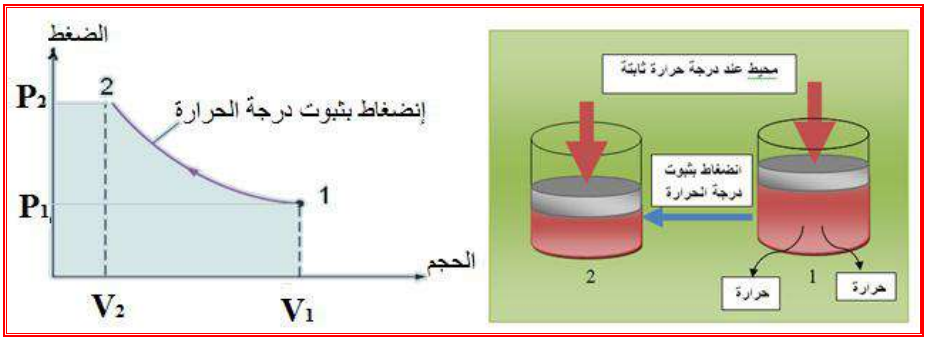
كما مبين في الشكل (3-4).



الشكل 3-4 إجراء ثبوت الضغط

ج- إجراء ثبوت درجة الحرارة (آيسوثيرمل) Isothermal Process

كما مبين في الشكل (3-5).



شكل 3-5 إجراء ثبوت درجة الحرارة

د- الإجراء الكظمي (الأدياباتي) Adiabatic Process

4-3 القانون الأول لديناميك الحرارة First Law of Thermodynamics

لنفرض أن لدينا نظاماً حرارياً مغلقاً، مكوناً من غاز محصور داخل مكبس وأسطوانة. إذا زودنا النظام بطاقة حرارية فإن أثر هذه الحرارة يظهر فيما يأتي:

1. تمدد المكبس إلى الخارج ضد الضغط الجوي مما يؤدي إلى إنتاج شغل.
2. زيادة درجة حرارة الغاز مما يؤدي إلى زيادة الطاقة الداخلية للنظام، أي يحدث تغير في الطاقة الداخلية للنظام.

إن القانون الأول للديناميك الحراري يدرس العلاقة بين المتغيرات الثلاثة المذكورة أعلاه وهي الطاقة الحرارية والشغل والتغير في الطاقة الداخلية للنظام.

وينص القانون الأول لديناميك الحرارة على أن: ***كمية الحرارة المضافة للنظام تساوي مجموع الشغل الذي يبذله النظام والتغير في الطاقة الداخلية للنظام.***

1-4-3 القانون الأول لديناميك الحرارة للنظام المغلق
First law of Thermodynamics for a Closed System

تكتب الصيغة الرياضية للقانون الأول لديناميك الحرارة للنظام المغلق كما يأتي:

$$Q = \mathcal{W} + \Delta U$$

وتسمى المعادلة أعلاه بمعادلة اللاجريان (الكتلة ثابتة) للقانون الأول لديناميك الحرارة.
إذ إن:

Q: تمثل كمية الحرارة المنتقلة من أو إلى النظام بوحدات الجول (J)
W: الشغل المنجز من قبل النظام أو شغل خارجي يبذل على النظام بوحدات الجول (J)
ΔU: مقدار التغير في الطاقة الداخلية للنظام بوحدات الجول (J)

ويمكن حساب الشغل بحسب نوع الإجراء. أما التغير بالطاقة الداخلية للغازات فلا يعتمد على نوع الإجراء ويحسب من القانون الآتي:

$$\Delta U = m \times C_v \times (T_2 - T_1)$$

إذ إن:

T_1, T_2 درجة حرارة الغاز قبل وبعد الإجراء بوحدات السيليزي °C

ويمكن أن يكتب القانون الأول لديناميك الحرارة بصيغة أخرى مماثلة لما ذكر، وهي :

إذا مر نظام بدورة كاملة فان صافي الحرارة المضافة يساوي صافي الشغل المنجز (لأن الطاقة الداخلية تعود إلى قيمتها الابتدائية بعد انتهاء الدورة).

ويكتب بالصيغة الرياضية التالية:

$$\Sigma Q = \Sigma \mathcal{W}$$

حيث إن: (Σ): مجموع

أي إن مجموع الحرارة المضافة تساوي مجموع الشغل الناتج في دورة كاملة، مثلا إذا تمت تدفئة غرفة بمدفأة كهربائية كما في الشكل (3-6) قدرتها 1.2 kW، وكانت الحرارة الخارجة من الغرفة تساوي 1.9 kW، ماذا يحدث للغرفة؟ هل تَبرد أم تَسخن؟

يمكن استخدام المعادلة التالية:

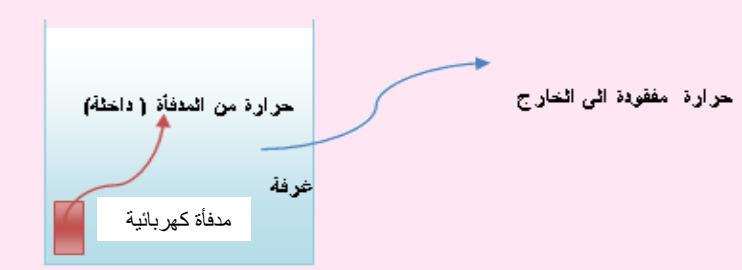
$$\Sigma Q = \Sigma \mathcal{W} + \Delta U$$

ملاحظة: بما أن حدود الغرفة لم تتغير لذلك يكون الشغل مساوياً للصفر، وتكون المعادلة كالآتي:

$$\Sigma Q = \Delta U$$

$$1.2 - 1.9 = -0.7 \text{ kW}$$

أي إن الحرارة الخارجة أكبر من الداخلة بمقدار 0.7 kW ، لذا فإن الغرفة تَبرد.

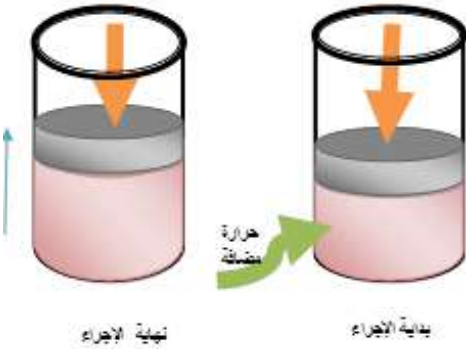


شكل 3-6 غرفة يتم تدفئتها بمدفأة كهربائية

مثال 1

زوِّد نظام يتكون من غاز محصور في مكبس وأسطوانة بكمية حرارة مقدارها 5 kJ، فزاد حجمه بمقدار $0.002\ m^3$ عند ضغط ثابت مقداره 1.1 bar، احسب التغير في الطاقة الداخلية.

الجواب: يكتب النص الرياضي للقانون الأول لديناميك الحرارة كما يأتي:



$$Q = \mathcal{W} + \Delta U$$

$Q = 5$ kJ كمية الحرارة

بما أن الضغط ثابت يكون قانون الشغل بثبوت الضغط كالآتي:

$$W = P(V_2 - V_1)$$

$(V_2 - V_1) = 0.002\ m^3$

$W = 1.1 \times 100 \times 0.002 = 0.22\ kJ$

$\Delta U = Q - W = 5 - 0.22 = 4.78\ kJ$

مثال 2

خزان مغلق يحتوي على 0.2 kg مـــن الهواء، عنـــد درجة حرارة مقدارها 300 K وضغط 100 kPa تنتقل الحرارة إليه بمقدار 5 kJ، إحسب التغير في الطاقة الداخلية ودرجة الحرارة والضغط في نهاية الإجراء.

الجواب:

$Q = \mathcal{W} + \mathbf{\Delta}U$

بما إن الحجم ثابت في أثناء الإجراء فإن الشغل يساوي صفراً، أي إن

$Q = \mathbf{\Delta}U = 5$ kJ

$\mathbf{\Delta}U = m \times C_v \times (T_2 - T_1)$

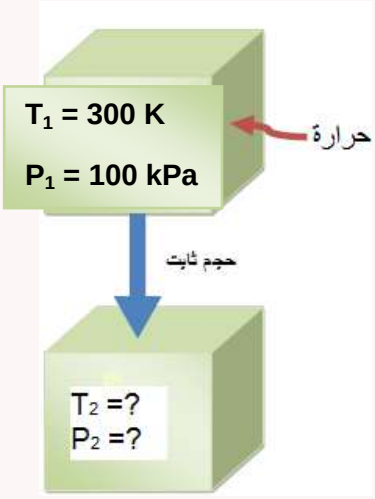
$5 = 0.2 \times 0.717 \times (T_2 - 300)$

$T_2 = 334.8$ K

القانون العام للغازات:

$P_1 \times V_1 = m \times R \times T_1$

$V_1 = \frac{\mathbf{0.2 \times 0.287 \times 300}}{\mathbf{100}} = 0.1722\ m^3$



$V_2 = V_1 = 0.1722\ m^3$

$P_2 \times V_2 = m \times R \times T_2$

$P_2 = m \times R \times T_2 / V_2$

$P_2 = \frac{\mathbf{0.2 \times 0.287 \times 334.8}}{\mathbf{0.1722}} = 111.6\ kPa$

أو يمكن إتباع الطريقة التالية:

$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2}$

و بما أن:

$V_1 = V_2$

إذاً تكتب المعادلة أعلاه بعد اختصار V_2 مع V_1 كما يأتي:

$\frac{\mathbf{P_1}}{\mathbf{T_1}} = \frac{\mathbf{P_2}}{\mathbf{T_2}} \Longrightarrow P_2 = \frac{\mathbf{T_2 \times P_1}}{\mathbf{T_1}} =$

أو

$P_2 = 111.6$ kPa

مثال 3

نظام فيه 2 kg من الماء البارد عند درجة حرارة 50°C وعند ضغط 100 kPa، تم إضافة حرارة للنظام بثبوت الضغط، إلى أن تحول السائل البارد إلى بخار مشبع، احسب كمية الحرارة المضافة إلى النظام.

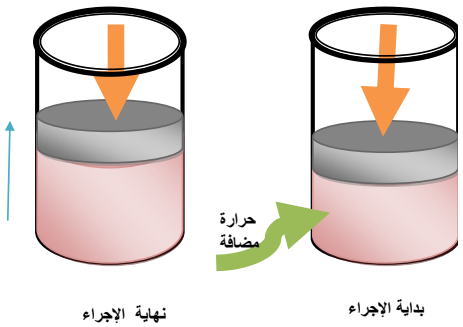
الجواب

يكتب النص الرياضي للقانون الأول لديناميك الحرارة كما يأتي:

$$q = w + \Delta u$$

بما إن الضغط ثابت: لذلك نكتب قانون الشغل بثبوت الضغط

$$w = P \times (\nu_2 - \nu_1)$$



$V = V_1$ سائل عند درجة حرارة 50 درجة سيليزية

$V = V_2$ غاز عند ضغط 100 كيلو باسكال

$\nu_{liq} = 0.001012\ m^3/kg$ from table (2-2)

$\nu_{gas} = 1.6941\ m^3/kg$ from table (2-2)

$w = 100 \times (1.6941 - 0.001012)$

$w = 169.3\ kJ/kg$

$\Delta u = u_2 - u_1$

$T = T_1$ سائل عند 50°C $u_1 = u_{liq}$

$T = T_2$ غاز عند 100 kPa $u_2 = u_{gas}$

$u_{liq} = 209.33\ kJ/kg$ from table (2-2)

$u_{gas} = 2505.6\ kJ/kg$ from table (2-3)

$\Delta u = 2505.6 - 209.33 = 2296.27\ kJ/kg$

$q = w + \Delta U$

$q = 169.3 + 2296.27 = 2465.57\ kJ/kg$

إذاً كمية الحرارة الكلية: $Q = q \times m$

$Q = 2465.57 \times 2 = 4931.14\ kJ$

مثال 4

نظام فيه 200 g من الماء عند حالة السائل المشبع عند ضغط 150 kPa، تبخر عند حجم ثابت إلى بخار مشبع، أوجد التغير في حجم الماء والحرارة اللازمة لتبخر الماء.

الجواب

يكتب النص الرياضي للقانون الأول للديناميك الحراري كما يأتي:

$$q = w + \Delta u$$

بما إن الحجم ثابت

إذاً: الشغل = صفراً $w = 0$

$\upsilon_{liq} = 0.00105\ m^3/kg$ $\upsilon_{gas} = 1.1594\ m^3/kg$

$\Delta u_{liq} = 466.97\ kJ/kg$ $\Delta u_{gas} = 2519.2\ kJ/kg$

التغير في حجم الماء: $\Delta V = m \times (\upsilon_{gas} - \upsilon_{liq})$

$$\Delta V = 0.200 \times (1.1594 - 0.00105) = 0.23167\ m^3$$

$$q = w + \Delta u$$

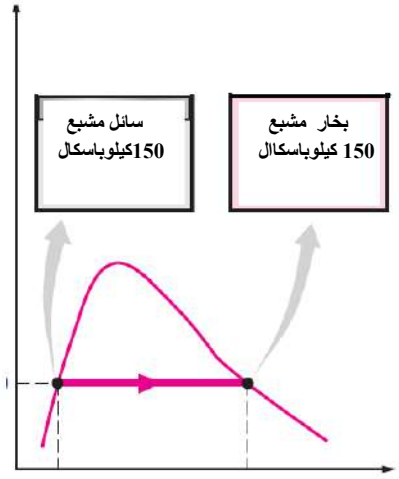
$$q = \Delta u$$

$$q = (\Delta u_{gas} - \Delta u_{liq})$$

$$q = 2519.2 - 466.97 = 2052\ kJ/kg$$

إذاً كمية الحرارة الكلية $Q = q \times m$

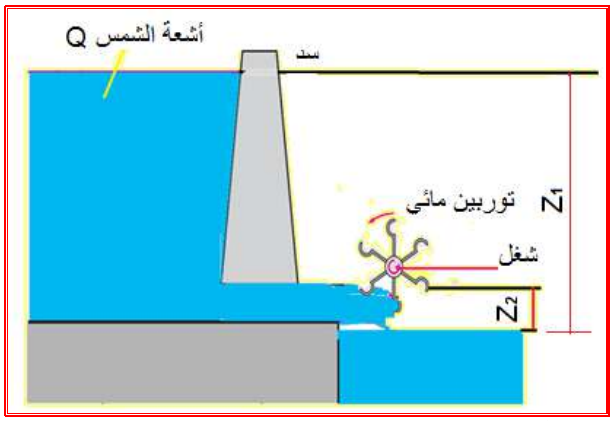
$$Q = 2052.23 \times 0.2 = 410.446\ kJ$$



3-4-2 القانون الأول لديناميك الحرارة للنظام المفتوح

First Law of Thermodynamics for an Open System

يبين الشكل (3-7) نظاماً مفتوحاً يتمثل في سد أسفله توربين مائي ويمكن فيه إنتاج شغل من سقوط الماء من الارتفاع الأقصى (z_1) إلى المستوى الأدنى (z_2). فلو كتبنا الطاقات الداخلة والخارجة من النظام نجد ما يأتي من الطاقات:



شكل 3-7 النظام المفتوح في الديناميك الحراري

الطاقات الموجودة في نقطة الدخول (الحالة 1):

1- طاقة الماء الداخلية في الحالة الابتدائية (U_1).
2- الطاقة الحركية للماء عند الدخول (KE_1).
3- الطاقة الكامنة للماء في المستوى الأعلى (PE_1).
4- طاقة الجريان عند الدخول (FE_1).
5- الطاقة الحرارية المضافة (Q).

عند خروج الماء من النظام المفتوح (الحالة 2) تكون له طاقات كما هو في الدخول وهي:

1- طاقة الماء الداخلية في الحالة النهائية (U_2).
2- الطاقة الحركية للماء عند الخروج (KE_2).
3- الطاقة الكامنة للماء في المستوى الأدنى (PE_2).
4- طاقة الجريان عند الخروج (FE_2).
5- الشغل الناتج من النظام (W).

وقبل أن نكتب صيغة القانون الأول للنظام المفتوح يجب تعريف الطاقات أعلاه وكيفية التعامل معها:

- **الطاقة الداخلية** U: وهي الطاقة التي تمتلكها المادة، وتعتبر خاصية للمادة (وهي من الخواص الثرموديناميكية المحسوبة) وتعتمد على درجة حرارة المادة ونوعيتها، وسبق أن مرَ ذكر القانون الذي يمكن من خلاله حساب الطاقة الداخلية للماء، ويكتب كما يأتي:

طاقة داخلية = الكتلة × الحرارة النوعية بثبوت الحجم × درجة الحرارة المطلقة للماء

$$U = m \times C_v \times T$$

وحداتها جول (J)

- **الطاقة الحركية للمادة Kinetic Energy** (طح) KE: وهي الطاقة الناتجة عن حركة الماء بسرعة ما، وتعتمد على كتلة المادة و سرعتها، وتحسب من القانون التالي:

ط ح = $\frac{1}{2}$ × كتلة المادة × مربع سرعة المادة

$$KE = {}^{1}/_{2} \times m \times v^2$$

- **الطاقة الكامنة Potential Energy** PE: وهي الطاقة التي تمتلكها المادة بسبب وجودها في ارتفاع عن منسوب معيِن، وتعتمد على كتلة المادة، و التعجيل الأرضي، ومدى ارتفاع المادة عن ذلك المنسوب وتحسب من القانون التالي:

طاقة كامنة = الكتلة × التعجيل الأرضي × الارتفاع

$$PE = m \times g \times z$$ وحداتها جول (J)

- **طاقة الجريان FE Flow Energy**: هي الطاقة التي تبذلها المادة لإزاحة حجم معين من المائع، وتعتمد على الحجم المزاح ومقدار الضغط المستخدم لإزاحة هذا الحجم. وتُحسب من القانون التالي:

طاقة الجريان = الضغط × حجم المادة المزاحة

$$FE = P \times V$$ وحداتها جول (J)

ملاحظة: للحصول على وحدات بالكيلو جول (kJ) للمعادلات أعلاه تقسم النواتج على 1000 لتحقيق تجانس مع وحدة المحتوى الحراري.

عند تطبيق القانون الأول للديناميك الحراري على الشكل (3-7) نحصل على ما يأتي:

مجموع الطاقات الداخلة = مجموع الطاقات الخارجة

$$U_1 + KE_1 + PE_1 + FE_1 + Q = U_2 + KE_2 + PE_2 + FE_2 + \mathcal{W}$$

وإذا أعيد كتابة القانون على أساس أن كتلة المادة هي 1 كغم

$$U_1 + \mathbf{1}/\mathbf{2} \times \mathbf{v_1}^2 + g \times z_1 + (P \times V)_1 + Q = U_2 + {}^{\mathbf{1}}\!/_{\mathbf{2}} \times \mathbf{v_2}^2 + g \times z_2 + (P \times V)_2 + \mathcal{W}$$

وتسمى المعادلة أعلاه معادلة الجريان للقانون الأول لديناميك الحرارة (**الصيغة الأولى**).

ويمكن كتابة معادلة الجريان المذكورة بصيغة أخرى، إذا أخذنا مفهوم ***المحتوى الحراري*** (***Enthalpy***) (**H**) الذي يمثل أحد الخواص الثرموديناميكية المحسوبة للمادة. وهو يمثل مقدار ما تحتويه المادة من حرارة، ويساوي مجموع الطاقة الداخلية للمادة وطاقة الجريان ووحداته هي كيلو جول (**kJ**).

ويمثل ***المحتوى الحراري النوعي Specific Enthalpy (h)*** مقدار المحتوى الحراري للمادة نسبة لكتلتها، وسوف يستخدم نفس الرمز أعلاه في هذا الكتاب أما وحداته فهي **(kJ/kg)**. ويحسب مقدار المحتوى الحراري بالصيغة التالية:

$$h = u + FE$$

وكذلك يمكن حساب المحتوى الحراري من المعادلة الآتية:

$$h = C_p \times T$$

إذاً تكون الصيغة الجديدة لمعادلة الجريان (**الصيغة الثانية**) هي:

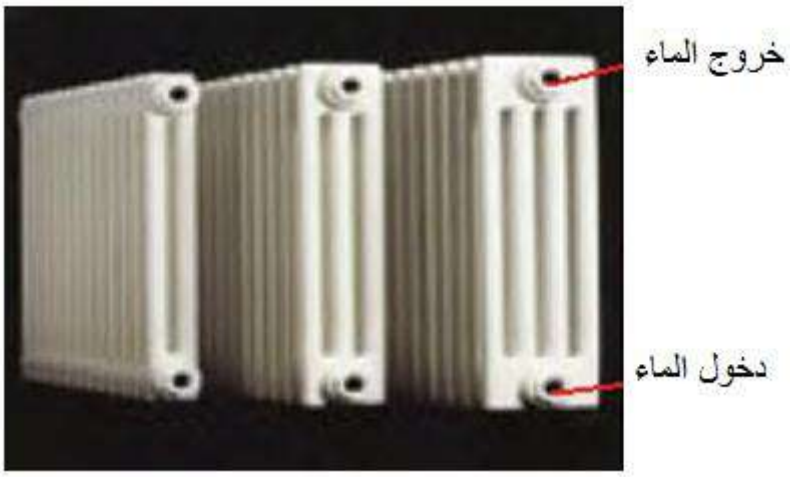
$$\frac{1}{2}v_1^2 + g \times z_1 + h_1 + q = \frac{1}{2}v_2^2 + g \times z_2 + h_2 + w$$

3-2-4-1 تطبيقات على قانون طاقة الجريان Applications of Flow Energy Eq.

أولاً: أنظمة لا وجود للشغل فيها

الأنظمة الحرارية:

أ- المشعات Radiators: تستخدم المشعات عادة في نظام التكييف المركزي باستخدام الماء، وقد تستخدم مع مثلجات الماء (Water Chillers) في أنظمة التبريد أو مع المراجل (Boilers) في أنظمة التدفئة، ويتكون المشع من أنابيب ماء يمر خلالها ماء مثلج أو ماء حار أو بخار، كما هو مبين في الشكل (3-8).



شكل 3-8 مشعات تستخدم في مجال التدفئة

وتستخدم الصيغة الثانية لمعادلة الطاقة للجريان وكما يأتي:

$$\frac{1}{2}v_1^2 + g \times z_1 + h_1 + q = \frac{1}{2}v_2^2 + g \times z_2 + h_2 + w$$

وبما أن الهدف الرئيسي من المشعات هو نقل الحرارة، لذا يعاد كتابة المعادلة أعلاه بدلالة كمية الحرارة كما يأتي:

$$q = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + g(z_2 - z_1) + (h_2 - h_1) + w$$

وفي المشعات تُهمل الحدود التالية من المعادلة :

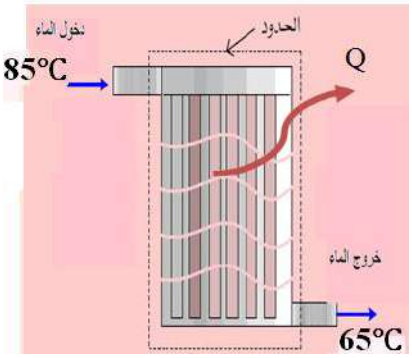
1- التغير في الطاقة الحركية لأن التغير فيها ضئيل جداً ولا يعتد به.
2- التغير في طاقة الوضع (صغير جداً)
3- الشغل {لعدم وجوده}.

لذا تكتب معادلة الطاقة للجريان والخاصة بالمشعات كما يأتي: $q = h_2 - h_1$

مثال 5

يدخل ماء إلى مشع بدرجة حرارة مقدارها 85°C عند الضغط الجوي، ويخرج منه بدرجة حرارة 65°C، أوجد كمية الحرارة المفقودة من المشع لكيلوغرام واحد من الماء، وأوجد معدل انتقال الحرارة إذا كان معدل تدفق الماء يساوي 0.25 kg/s

الجواب



معادلة الطاقة للنظام المفتوح والخاصة بالمشعات هي:

$q = h_2 - h_1$

$h_1 = 356.02$ kJ/kg

$h_1 = h_{Liq}$ at 85°C = 356.02 kJ/kg

$h_2 = 272.12$ kJ/kg

$h_2 = h_{Liq}$ عند 65°C = 272.12 kJ/kg

$\Delta h = 356.02 - 272.12 = 83.9$ kJ/kg

معدل انتقال الحرارة = معدل تدفق الكتلة × Q

$$\dot{Q} = \dot{m} \times h$$

$$\dot{Q} = 0.25 \times 83.9 = 20.975 \text{ kW}$$

ب- المكثفات والمبخرات Condensers and Evaporators

تستخدم المكثفات والمبخرات في دورات التثليج، ولا تخلو أي دورة تثليج من المكثفات أو المبخرات، حيث يعمل المكثف في دورة التثليج على طرح الحرارة الكامنة لتبخر مائع التثليج ليحوله من بخار في نقطة الدخول إلى سائل في نقطة الخروج، أما المبخر فيعمل على سحب الحرارة من الحيز المبرد وعند سحب الحرارة يتحول مائع التثليج من سائل في نقطة الدخول إلى بخار في نقطة الخروج،

أي إن: عمل المكثفات هو عكس عمل المبخرات، وسيكون التطبيق في هذا الفصل تطبيقا مبسطاً، حيث أنه في الحالة الحقيقية يدخل بخار مائع التثليج في حالة التحميص إلى المكثف ويخرج سائلاً فائق التبريد، أما في المبخر فان مائع التثليج يدخل المبخر في حالة خليط من السائل والبخار ويخرج منه بخاراً محمصاً. وسيقتصر التطبيق في هذا الفصل على اعتبار البخار الداخل إلى المكثف والخارج من المبخر بخاراً مشبعاً.

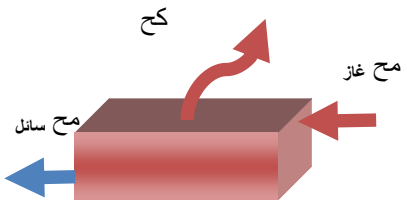
تعاد كتابة معادلة الطاقة للجريان للنظام المفتوح كما كتبت في المشعات وكما يأتي: $q = h_2 - h_1$

مثال6

يدخل البخار المشبع لمائع التثليج R-134a إلى مكثف في دورة تثليج مـــا عند ضغط 1600 kPa، وعند طرح الحرارة يتحول إلى سائل بارد عند نفس الضغط ودرجة حرارة مقدارها 40°C، أوجد كمية الحرارة المطروحة من المكثف.

الجواب

معادلة الطاقة للنظام المفتوح والخاصة بالمشعات هي:



$$q = h_2 - h_1$$

$h_{gas} = h_1$ عند 1600 kPa = 425.3 kJ/kg من جدول (4-2)

$h_{liq} = h_2$ عند 40°C = 256.16 kJ/kg من جدول (4-2)

$$q = 256.16 - 425.3 = -169.14 \text{ kJ/kg}$$

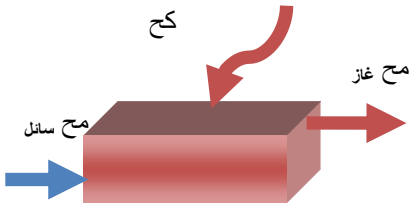
تدل الإشارة السالبة على أن النظام قد فقد حرارة.

مثال 7

مبخر دورة تثليج يستخدم في ثلاجة، يدخل مائع التثليج R-134a بهيئة سائل مشبع عند درجة حرارة (-20°C) وبعد سحب الحرارة من الحيز يتحول إلى بخار مشبع عند درجة الحرارة نفسها، أوجد كمية الحرارة التي قام المبخر بسحبها من الحيز.

الجواب

معادلة الطاقة للنظام المفتوح والخاصة بالمشعات هي:



$$q = h_2 - h_1$$

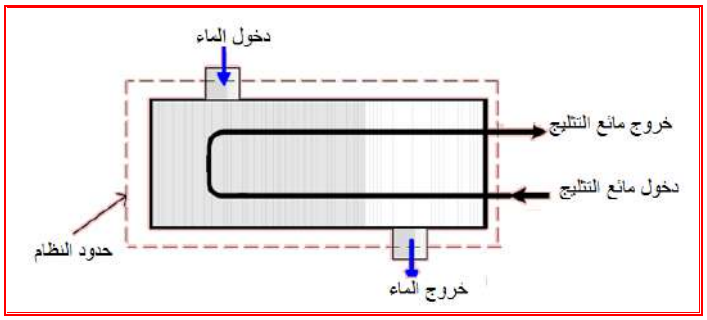
$h_{liq} = h_1$ عند (-20°C) = 174.24 kJ/kg

$h_{gas} = h_2$ عند (-20°C) = 385.28 kJ/kg

$$q = 385.28 - 174.24 = 211.04 \text{ kJ/kg}$$

ج- المبادلات الحرارية Heat Exchangers

وفيه يتم تبادل الحرارة بين مائعين وبشكل غير مباشر وتصمم المبادلات الحرارية بأشكال وتصاميم مختلفة حسب الظروف التي تعمل بها. ويبين الشكل (3-9) أحد هذه التصاميم وفيه يدخل أحد المائعين في حزمة أنابيب تقع داخل تجويف أسطوانة (المبادل الحراري) في حين يدخل المائع الثاني تجويف الأسطوانة مروراً بحزمة الأنابيب والتي تتم خلالها عملية التبادل الحراري بين المائعين من على سطح جدار الأنابيب.



شكل 3-9 المبادل الحراري

وينطبق على المبادل الحراري ما ينطبق على كل من المشعات والمبخرات والمكثفات، أي إن: القانون الذي يحسب الحرارة المضافة أو المطروحة من المبادل الحراري هو كما يأتي:

كمية الحرارة المفقودة من مائع$_1$ = كمية الحرارة المكتسبة من مائع$_2$

$$m_1 (h_1 - h_2) = m_2 (h_2 - h_1)$$

مثال 8

يدخل البخار المشبع لمائع التثليج R-134a بمعدل 0.06 kg/s إلى المبادل الحراري عند ضغط 1600 kPa، وعند طرح الحرارة إلى ماء التبريد يتحول إلى سائل بارد عند نفس الضغط ودرجة حرارة مقدارها 40°C. بينما يدخل الماء إلى المبادل الحراري عند درجة حرارة مقدارها 25°C ويخرج عند درجة حرارة مقدارها 35°C أوجد معدل جريان الماء اللازم ومعدل الحرارة المطروحة من مائع التثليج.

الجواب

$h_{gas} = h_{R\ in}$ عند 1600 kPa = 277.86 kJ/kg

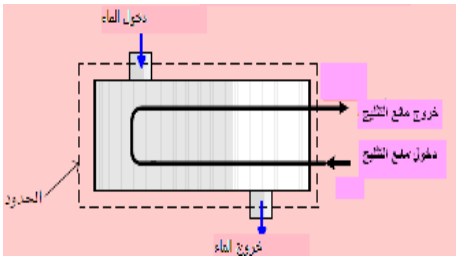
$h_{Liq\ cold} = h_{R\ out}$ عند 40°C = 256.16 kJ/kg

$h_{W\ cold} = h_{W\ in}$ عند 25°C = 104.83 kJ/kg

$h_{W\ hot} = h_{W\ out}$ عند 35°C = 146.64 kJ/kg

$$0.06 \times (277.86 - 256.16) = \dot{m}_{water} \times (146.64 - 104.83)$$

$$\dot{m}_{water} = \frac{0.06 \times (277.86 - 256.16)}{(146.64 - 104.83)} = 0.031 \text{ kg/s} = 1.86 \text{ kg/min}$$



$$Q = \dot{m} \times (h_{Rin} - h_{Rout})$$

$$\dot{Q} = 0.06 \times (277.86 - 256.16) = 1.302 \text{ kJ/s} = 1.302 \text{ kW}$$

ثانياً: أنظمة لا وجود لانتقال الحرارة فيها

أ- التوربينات Turbines

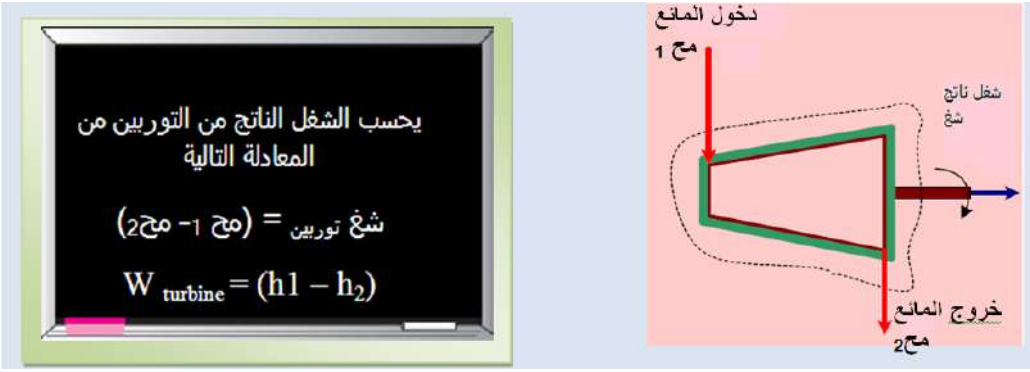
التوربين هو وسيلة لاستغلال المائع المندفع في توليد حركة ميكانيكية دوارة، ويُربط التوربين إلى مولد للطاقة الكهربائية، إذ يستغل الحركة الدورانية الناتجة من اندفاع المائع، ليحولها إلى طاقة كهربائية. وهنالك عدة أنواع من التوربينات، منها التوربينات المائية التي تستخدم المياه الساقطة من السدود لتوليد الطاقة الكهربائية، وهنالك التوربينات البخارية التي تستخدم البخار المندفع من المرجل لتوليد الطاقة الكهربائية، والتوربينات الغازية التي تستغل الغازات المندفعة من غرف الاحتراق لتوليد الطاقة الكهربائية.

وتعزل التوربينات حرارياً أي لا يسمح بانتقال الحرارة بين التوربين والمحيط، وبسبب كون التغير في الطاقة الكامنة والطاقة الحركية للمائع قليلاً نسبة إلى الشغل الناتج من التوربين، لذا تهمل الطاقة الكامنة والطاقة الحركية للمائع عند التعامل مع التوربين. أي إن: المعادلة التي تحسب شغل التوربين الموضح في الشكل (3-10) تكون كما يأتي:

$$q = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + g(Z_2 - Z_1) + (h_2 - h_1) + w$$

ويبقى منها الشغل وتغير المحتوى الحراري:

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



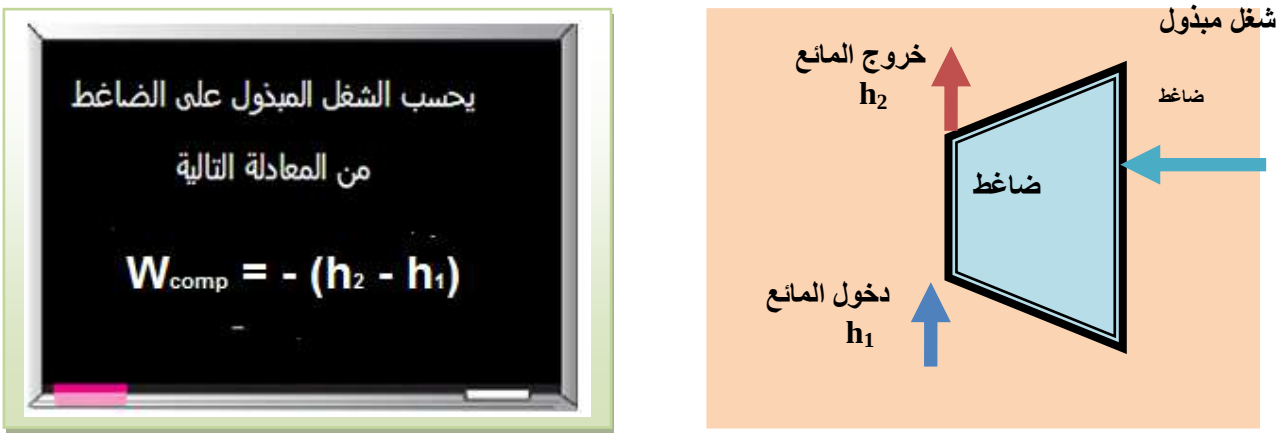
شكل 3-10 التوربين وكيفية حساب الشغل الناتج منه

ب- الضواغط Compressors

يستخدم الضاغط لرفع ضغط الأبخرة والغازات عن طريق بذل شغل على الضاغط. أي إن عمل الضاغط هو عكس عمل التوربين. إذ يقوم الضاغط باستهلاك الشغل لغرض رفع الضغط، وما ينطبق على التوربين ينطبق على الضاغط من حيث التبادل الحراري والطاقة الكامنة والطاقة الحركية كون التغير فيها مهملاً، وعلى هذا الأساس تكون المعادلة الخاصة بحساب شغل التوربين مشابهة للمعادلة التي تحسب الشغل المبذول على الضاغط ويبين الشكل (3-11) الضاغط وكيفية حساب الشغل المبذول عليه:

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

الإشارة السالبة تدل على أن الشغل مبذول على النظام

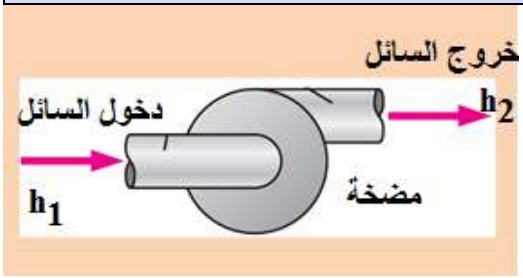


شكل 3-11 الضاغط وكيفية حساب الشغل المبذول عليه

ج- المضخات Pumps

تقوم المضخات برفع مستوى السوائل من مستوى واطئ إلى مستوى عالٍ ويجب بذل شغل على المضخة لتعمل كما هو مبين في الشكل (3-12)، وغالبا ما تهمل الحرارة الناتجة عن رفع السوائل كونها قليلة جداً، وتكتب المعادلة الخاصة بحساب الشغل المبذول على المضخة بعد إهمال التبادل الحراري بين المضخة والمحيط وإهمال تغير الطاقة الحركية كما يأتي:

$$w_{pump} = g\times(z_2 - z_1) + \upsilon(P_2 - P_1)$$ وحداتها J/kg

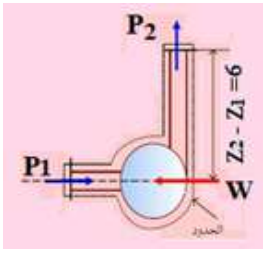


شكل 3-12 مضخة ماء

مثال 9

مضخة ماء موضحة في الشكل أدناه، ترفع ضغط الماء بمقدار 280 kPa عند درجة حرارة 30°C. فإذا كان خروج الماء من المضخة على ارتفاع 6 m عن مستوى دخوله إليها، اِحسب الشغل اللازم لعمل المضخة. أهمل التغير في الطاقة الداخلية للماء، وكذلك الطاقة الحركية للماء.

الجواب



بما أن درجة الحرارة لم تتغير،
لذلك يعتبر الحجم النوعي للماء ثابتاً
ويساوي $0.001004\ m^3/kg$ من جدول (2-2)

$z_2 - z_1 = 6\ m$

بما إن أن درجة الحرارة ثابتة، لذا فان الحجم النوعي للماء قبل الضخ وبعده متساويان أي إن:

$$\upsilon_2 = \upsilon_1 = 0.001004 \simeq 0.001\ m^3/kg$$

$$P_2 - P_1 = 280 \times 1000 = 280000\ Pa$$

$$w_{pump} = g\times(z_2 - z_1) + \upsilon(P_2 - P_1)$$

$$w_{pump} = 9.81 \times (6) + (0.001 \times 280000) = 338.86\ J/kg$$

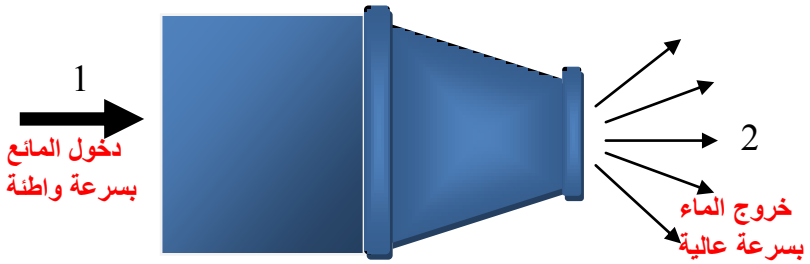
ثالثاً: أنظمة لا وجود للشغل أو انتقال الحرارة فيها

أ- الرشاش أو الحاقن Nozzles

وهو من الأنظمة المفتوحة، ويتم فيه زيادة سرعة خروج المائع، ومن الأمثلة على هذه الأنظمة حاقنات الوقود في محركات الديزل، و كذلك رشاشات الماء في برج التبريد والتي تعمل على زيادة سرعة خروج الماء من الرشاش ليتحول إلى رذاذ يمكن تبريده بسهولة وكما هو مبين في الشكل (3-13)، ولا يوجد شغل أو انتقال حرارة في هذا النوع من الأنظمة، وكذلك بسبب كون فتحتي دخول وخروج المائع في مستوٍ واحد لذا يهمل التغيير في الطاقة الكامنة للمائع. وتكتب معادلة الطاقة للجريان المستقر كما يأتي:

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2}(v_1^2 - v_2^2) \times 10^{-3}$$

وحداتها (kJ/kg)

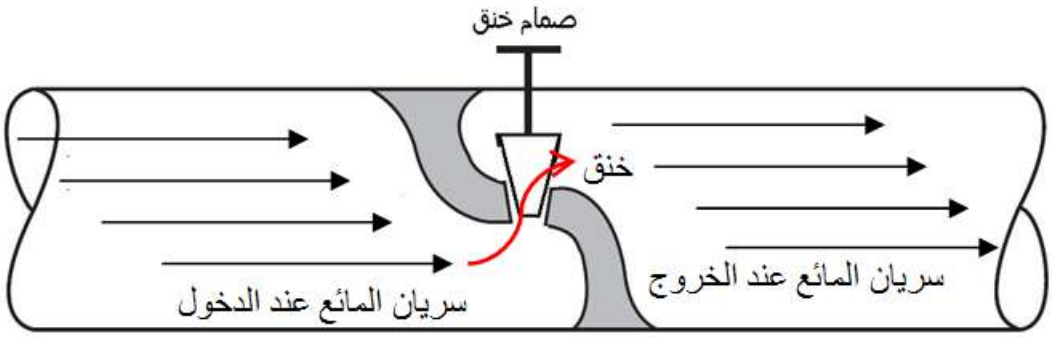


شكل 3-13 الحاقن أو الرشاش

ب- أدوات التمدد Expansion Devices

تُعد أدوات التمدد من الأجزاء الرئيسية في منظومات التثليج وفيها يتم خفض الضغط عن طريق تضييق فتحة الخروج، كما في الرشاشات لا يوجد شغل أو انتقال حرارة في أدوات التمدد، إضافة إلى ذلك يمكن إهمال التغير في كل من الطاقة الحركية وطاقة الوضع، ويسمى الإجراء في أداة التمدد بإجراء الخنق. ويبين الشكل (3-14) صمام خنق أو صمام تمدد، ومن الجدير بالذكر أن الأنبوب الشعري في أنظمة التثليج الصغيرة يعمل كعمل صمام الخنق. ويمكن كتابة معادلة الطاقة للجريان المستقر كما يأتي:

$$h_1 = h_2$$



شكل 3-14 صمام الخنق أو صمام التمدد

أسئلة الفصل الثالث

س1:

أ- اكتب نص القانون الأول لديناميك الحرارة، ثم اكتب صيغة القانون لكل من النظام المغلق والنظام المفتوح.

ب- في نظام مكبس وأسطوانة، إذا تم شوط الانضغاط بثبوت الطاقة الداخلية للمائع، وكانت الحرارة المطرودة من النظام تساوي 50 kJ/kg ، احسب الشغل المبذول على النظام.

س2:

في مكثف، يدخل البخار للمكثف بمحتوى حراري مقداره 2300 kJ/kg وسرعة 350 m/s ويخرج البخار المتكثف بمحتوى حراري مقداره 160 kJ/kg وسرعة مقدارها 70 m/s ، احسب الحرارة المطرودة من المكثف.

س3:

يستخدم الرشاش لزيادة سرعة المائع عند الخروج، فإذا كان المحتوى الحراري لمائع عند دخوله إلى الرشاش يساوي 3025 kJ/kg وسرعة مقدارها 60 m/s ، وكان المحتوى الحراري للمائع عند الخروج يساوي 2790 kJ/kg ، احسب سرعة المائع عند الخروج.

س4:

تمدد هواء كتلته 5 kg بثبوت درجة الحرارة من حجم ابتدائي مقداره $5\ m^3$ إلى حجم نهائي يساوي $10\ m^3$ ، فإذا كان الضغط الابتدائي يساوي 3 bar احسب: درجة حرارة الهواء ، الضغط النهائي.

س5:

خزان مغلق يحتوي على 1 kg من الهواء عند ضغط 12 bar ودرجة حرارة 15°C، احسب:

1. حجم الخزان
2. الضغط النهائي للخزان في حالة امتصاصه حرارة من الشمس لتصبح درجة حرارته (60°C)

س6:

يمر الماء بمبرد سيارة (راديتر) بمعدل 0.3 kg/s وبمحتوى حراري مقداره 650 kJ/kg ويخرج بمحتوى حراري مقداره 360 kJ/kg ، وكانت سرعتا دخول وخروج الماء هي (300 m/s) و(200 m/s) على التوالي، احسب الحرارة المطرودة من المكثف بوحدة (kW).

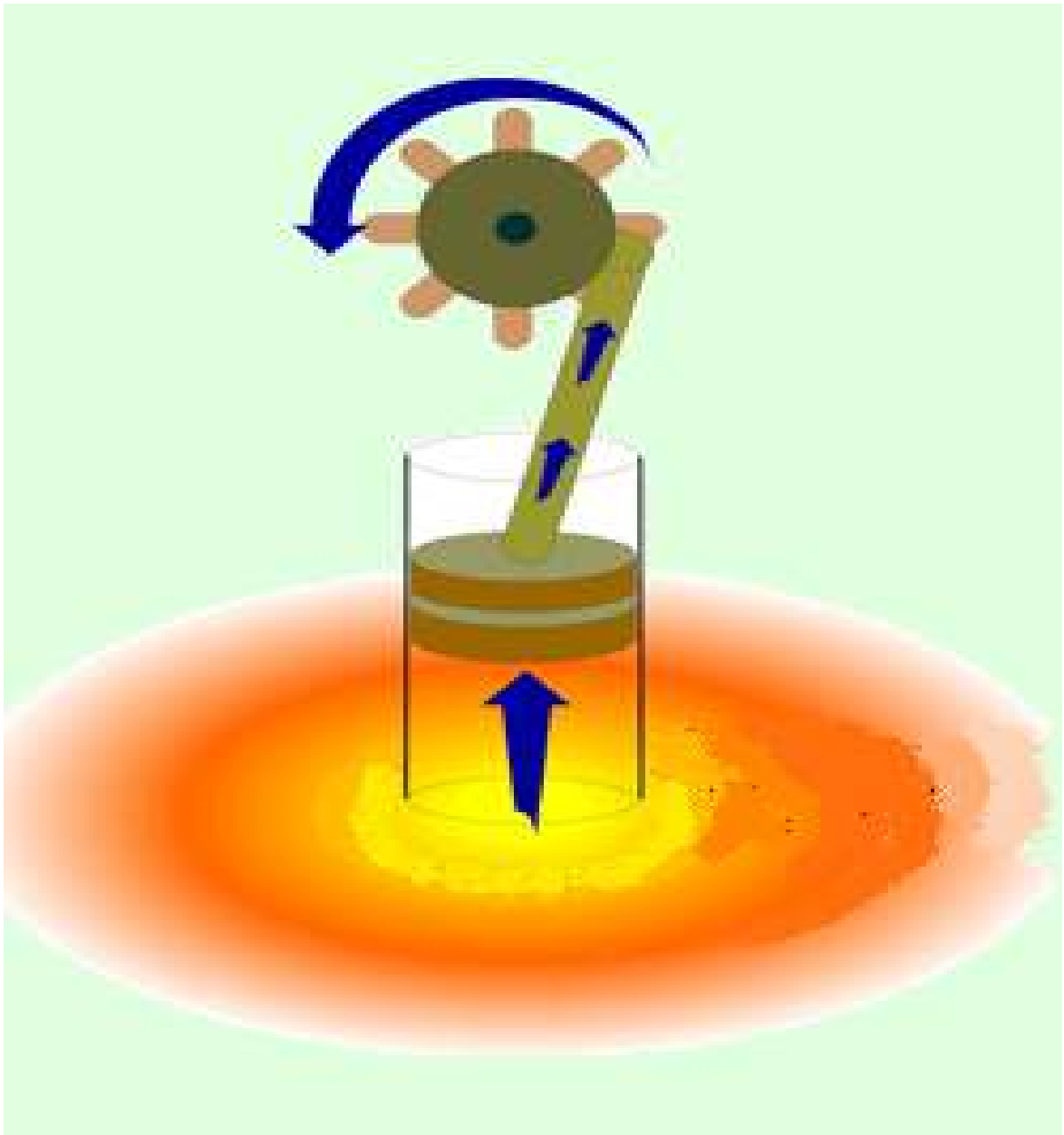
س7:

يتمدد الهواء المضغوط داخل أسطوانة محرك بحيث تتغير الطاقة الداخلية للهواء من 420 kJ/kg إلى 200 kJ/kg وكان الشغل الناتج من الأسطوانة يساوي 100 kJ/kg، احسب الحرارة المنتقلة إلى الأسطوانة في أثناء تمدد الهواء.

الفصل الرابع

القانون الثاني لديناميك الحرارة

Second Law of Thermodynamics



القانون الثاني لديناميك الحرارة Second Law of Thermodynamics

1-4 صيغة القانون الثاني لديناميك الحرارة

Second Law of Thermodynamics Statement

إن القانون الأول لديناميك الحرارة كما لاحظنا، يؤكد حفظ الطاقة ويعتبر أحد قوانين حفظ الطاقة (الطاقة لا تفنى ولا تستحدث) بصورته الشاملة ويحدد اتجاه انتقال الطاقة. فمثلاً إذا تركنا كوباً من الشاي الساخن لفترة زمنية فإن الشاي يَبرد كما في الشكل (4-1 أ)، وكذلك إذا تركنا علبة مشروبات غازية باردة في الهواء فان العلبة سوف تَسخن بعد فترة كما مبين في الشكل (4-1 ب)، وهذا يدل على انتقال الحرارة من المحيط الخارجي إلى علبة المشروبات الغازية، لسبب بسيط هو أن الحرارة تنتقل من المستوى ذي درجات الحرارة العالية إلى المستوى الأدنى من درجات الحرارة ويتم هذا بصورة طبيعية دون الحاجة إلى وسيلة ما إلى نقله، وكذلك الماء في خزان الماء الموجود أعلى البيت، فان الماء ينزل من الخزان إلى حنفيات المياه دون الحاجة إلى مضخة ماء.

شكل 4-1 انتقال الحرارة من المحيط الحار إلى المحيط البارد

ولعلك تتساءل: لماذا لا يحدث الإجراء المعاكس بحيث يكتسب كوب الشاي الحرارة من المحيط ويصبح أكثر سخونة؟ أو لماذا لا تفقد علبة المشروبات الغازية الحرارة إلى المحيط وتصبح أكثر برودة؟ هذا ما سيجيب عنه القانون الثاني لديناميك الحرارة. إن القانون الثاني لديناميك الحرارة يحدد اتجاه انتقال الحرارة والطاقة، وللقانون الثاني لديناميك الحرارة صيغتان:

1-1-4 صيغة (كلفن بلانك) Kelvin-Plank Statement

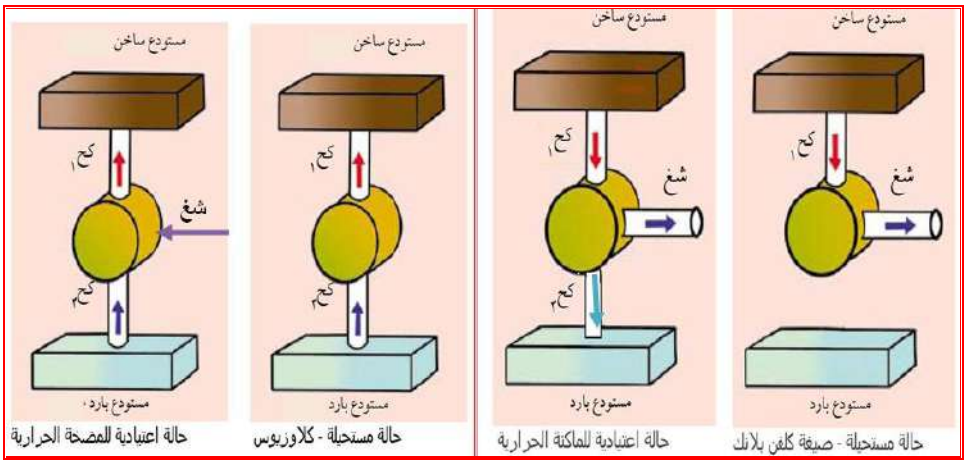
*وتنص: **على أنه من المستحيل بناء ماكينة حرارية تعمل على سحب الحرارة من مستودع ساخن وتحويل جميع الحرارة إلى شغل ميكانيكي.***

أي إنه لكي تنتج الماكينة الحرارية شغلاً يجب أن يكون لها مستودع ساخن وآخر بارد لتعمل على انتقال الحرارة من المستودع الساخن إلى المستودع البارد، وفي أثناء سريان الحرارة يمكن أن ينجز شغل، كما هو موضح في الشكل (4-2).

2-1-4 صيغة (كلاوزيوس) Clausius Statement

وتنص على ما يأتي: ***من المستحيل بناء مضخة حرارية تعمل على امتصاص الحرارة من المستودع البارد وطرحها إلى المستودع الساخن دون بذل شغل ميكانيكي.***

مثال ذلك الثلاجة المنزلية، فان سحب الحرارة من حيز الثلاجة البارد وطرحه عبر المكثف إلى المحيط الخارجي يتم بواسطة إنجاز شغل هو شغل الضاغط. فإذا توقف الضاغط ارتفعت درجة حرارة حيز الثلاجة مرة أخرى، وكما هو مبين في الشكل (4-3).



شكل 4-2 صيغة كلفن- بلانك شكل 4-3 صيغة كلاوزيوس

2-4 دورة كارنو Carnot Cycle

وهي من أشهر الدورات الحرارية والتي وضع أسسها المهندس الفرنسي نيكولا ليونارد سادي كارنو (1796-1832)م. وتتكون دورة كارنو من أربعة إجراءات حرارية عكوسية بدون خسائر (مثالية)، وكما هو مبين في الشكلين (4-4) و (4-5)، وهي كما يأتي:

1- إجراء انضغاط أديباتي ممثل بالإجراء 1-2
2- إجراء إضافة حرارة عند درجة حرارة ثابتة ممثل بالإجراء 2-3
3- إجراء تمدد أديباتي ممثل بالإجراء 3-4
4- إجراء طرح حرارة بثبوت درجة الحرارة ممثل بالإجراء 4-1

ومن خلال الشكل (4-5- ب) نلاحظ تساوي درجتي الحرارة التي يتم فيهما إضافة الحرارة، وهما T_2، T_3 وتسمى درجتا الحرارة أعلاه بدرجة الحرارة العظمى T_{hi}، في حين تسمى درجة الحرارة T_1 ، T_4 والتي يتم فيهما طرح الحرارة بدرجة الحرارة الدنيا T_{low}، وتُعرف درجات الحرارة في دورة كارنو بوحدة كلفن (K).

حسابات دورة كارنو:

من خلال مشاهدتنا للشكل (4-5) نلاحظ أن كمية الحرارة المضافة Q_{add} تساوي كمية الحرارة المطروحة Q_{rej} مضافاً صافي الشغل W_{net}
أي إن:

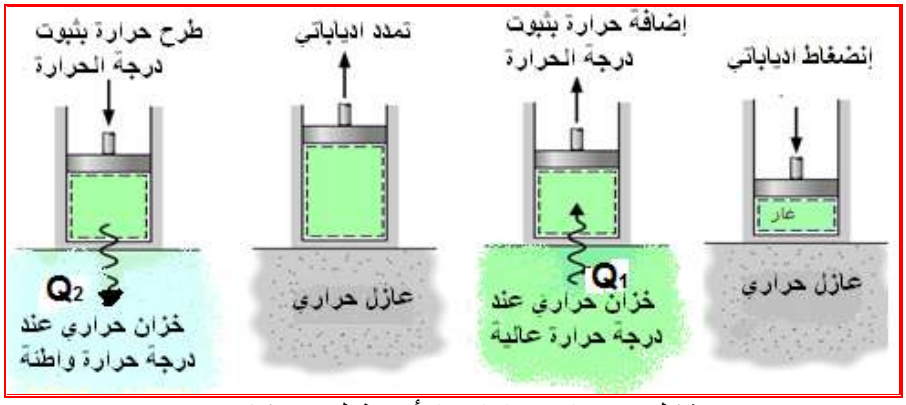
$$Q_{add} = Q_{rej} + \mathcal{W}_{net}$$

أو إن صافي الشغل يحسب كما يأتي:

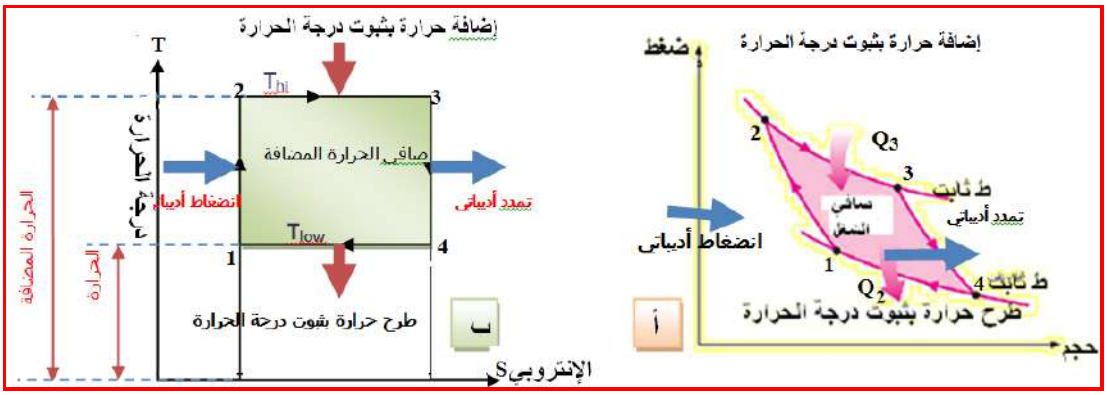
$$\mathcal{W}_{net} = Q_{add} - Q_{rej}$$

تُعرف الكفاءة الحرارية للماكينة الحرارية بأنها النسبة بين صافي الشغل مقسوماً على كمية الحرارة المضافة، وكما يأتي:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{rej}}{Q_{add}}$$



شكل 4-4 الإجراءات الأربعة لدورة كارنو



شكل 4-5 تمثيل دورة كارنو (أ) على منحني(الضغط ـ الحجم)، (ب) (درجة الحرارة- الإنتروبي)

وعلى هذا الأساس تحسب الكفاءة الحرارية من المعادلة الآتية:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{rej}}{Q_{add}}$$

ومن الجدير بالذكر إن الكفاءة الحرارية يمكن أن تحسب اعتماداً على درجتي الحرارة العظمى والدنيا وكما يأتي:

$$\eta = 1 - \frac{T_{low}}{T_{hi}}$$

وعند مساواة معادلتي الكفاءة أعلاه نحصل على المعادلة الآتية التي تربط كمية الحرارة المضافة وكمية الحرارة المطروحة بدرجتي الحرارة العظمى والدنيا:

$$\frac{Q_{rej}}{Q_{add}} = \frac{T_{Low}}{T_{hi}}$$

في حين إن صافي الشغل المنجز والمتمثل بالمساحة (1-2-3-4-1) المبينة في الشكل (4-5) يحسب كما يأتي:

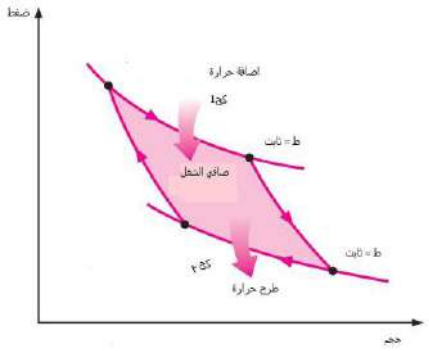
$$W_{net} = (T_{hi} - T_{low}) \ln \frac{T_{hi}}{T_{low}}$$

مثال 1

ماكينة حرارية تعمل على دورة كارنو، تضاف إليها الحرارة بمعدل 3000 kJ، من مصدر حراري عند 727°C، وتطرد كمية من الحرارة إلى المستودع البارد عند درجة حرارة 27°C، اِحسب كمية الحرارة المطرودة، الشغل الناتج عن الماكينة الحرارية، والكفاءة الحرارية للماكينة.

الجواب

من المعطيات أعلاه يمكن كتابة ما يأتي:



$T_{hi} = 727 + 273 = 1000$ K

$T_{low} = 27 + 273 = 300$ K

3000 kJ $= Q_{add}$

من المعادلة الآتية يمكن حساب كمية الحرارة المطروحة:

$$\frac{Q_{rej}}{Q_{add}} = \frac{T_{Low}}{T_{hi}}$$

$$Q_{rej} = \frac{300}{1000} \times 3000 = 900 \text{ kJ}$$

$$\mathcal{W}_{net} = Q_{add} - Q_{rej}$$

$$\mathcal{W}_{net} = 3000 - 900 = 2100 \text{ kJ}$$

تحسب الكفاءة الحرارية بعدة طرائق منها:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{rej}}{Q_{add}} = 1 - \frac{900}{3000} = 0.7$$

أو من المعادلة الآتية:

$$\eta = 1 - \frac{T_{low}}{T_{hi}} = 1 - \frac{300}{1000} = 0.7$$

مثال 2

تعمل ماكينة حرارية على دورة كارنو وتنتج شغلاً صافياً مقداره 100 kW، فإذا كانت درجتا الحرارة العظمى والدنيا 700°C و 50°C على التوالي، اِحسب كفاءة الماكينة الحرارية وكمية الحرارة المضافة والمطروحة من الدورة.

الجواب:

$T_{hi} = 700 + 273 = 973$ K

$T_{low} = 50 + 273 = 323$ K

$W_{net} = 100$ kW

كفاءة الماكينة هي:

$$\eta = 1 - \frac{T_{low}}{T_{hi}} = 1 - \frac{323}{973} = 0.67$$

$$\dot{Q}_{add} = \frac{\mathbf{100}}{\mathbf{0.67}} = 149.3 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{rejected} = \dot{Q}_{add} - \dot{W}_{net} = 149.3 - 100 = 49.3 \text{ kW}$$

3-4 دورة كارنو المعكوسة Reversed Carnot Cycle

عند عكس جميع إجراءات الدورة الحرارية الاعتيادية تتحول إلى دورة كارنو المعكوسة أو ما يطلق عليها دورة تثليج كارنو، وفيها يتم سحب الحرارة من الخزان البارد عند درجة الحرارة الدنيا وطرحها إلى الخزان الساخن عند درجة الحرارة العظمى. وخير مثال على دورة تثليج كارنو الثلاجة المنزلية وأجهزة التبريد الأخرى، وفي أثناء عملية سحب الحرارة وطرحها نحتاج إلى بذل شغل على الدورة الحرارية. ويبين الشكل (4-6) رسم تخطيطي لدورة تثليج كارنو، وفيها يوجد الضاغط الذي يقوم بضغط بخار مائع التثليج من الضغط الواطئ إلى الضغط العالي، في حين أن التوربين يقوم بخفض الضغط من الضغط العالي إلى الضغط الواطئ وتوليد الشغل، أما المبخر والذي يوضع في المكان المراد تبريده فإنه يقوم بسحب الحرارة من المكان البارد ليحولها إلى المكثف والذي يقوم بطرحها إلى المكان الساخن.

ويمكن تلخيص إجراءات دورة تثليج كارنو كما يأتي:

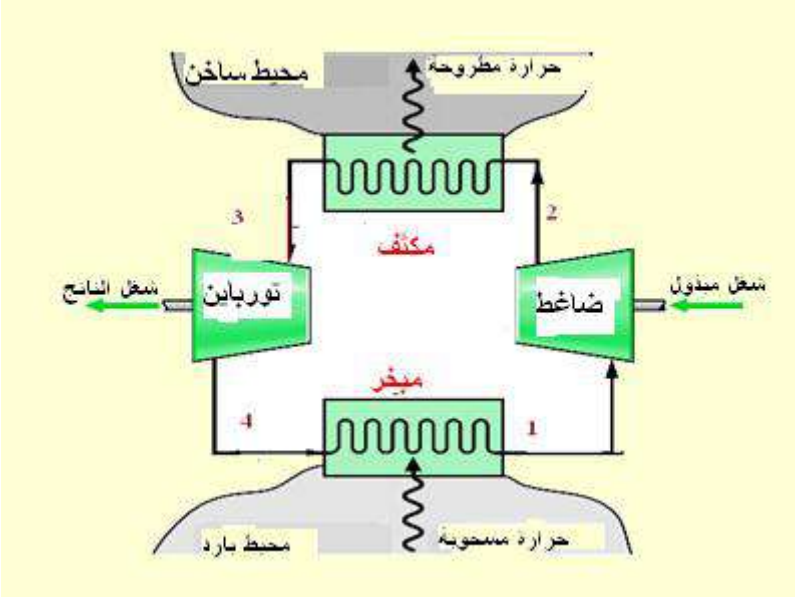
2-1 انضغاط أديباتي لمائع التثليج في الضاغط

3-2 طرح حرارة من المكثف إلى المكان الساخن بثبوت درجة الحرارة

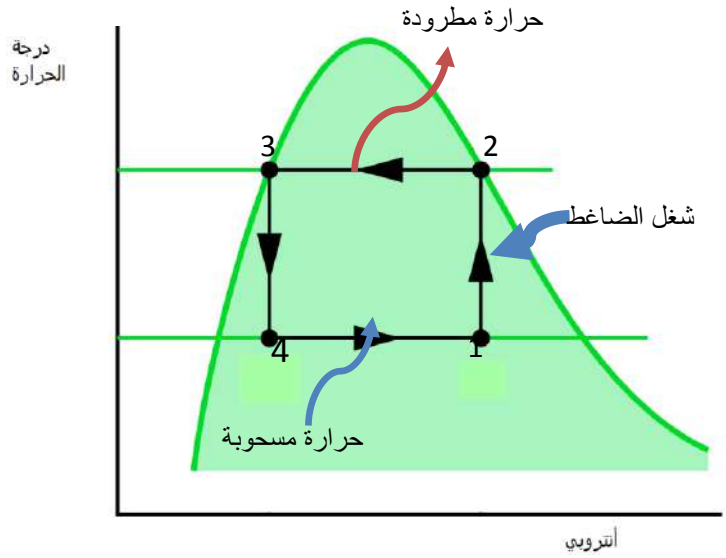
4-3 تمدد أديباتي لمائع التثليج في التوربين

1-4 سحب الحرارة من قبل المبخر من المكان البارد بثبوت درجة الحرارة

ويبين الشكل(4-7) رسم الإجراءات أعلاه على مخطط (درجة الحرارة ـ الإنتروبي).



شكل 4-6 منظومة تثليج تعمل على دورة كارنو المعكوسة



شكل 4-7 تمثيل إجراءات دورة تثليج كارنو على مخطط (درجة الحرارة ـ الإنتروبي)

حسابات ثلاجة كارنو:

تعرف فاعلية (كفاءة) دورة كارنو المعكوسة (ثلاجة كارنو)عن طريق معرفة:

معامل أداء الدورة Coefficient of Performance (COP)، ويساوي النسبة بين حاصل التثليج مقسوماً على الشغل المبذول في الضاغط.

حاصل التثليج: ***وهو مقدار الحرارة المسحوبة من المكان المبرّد من قبل المبخر***، وتساوي كمية الحرارة المسحوبة.

الشغل المبذول على الضاغط: ***وهو مقدار ما يصرف من شغل لرفع ضغط غاز مائع التثليج***.

وكما هو واضح من الشكل (4-7) فإن كمية الحرارة المطروحة تساوي مجموع الشغل المبذول على الضاغط + كمية الحرارة المسحوبة.

أي إن:

$$W = Q_{rej} - Q_{abs}$$

إذاً يكتب معامل الأداء كما يأتي:

$$COP = \frac{T_{low}}{(T_{hi} - T_{low})}$$

ويكون معامل أداء أي دورة أكبر من الواحد دائماً.

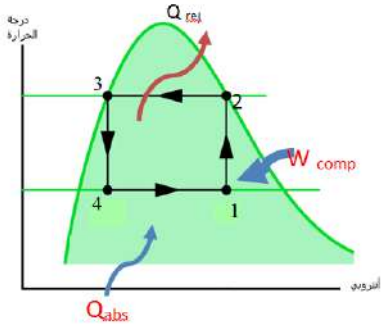
وأيضاً يمكن إعادة كتابة العلاقة بين الحرارة المنتقلة ودرجات الحرارة كما يأتي:

$$\frac{T_{hi}}{T_{low}} = \frac{Q\ rej}{Q\ abs}$$

مثال 3

مكيف هواء يعمل بموجب دورة كارنو المعكوسة ويقوم بتبريد غرفة في الصيف، بحيث يسحب الحرارة من الغرفة بمعدل 20 kW، فإذا كانت درجة حرارة الغرفة تساوي 22°C، ودرجة حرارة المحيط الخارجي تساوي 47°C، اِحسب الشغل المبذول على الضاغط، ومعامل أداء الدورة.

الجواب



من معطيات المثال أعلاه نستنتج ما يأتي:

$Q_{abs} = 20$ kW

$T_{hi} = 47 + 273 = 320$ K

$T_{low} = 22 + 273 = 295$ K

يتم حساب كمية الحرارة المطروحة من الدورة:

$$\frac{T_{hi}}{T_{low}} = \frac{Q\,rej}{Q\,abs}$$

$$Q_{rej} = \frac{320}{295} \times 20 = 21.69 \text{ kW}$$

$$\mathcal{W} = Q_{rej} - Q_{abs}$$

$$= 21.69 - 20 = 1.69 \text{ kW}$$

معامل الإداء:

$$COP = \frac{Q_{abs}}{W}$$

$$COP = \frac{20}{1.69} = 11.8$$

ويمكن أن يحسب معامل الأداء اعتماداً على درجتي الحرارة العظمى والدنيا وكما يأتي:

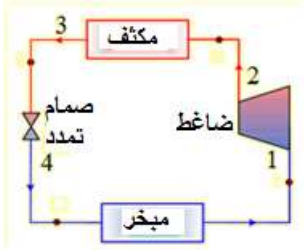
$$COP = \frac{T_{low}}{(T_{hi} - T_{low})}$$

$$COP = \frac{295}{(320 - 295)} = 11.8$$

4-4 تحسين دورة كارنو المعكوسة

Improvement of Reversed Carnot Cycle

أجريت بعض التعديلات على دورة كارنو المعكوسة لتكون ملائمة لمنظومات التبريد ومن أهم هذه التعديلات هي استبدال التوربين الذي يعمل على خفض ضغط مائع التثليج، بمفتاح خنق أو ما يسمى بصمام التمدد، وتسمى دورة كارنو المعكوسة بعد التعديلات، بدورة انضغاط البخار، أو دورة التثليج الانضغاطية، وكما هو مبين في الشكل (4-8).



شكل 4-8 دورة كارنو بعد إبدال التوربين بصمام تمدد

ويحسب معامل أداء دورة كارنو المعكوسة بعد التعديل كما في السابق، وسيتم التطرق إلى الحسابات الخاصة بدورة التثليج الانضغاطية في الفصول اللاحقة.

5-4 الموائع وأنواع الجريان Fluids and Types of Flow

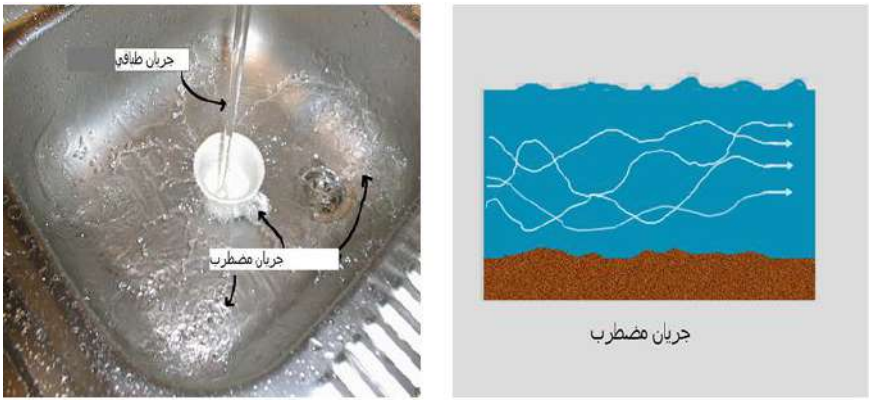
تطلق كلمة المائع على كل مادة ليس لها حجم أو شكل ثابت أو الاثنين معاً نتيجة تعرضها إلى قوى قص خارجية، مثل الماء والهواء وغيرها. لذا تستعمل كلمة المائع للدلالة على السوائل والغازات.

ويعرف جريان المائع بحركة المائع، وللمائع نوعان من الجريان، وكما يأتي:

أ- **الجريان الطباقي Laminar Flow**: وفيه تتحرك جزيئات المائع بصورة منتظمة وتحتفظ بمواقعها النسبية في مختلف المقاطع في أثناء حركتها، ويكون انسياب المائع طباقياً في السرعات القليلة، وكما موضح في الشكل (4-9).

ب- **الجريان المضطرب Turbulent Flow**: وفيه تتحرك جزيئات المائع بصورة عشوائية وغير منتظمة، وتتكون تيارات دوامية، ولا تحتفظ جزيئات المائع بمواقعها النسبية، ويحدث الجريان المضطرب عادة في السرعات العالية للموائع، وكما هو مبين في الشكل (4-10).

شكل 4-9 الجريان الطباقي للموائع



شكل 4-10 الجريان المضطرب للموائع

1-5-4 التدفق الحجمي للمائع Volumetric Flow Rate of Fluid ($\dot{V}$)

عند جريان المائع في أنبوب معين أو في مجرى للغازات، فان حجم المائع الذي يمر عبر مساحة المقطع للأنبوب أو المجرى في وحدة الزمن يسمى معدل الجريان الحجمي للمائع ويقاس بوحدات اللتر في الثانية أو المتر المكعب في الثانية. ويحسب من المعادلة الآتية:

$$\dot{V} = A \times v$$

إذ إن:

$\dot{V}$	معدل التدفق الحجمي	m^3/s
A	مساحة مقطع الأنبوب أو المجرى	m^2
v	سرعة المائع	m/s

2-5-4 التدفق الكتلي للمائع Mass Flow Rate of Fluid $\dot{m}$

ويعبر عنه بوحدات (kg/s)، ويحسب عن طريق ضرب التدفق الحجمي للمائع في كثافة المائع، ويحسب من المعادلة الآتية:

$$\dot{m} = \dot{V} \times \rho$$

إذ إن:

$\dot{m}$	معدل التدفق الكتلي	kg/s
ρ	كثافة المائع	kg/m^3

مثال 4

يجري ماء في أنبوب قطره 4 cm. بسرعة مقدارها 0.6 m/s ، إحسب معدل التدفق الحجمي والتدفق الكتلي للماء، علماً أن كثافة الماء تساوي $1000\ kg/m^3$.

الجواب

يحسب معدل التدفق الحجمي من المعادلة الآتية:

$$\dot{V} = A \times v$$

$$A = r^2 \times \pi$$

$$r = 4 / (2 \times 100) = 2 \times 10^{-2}\ m$$

$$A = (2 \times 10^{-2})^2 \times 3.14 = 1.25 \times 10^{-3}\ m^2$$

$$\dot{V} = 1.25 \times 10^{-3} \times 0.6 = 7.6 \times 10^{-4}\ m^3/s$$

$$\dot{m} = \dot{V} \times \rho$$

$$\dot{m} = 7.6 \times 10^{-4} \times 1000 = 0.76\ kg/s$$

6-4 معادلة برنولي Bernoulli Equation

إن معادلة برنولي ناتجة عن تطبيق مبدأ حفظ الطاقة على مائع مثالي، من خلال أنبوب تدفق ضمن نظام مفتوح. وتنص معادلة برنولي على أن ***مجموع الطاقة الكامنة والطاقة الحركية وطاقة الجريان لأي جزيئة من مائع ما يجري في مسار معين يظل ثابتاً عند أي مقطع على طول ذلك المسار، إذا لم يكن هنالك فقد أو اكتساب للطاقة من محيط المسار***:

أي أن:

$$PE + FE + KE = const.$$

ويمكن كتابة معادلة برنولي بين نقطتين كما يأتي:

$$(PE + FE + KE)_1 = (PE + FE + KE)_2$$

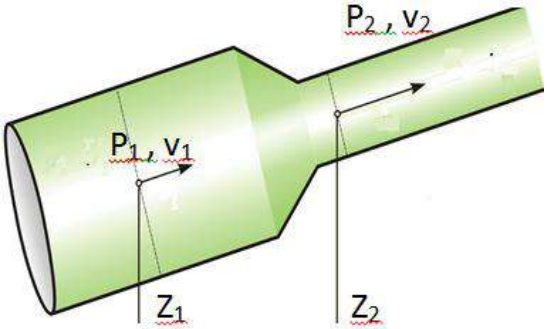
ويمكن إعادة كتابة معادلة برنولي بعد التعويض وإعادة ترتيب حدودها كما يأتي:

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + g \times z_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + g \times z_2$$

وعادة ما تكتب معادلة برنولي بالصيغة الآتية، وكما موضح في الشكل (4-11)

$$P_1 + \rho \times \frac{V_1^2}{2} + \rho \times g \times z_1 = P_2 + \rho \times \frac{V_2^2}{2} + \rho \times g \times z_2$$

P_1, P_2	ضغط الدخول والخروج على التوالي	(Pa)
ρ	كثافة المائع	(kg/m^3)
v_1, v_2	سرعة المائع عند الدخول والخروج	(m/s)
g	التعجيل الأرضي	(m/s^2)
z_1, z_2	ارتفاع فتحتي الدخول والخروج عن مستوى إسناد	(m)



شكل 4-11 تطبيق معادلة برنولي على جريان المائع في أنبوب مائل

مثال 5

يدخل الماء في سخان لإنتاج الماء الساخن لمنظومة تكييف مركزي بسرعة مقدارها 1.5 m/s ويخرج بسرعة مقدارها 9 m/s ، فإذا كان أنبوب الخروج أعلى من أنبوب الدخول بمقدار 5 m، جد ضغط الماء الساخن عند الخروج إذا علمت أن ضغط دخوله يساوي 2 bar ، ومعدل كثافة الماء بين الدخول والخروج تساوي $990\ kg/m^3$

الجواب

نطبق معادلة برنولي بين نقطة الدخول ولتكن 1 و نقطة الخروج ولتكن 2.

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho \times (v_1{}^2 - v_2{}^2) + \rho \times g \times (z_1 - z_2)$$

بما أن فتحة الخروج أعلى من فتحة الدخول إذاً $(z_1 - z_2) = -5\ m$

$$P_2 = 2 \times 100 \times 1000 + 0.5 \times 990 \times (1.5^2 - 9^2) + 990 \times 9.81 \times (-5)$$

$$P_2 = 200000 - 38981.25 - 48559.5 = 112500\ Pa = 112.5\ kPa$$

$$P_2 = 112.5 \div 100 = 1.125\ bar$$

7-4 قياس تدفق الموائع الحجمي Volumetric Fluid Flow Measurement

من أهم التطبيقات على معادلة برنولي هي طرائق قياس معدل التدفق الحجمي للموائع وهنالك عدة أجهزة مستخدمة في هذا المجال منها:

أ- أنبوبة بيتوت Pitot Tube

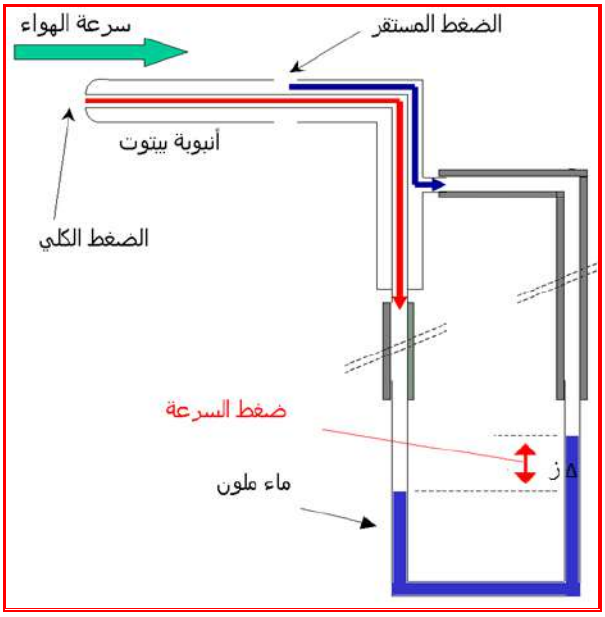
سميت هذه الأنبوبة على اسم العالم الذي اكتشفها، وتتكون أنبوبة بيتوت كما في الشكل (4-12) من أنبوب قائم الزاوية مصنوع من الفولاذ المقاوم للصدأ، يتراوح قطرها من 2 إلى 5 ملم، وفي بعض التطبيقات الخاصة يكون قطرها أكبر من 5 ملم. وتتكون أنبوبة بيتوت من أنبوبين متداخلين، الأنبوب الداخلي يحتوي على ثقب واحد في بدايته، يقوم بقياس الضغط الكلي (الضغط الناتج عن الضغط المستقر وضغط السرعة)، أما الأنبوب الآخر المحيط بالأنبوب الداخلي فيحتوي على أربعة ثقوب موزعة بمسافات متساوية على محيط الأنبوب، وفائدة الثقوب الأربعة هي قياس ضغط احتواء المائع داخل مجرى المائع، ويسمى هذا الضغط بالضغط المستقر، والفرق بين الضغط الكلي والضغط المستقر يسمى بالضغط الحركي، والذي يمكن من خلاله معرفة الضغط الذي تسببه سرعة المائع.

أي أن:

$$P_{total} = P_{vel} + P_{stg}$$

شكل 4-12 أنبوبة بيتوت

وتربط أنبوبة بيتوت إلى مانوميتر لقياس فرق الضغط الحركي عن طريق الفرق بين الضغط الكلي والضغط المستقر وكما هو مبين في الشكل (4-13).



الشكل 4-13 ربط أنبوبة بيتوت بالمانوميتر

وبتطبيق المعادلة الآتية يمكن معرفة معدل سرعة المائع داخل مجرى المائع.

$$v = \sqrt{2 \times g \times \Delta z}$$

إذ إن:

v	سرعة المائع داخل المجرى	m/s
Δz	ارتفاع عمود السائل في المانومتر الناتج عن الفرق بين الضغط الكلي والضغط المستقر	m
g	التعجيل الأرضي	m/s^2

ويمكن حساب معدل التدفق الحجمي بعد قياس معدل السرعة من المعادلة الآتية التي ورد ذكرها سابقاً:

$$\dot{V} = A \times v$$

ب- مقياس معدل التدفق الحجمي (الروتَميتر) Rotameter

يقاس المعدل الحجمي لجريان الموائع مباشرة باستخدام مقياس التدفق الحجمي (الروتميتر) الموضح في الشكل (4-14)، ويتكون من أنبوب زجاجي مُدَرج في داخله كرة معدنية أو قطعة من المعدن مخروطية الشكل. يقوم المائع برفع الكرة أو المخروط عند مروره بالأنبوبة الزجاجية، ويتناسب ارتفاع الكرة أو المخروط طردياً مع زيادة معدل التدفق، وتقاس بوحدات (cm^3/min) أو (ml/min).

شكل 4-14 أشكال مختلفة من مقياس معدل التدفق الحجمي (روتَميتر)

ج- مقياس سرعة الغازات (الانيموميتر) Anemometer

يتكون مقياس سرعة الغازات كما هو موضح في الشكل (4-15) من مروحة صغيرة مربوطة مع جهاز رقمي بواسطة سلك، توضع المروحة في مجرى الهواء وتبدأ بالدوران بفعل مرور الغازات ويمكن قراءة معدل سرعة الغاز عن طريق الجهاز الرقمي الذي يعطي القراءات بوحدات (m/s) أو (km/h).

شكل 4-15 جهاز قياس سرعة الغازات (الانيموميتر)

أسئلة الفصل الرابع

س1: ماكينة حرارية تعمل بين مستودعين للحرارة، فإذا كانت درجة حرارة المستودع الساخن تساوي (540°C) والمستودع البارد تساوي (37°C)، جد أقصى كفاءة للماكينة.

س2: ماكينة حرارية تنتج شغلا ميكانيكيا مقداره 2250 J، وتطرح كمية حرارة مقدارها 250 J، احسب كفاءة هذه الماكينة.

س3: مكيف يعمل على وفق دورة كارنو المعكوسة، ويطرح حرارة من الغرفة مقدارها 24 kJ إلى الخارج الذي تبلغ درجة حرارته 47°C، ويستهلك شغلاً مقداره 8 kJ، احسب درجة حرارة الغرفة، ومعامل أداء المكيف.

س4: أدعت شركة أنها طورت براد يعمل على حفظ درجة حرارة مخزن مجمد عند (-33°C)، بينما درجة حرارة المحيط الخارجي (27°C) وأن معامل الأداء حسب قول الشركة هو 5.5 قَيِّم ادعاء هذه الشركة.

س5: هل يمكن تبريد غرفة بوضع ثلاجة بداخلها وترك باب الثلاجة مفتوحاً، علل إجابتك.

س6: يتم سحب الحرارة من الغرفة من قبل المبخر بمقدار 144 kJ وتطرح من المكثف بمعدل 175 kJ احسب معامل أداء الدورة.

س7: ماكينة حرارية تعمل بين درجتي حرارة مقدارها 200°C و 20°C، فإذا كان المطلوب من هذه الماكينة أن تنتج شغلاً مقداره 15 kW، احسب كمية الحرارة المضافة والمطروحة من الدورة.

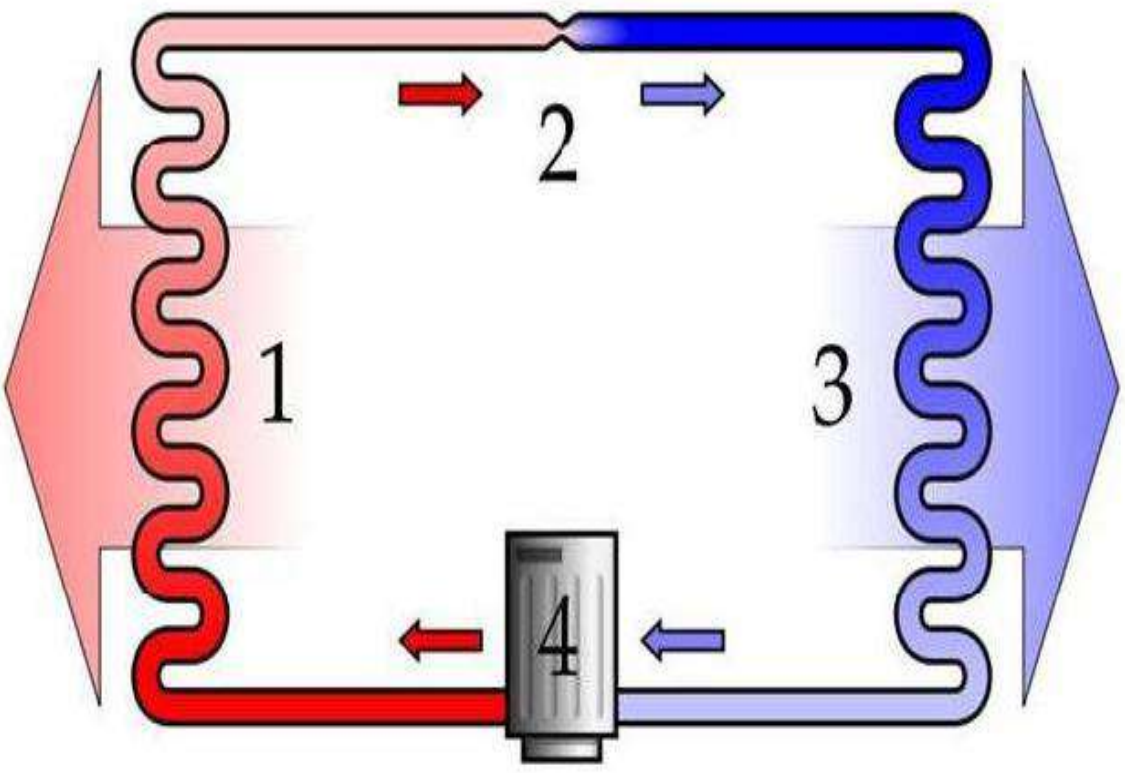
س8: هواء عند ضغط 1.5 bar وكثافة ثابتة مقدارها $1.2\ kg/m^3$، وسرعة 40 m/s، يجري داخل مجرى هوائي أفقي مقطعه مستطيل الشكل. فإذا كان الضغط عند مخرج المجرى يساوي 1.3 bar، جِد سرعة خروج الهواء من المجرى. وإذا علمت أن مساحة الخروج تساوي $0.06\ m^2$، اِحسب معدل التدفق الحجمي للهواء.

س9: يجري هواء في مجرى هواء أفقي مربع المقطع أبعاده m (0.15 × 0.15) وبضغط مقداره 3 bar، ودرجة حرارة مقدارها 37°C، وبسرعة دخول مقدارها 4 m/s، اِحسب معدل التدفق الكتلي للهواء.

الفصل الخامس

موائع التثليج

Refrigerants



موائع التثليج Refrigerants

1-5 مقدمة Introduction

مائع التثليج هو المادة العاملة (سائل أو غاز) في دورة التثليج لنقل الحرارة من مكان يراد تبريده (المبخر) إلى مكان آخر يتم فيه التخلص من الحرارة (المكثف). إن الحرارة المنقولة تكون على شكل حرارة كامنة وتعتمد علـــى قابلية المائع للتحول من الحالة السائلة إلـــــى الحالة البخارية داخل المبخر (عند امتصاص حرارة التبخر من الحيز المراد تبريده) وبالعكس أي قابلية المائع للتحول من الحالة البخارية إلى الحالة السائلة داخل المكثف (عند طرح حرارة التكثيف). ولكي يكون المائع مناسباً للاستعمال في دورة انضغاط البخار يجب أن يكون ذا خواص طبيعية وكيميائية وحرارية مناسبة تجعل استخدامه اقتصادياً ومأمونا ضمن الظروف التي يستخدم فيها.

وتقسم موائع التثليج إلى نوعين رئيسين هما: موائع التثليج المباشرة (وهي الوسائط العاملة داخل دورة التثليج، وتقوم بنقل الحرارة من المبخر إلى المكثف) وتسمى أحياناً موائع التثليج الأساسية. إن هذه الموائع تتغير حالتها (طورها) عند اكتسابها أو فقدانها للحرارة. أما النوع الثاني فهي موائع التثليج غير المباشرة أو ما تسمى بالموائع الثانوية والتي تستخدم لنقل الطاقة الحرارية من المكان المطلوب تبريده إلى المبخر في منظومة التثليج دون التغير بالطور عند اكتساب أو فقدان الحرارة وهي مشابهة للمواد مانعة التجمد في السيارات مثل غليكول الأثيلين.

2-5 مجاميع موائع التثليج Refrigerant Groups

نظراً للاستعمالات وظروف التشغيل المختلفة لأجهزة التثليج، هنالك مجاميع مختلفة من موائع التثليج، ولا تصلح جميعها لاستخدام واحد، وإنما لكل تطبيق هنالك مائع تثليج مناسب له، وعليه من الضروري معرفة الأنواع المختلفة من الموائع ومنها:

1- الهالوكاربونات Halocarbons

وهي عبارة عن هايدروكاربونات مهلجنه، متكونة من خلال إحلال ذرة واحدة أو أكثر من ذرات الهيدروجين (H) الموجودة في جزيئات الهايدروكاربونات النقية (الميثان، الإيثان، البروبان) بذرات من الهالوجينات (الكلور أو الفلور أو البروم). لهذا فان الموائع التي تحتوي في تركيبها الكيميائي على ذرة واحدة من الكاربون يكون أصل تركيبها ميثان، وإذا وجدت ذرتان من الكاربون فان الإيثان هو أصل التركيب، وثلاث ذرات تدل على البروبان للتركيب الأصلي. والجدول (5-1) يوضح بعضاً من هذه الموائع.

2- الهايدروكاربونات Hydrocarbons

وهي موائع تتكون بنسب مختلفة من عنصري الهيدروجين والكاربون. ومنها الميثان، الإيثان، البروبان، البيوتان، والآيزوبيوتان.

3- الموائع اللاعضوية Inorganic Fluids

استخدمت بعض المركبات اللاعضوية كموائع تثليج قبل استخدام الهالوكاربونات. ولا يزال بعضها يستخدم في الوقت الحاضر لخواصها الحرارية والفيزيائية الجيدة، ومنها الأمونيا، الماء، الهواء، ثاني أوكسيد الكاربون وغيرها.

4- الموائع الأزيوتروبيه Azeotropic Fluids

هي عبارة عن مزيج ثابت الغليان، والتكثف ناتج عن مزج مائعين من الهالوكاربونات بنسب محددة لإنتاج موائع جديدة. لا يمكن أن تتجزأ إلى مكوناتها الأصلية بتغير درجات الحرارة أو الضغوط. وتكون ذات خواص مختلفة عن المائعين المستخدمين لإنتاجه، ومنـها المائع رقم **R-501** الناتج من مزج المائعين (**R-12** 25% مع **R-22** 75%) وغيرها.

5- الموائع العضوية غير المشبعة Unsaturated Organic Fluids

هذه المجموعة أساسها هايدروكاربونات تعتمد في تركيبها على الأثيلين C_2H_4 والبروبلين C_3H_6، ومنها **R-1113** ($CClF = CF_2$).

الجدول 5-1 بعض موائع التثليج الهالوكاربونية

اسم السلسلة	رقم المائع	التركيب الكيميائي	اسم السلسلة	رقم المائع	التركيب الكيميائي
الميثان CH_4	11	$CCl_3 F$	الايثان C_2H_6	111	$CCl_3 CCl_2 F$
	12	$CCl_2 F_2$		116	$CF_3 CF_3$
	13	$CClF_3$		123	$CHCl_2 CF_3$
	22	$CHClF_2$	البروبان $C_3 H_8$	218	$C_3 F_8$

3-5 خواص موائع التثليج Refrigerant Properties

تقسم خواص موائع التثليج إلى ثلاث مجاميع أساسية هي الخواص الحرارية والفيزيائية وخواص الأمان. وبشكل عام فإن المواد المستخدمة كموائع للتثليج يجب أن تتوفر فيها الخواص الآتية:

1. يجب أن تكون غير سامة، غير قابلة للاشتعال والانفجار، غير قابلة لتسبب التآكل، غير ضارة لجسم الإنسان عند التلامس وغير ضارة للبيئة.
2. يجب أن تكون مستقرة كيميائيا في حالتيها السائلة والغازية، سهلة الاكتشاف والتحديد عند تسربها.
3. يجب أن تكون لمائع التثليج درجة غليان مناسبة عند ضغوط التشغيل.
4. يجب أن تكون نسبة حجم المائع السائل إلى كتلته (الحجم النوعي) عالية ونسبة حجم المائع المتبخر إلى كتلته قليلة لزيادة كفاءة دورة التثليج.

5. يجب أن تكون الحرارة الكامنة للتبخر للمائع عالية وذلك للحصول على أكبر قدر ممكن من التثليج لكل كيلوغرام من السائل عند تحوله إلى بخار.
6. يجب أن تكون نسبة الانضغاط (نسبة ضغط التكثيف إلى ضغط التبخير) قليلة لزيادة كفاءة الضاغط وأن يكون ضغط التكثيف منخفضا عند الظروف الجوية الاعتيادية للحصول على كفاءة تبريد عالية.
7. يفضل أن يكون الضغط داخل أجزاء منظومة التثليج أعلى بقليل من الضغط الجوي لتفادي دخول الهواء إلى داخل المنظومة في حالة حدوث تسرب.
8. يجب أن يمتزج المائع مع زيت التزييت للضاغط بشكل جيد وذلك للمحافظة على خواص الزيت وضمان إرجاعه للضاغط.
9. يجب أن يكون مائع التثليج خالياً من الرطوبة وذلك للمحافظة على أجزاء المنظومة من التلف نتيجة تجمد الرطوبة، وكذلك لمنع تحلل الزيت عند اختلاطه بالرطوبة.

4-5 ترقيم موائع التثليج Refrigerant Numbering

للتمييز بين موائع التثليج المختلفة فقد اعتمدت أرقاما محددة للتمييز بينها عند التعامل معها. إذ يعرف مائع التثليج الأولي بحرف (**R**) متبوعاً بثلاثة أعداد طبقا للتسمية التي اعتمدتها الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتثليج والتكييف (ASHRAE).

إن ترقيم موائع التثليج الهالوكاربونية والهايدروكاربونية تعتمد الصيغة الآتية:

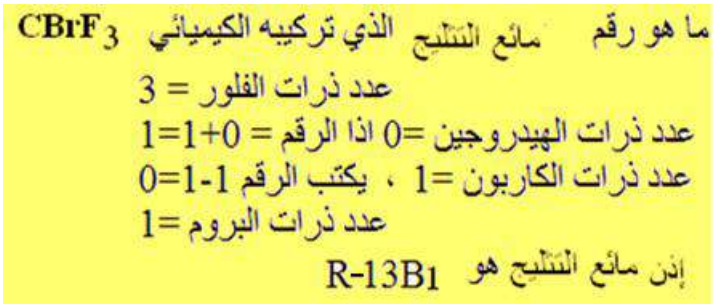
1. الرقم الأول من اليمين يمثل عدد ذرات الفلور (F) في التركيب الكيميائي للمائع.
2. الرقم الثاني من اليسار يمثل عدد ذرات الهيدروجين (H) زائداً (**1**) في التركيب الكيميائي.
3. الرقم الأول من اليسار يمثل عدد ذرات الكاربون (C) في التركيب الكيميائي مطروحا منه (**1**).
4. لا يعطى ترقيم لذرات الكلور (Cl) في التركيب الكيميائي وتشكل ذرات الكلور باقي عدد ذرات الهيدروجين المستبدلة.
5. في حالة وجود ذرات بروم (Br) في التركيب الكيميائي يكتب الحرف B وبجانبه عدد الذرات.
6. الموائع التي تتشابه بالصيغة الكيميائية وتختلف بالتركيب الجزيئي تُميز بكتابة الأحرف a، b ... الخ. بجانب رقم المائع. مثال على ذلك المائع (**R-114**)، والمائع (**R-114a**) إذ الصيغة الكيميائية للمائعين هي ($C_2Cl_2F_4$)، أما التركيب الجزيئي فهما ($CClF_2CClF_2$)، (CCl_2FCF_3) على التوالي.

مثال 1

مثال 2

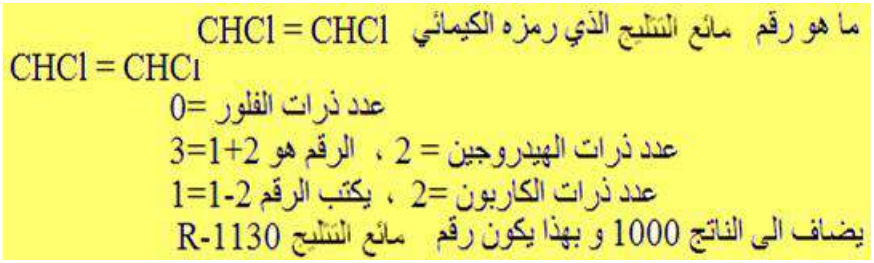
مثال 3

مثال 4



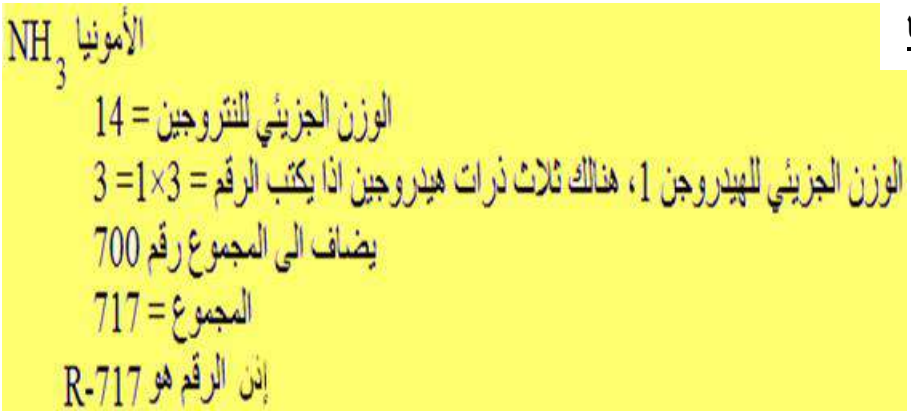
وبالطريقة نفسها ترقم موائع التثليج الهايدروكاربونية التي تحتوي على ذرات هيدروجين وكربون فقط، وكذلك الموائع العضوية غير المشبعة على أن يضاف الرقم 1000 إلى رقم المائع كما هو في المثال الآتي:

مثال 5



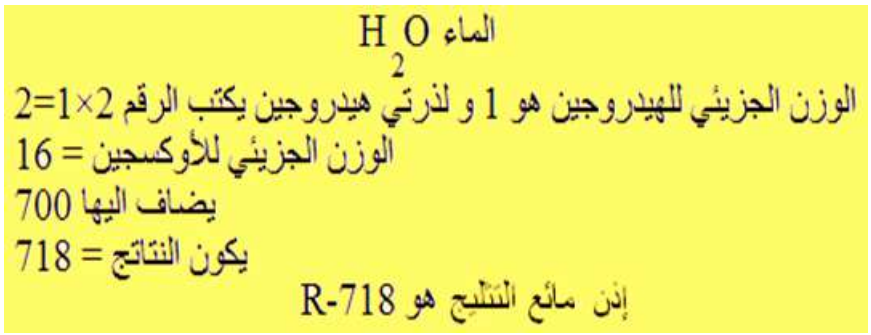
أما موائع التثليج غير العضوية فإنها تُميز من خلال اعتماد الرقم 700 مضافاً إليه الوزن الجزيئي للمركب، وبهذا يكون الرقم (الوزن الجزيئي +700)R، مثال ذلك:

الأمونيا



ثاني أوكسيد الكاربون

الماء



تحفظ موائع التثليج في أسطوانات تُميز حسب الألوان المتفق عليها عالمياً، ويبين الجدول (5-2) بعض موائع التثليج المستعملة ولون الاسطوانة التي يحفظ فيها ذلك المائع.

جدول (5-2) ألوان وأشكال أسطوانات بعض موائع التثليج

5-5 تأثير موائع التثليج على طبقة الأوزون

Effect of Refrigerants on Ozone Layer

تحيط طبقة الأوزون بالكرة الأرضية وهي تحمي الأرض من تسرب الأشعة فوق البنفسجية، لأن تسرب كمية كبيرة من هذه الأشعة إلى الأرض يسبب ما يأتي:

1. التأثير على الجلد مما يسبب سرطان الجلد.
2. إعتام عدسة عين الإنسان.
3. ضعف نظام المناعة عند الكائنات الحية.
4. التقليل من إنتاجية المحاصيل الزراعية.
5. التأثير على الكائنات البحرية.

وقد تبين أن السبب الرئيسي بتعجيل تناقص طبقة الأوزون في الفترة الأخيرة هو وجود المركبات الكلوروفلوروكاربونية المستخدمة كموائع تثليج. أن الأشعة فوق البنفسجية تحلل هذه المركبات إلى ذرات الفلور والكلور والكاربون. يقوم عنصر الكلور بتحطيم طبقة الأوزون مسبباً زيادة تسرب الأشعة فوق البنفسجية إلى الأرض. ويسمى تأثير موائع التثليج على طبقة الأوزون:

Ozone Depletion Potential (ODP) ***جهد تناقص الأوزون***

وتسمى زيادة درجة حرارة الكرة الأرضية نتيجة لتأثير موائع التثليج:

Global Warming Potential ***جهد الاحترار العالمي***

وللحد من هذه التأثيرات عقدت اتفاقية عالمية لحماية طبقة الأوزون هي اتفاقية فينا وبروتوكول مونتريال. وتنص الاتفاقية على التخلص التدريجي (خطة إزالة) من تصنيع المركبات الكلوروفلوروكاربونية كموائع تثليج وكما يأتي:

1. التخلص من تصنيع موائع التثليج R-12 ، R-11 في الفترة الزمنية (1987 – 2010).
2. يتم التخلص من موائع التثليج الأخرى في الفترة (2015-2020) وخاصة R-22.
3. استثنت الاتفاقية الدول النامية في الفترة الابتدائية حتى عام 2005.
4. يتم تصنيع موائع تثليج صديقة لطبقة الأوزون مثل R-134a وسلسلة R-400، R-600
5. إعادة استخدام موائع التثليج الممنوعة مرة أخرى بعد تحويرها إلى مائع صديق للبيئة ولطبقة الأوزون فضلاً على تنقيتها.
6. الأخذ بعين الاعتبار موضوع **الاحترار العالمي** عند إنتاج موائع تثليج حديثة، لأنه تبين أن هنالك موائع تثليج لاتؤثر على طبقة الأوزون ولكن تؤثر سلبياً من جانب الاحترار العالمي مثل R134a.

6-5 موائع التثليج البديلة New Generation Refrigerants

لقد تم إنتاج بدائل لموائع التثليج بخواص لا تؤثر على البيئة، لاستخدامها في مختلف مجالات التثليج وتكييف الهواء بدلاً من الموائع القديمة، وكما هو موضح بالجدول (5-3) مع استخداماتها. لكن بعض الموائع البديلة أخذت تؤثر على البيئة نتيجة تسببها بحدوث ظاهرة **البيت الزجاجي Green House Effect**، التي تؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الأرض نتيجة الاحترار العالمي الناتج من زيادة تركيز بعض الغازات في الغلاف الجوي، والتي بدورها تمنع أو تعرقل خروج الحرارة الزائدة من الأرض إلى الفضاء. ونتيجة لذلك تظهر على الأرض الآثار السلبية مثل التصحر، الفيضانات، ظاهرة (تسونامي) وغيرها. لهذا فإن بعض بلدان العالم أخذت تفكر في التخلص من هذه الموائع من خلال تكنولوجيا متطورة وبموائع تثليج حديثة ومنها:

1. الهيدروكربونات HCs لتميزها بخصائص تبريدية وقلة تأثيرها السلبي على البيئة ولكن من مساوئها قابليتها على الاشتعال، مما يتطلب استخدام وسائل أمان متطورة لتحقيق السلامة بدرجة عالية.
2. الأمونيا NH_3 (R-717) الذي يمتاز بخصائص حرارية جيدة وعدم تأثيره على طبقة الأوزون وليس له تأثير في الاحترار العالمي، إلا أنه سام وقابل للاشتعال في ظروف محددة ولا ينصح باستخدامه مع الأنابيب النحاسية بسبب تآكل تلك الأنابيب نتيجة تماسها مع الأمونيا.
3. ثاني أوكسيد الكاربون CO_2 (R-744) ويمتاز بخصائص عدم التأثير السلبي على طبقة الأوزون وعلى ظاهرة الاحترار العالمي، أما جانبه السلبي فهو تدني (الكفاءة الحرارية) بسبب انخفاض درجة حرارته الحرجة (31.3°C)، ولكن يمكن التغلب على ذلك باستخدام مبادل حراري كفوء.
4. الهواء R-729 الذي يمكن استخدامه في دورات التثليج غير التقليدية، إلا أن كفاءته الحرارية منخفضة جداً.
5. الماء R-718 ويُعد من الموائع المثلى للاستعمال في درجات الحرارة العالية (أعلى من درجة الصفر السيليزي)، إلا أن كبر الحجم النوعي لحالته البخارية يتطلب ضواغط كبيرة الحجم. يستخدم الماء في نظم التثليج الامتصاصية مع بروميد الليثيوم.

الجدول 5-3 بعض موائع التثليج البديلة

مائع التثليج الجديد ومكوناته	بديلاً عن	الملاحظات
R-134a	R-12	يستعمل لمثلجات الماء والضواغط
R-407C (R-32 + R-125 + R134a)	R-22	يستعمل في المنظومات المجمعة (المثلجات) الوحدات المنفصلة
R-410A (R-32 + R-125)	للوحدات المجمعة فقط	اقتصادي في حجم الوحدة والضاغط
R-413A (R-218 + R-134a + R-600a)	R-12	يعمل مع المنظومات الحالية
R-417A (R134a + R-600a)	R-22	يعمل مع النظام الموجود حالياً

7-5 المحاليل الملحية Brines

يستخدم الماء ***كوسيط تبريد ثانوي Secondary Refrigerant*** في أنظمة التكييف المركزية على نطاق واسع وذلك لارتفاع حرارته النوعية وامتلاكه خواص انسيابية جيدة ورخص ثمنه. إلا أنه يستخدم لدرجات حرارة أكبر من (5°C) وذلك لتحاشي عملية الأنجماد. أما في التطبيقات التي تتطلب درجات حرارة أقل من (صفر درجة سيليزية) فتستخدم المحاليل الملحية ***ومانعات الانجماد Antifreeze*** ، لأنها تمتاز بدرجة انجماد أقل من درجة انجماد الماء.

يتكون المحلول الملحي من إذابة ملح في الماء، وتتوقف درجة حرارة انجماده على نوع الملح المذاب ومقدار تركيزه، يستخدم المحلول لنقل الطاقة الحرارية دون تغير في طوره السائل، والأملاح شائعة الاستخدام هي:

- كلوريد الكالسيوم $CaCl_2$ ويستخدم لدرجات حرارة بحدود (-17°C).
- كلوريد الصوديوم NaCl ويستخدم لدرجات حرارة بحدود (-21°C).

إن تعرض المحاليل الملحية للهواء يساعد على تآكل المعادن وخاصة مع كلوريد الصوديوم، لذلك يفضل استخدام كلوريد الكالسيوم.

كما أن هنالك بعض المركبات التي تذوب في الماء لتقليل درجة حرارة انجماده، تسمى مانعات الانجماد ومنها الكحول، الكلسرين، بروبلين كليكول، وأثلين كليكول الذي يستعمل في مبردات ماء مكائن السيارات.

8-5 مخطط خواص مائع التثليج Refrigerant Properties Diagram

بالإضافة إلى الخواص التي أُشير إليها سابقا، فان الخواص الثرموديناميكية لموائع التثليج قد رتبت في مخططات وجداول تسهيلاً لتوضيح العلاقة بين هذه الخواص المختلفة، وللاستغناء عن استعمال الجداول والمعادلات الرياضية، يتم استعمال المخططات لأنها تعطي صورة واضحة للأطوار التي يمر بها مائع التثليج داخل أجزاء المنظومات المعتمدة لإنتاج التثليج. ومن هذه المخططات التي يجب التركيز عليها لأهميتها، مخطط **الضغط – الإنثالبي** (المحتوى الحراري) (***Pressure - Enthalpy***).

يبين الشكل (5-1) حالة مائع التثليج على مخطط ضغط – محتوى حراري، حيث تظهر ثلاث مناطق يفصل بينها منحنى يدعى ***منحني الإشباع Saturation Curve***، وهذه المناطق هي:

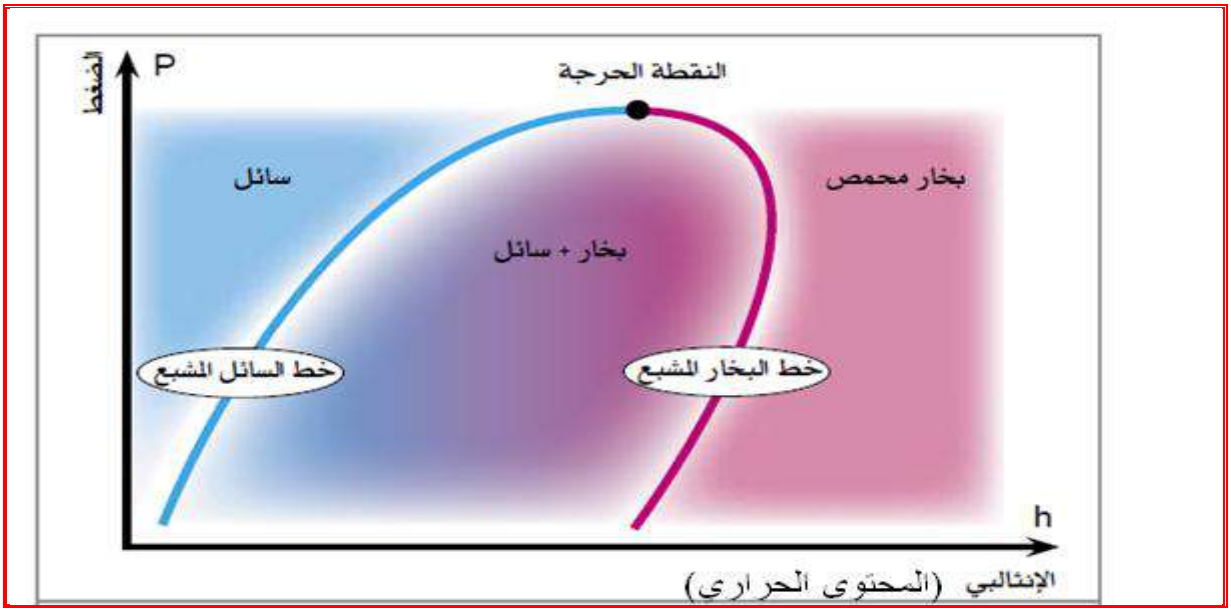
1- **منطقة السائل Liquid Region**: تقع على الجانب الأيسر من منحنى الإشباع وفيها يكون مائع التثليج في حالة سائل فقط وبدرجة حرارة أقل من درجة حرارة الإشباع.

2- **منطقة البخار المحمص Superheated Vapor Region**: وهي تقع على الجانب الأيمن من المخطط وفيها يكون مائع التثليج في الحالة البخارية فقط ودرجة حرارته أعلى من درجة حرارة الإشباع.

3- **منطقة الخليط Mixture Region**: وهي المنطقة الوسطى، إذ يكون المائع عبارة عن خليط من السائل والبخار.

4- **منحنى الإشباع Saturation Curve**: وهو الخط الفاصل بين المناطق الثلاث أعلاه ويتكون من خطين تفصل بينهما نقطة تسمى بالنقطة الحرجة. ويمثل الخط على يسار النقطة الحرجة حالة السائل المشبع وعلى يمينها حالة البخار المشبع.

5- **النقطة الحرجة Critical Point**: وهي تجمع بين خواص السائل المشبع والبخار المشبع وتفصل بين خطي منحنى الإشباع.

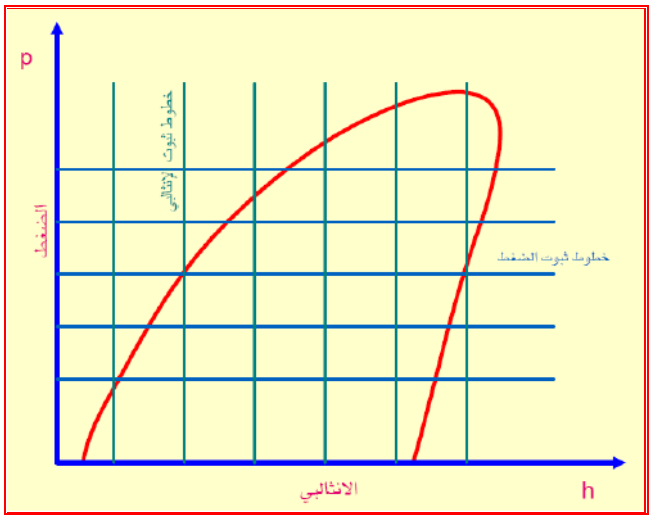


الشكل 5-1 مخطط الضغط (P) – المحتوى الحراري (h)

ومخطط (**الضغط – الإنثالبي**) يحتوي على الخطوط الآتية:

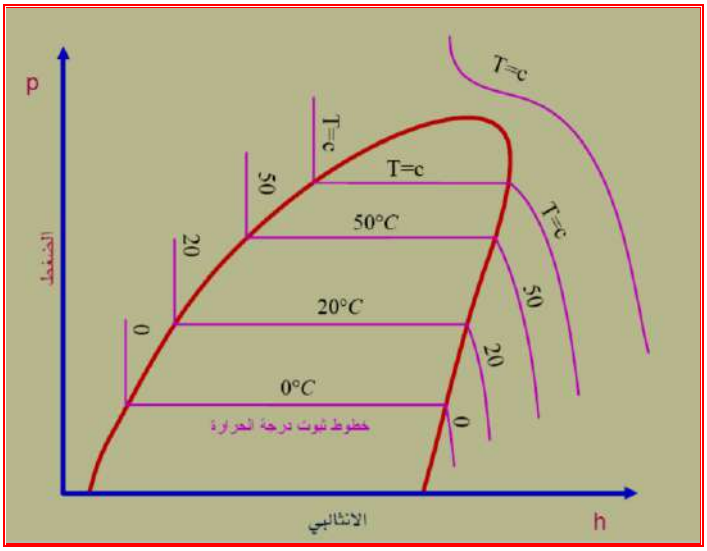
1- **خطوط ثبوت الضغط Constant Pressure Lines**: إن الإحداثي الرأسي للمخطط يمثل الضغط المطلق لمائع التثليج بوحدات (bar)، (kPa)، أو حسب نظام الوحدات المعتمد في المخطط، وكما هو مبين بالشكل (5-2).

2- **خطوط ثبوت المحتوى الحراري Constant Enthalpy Lines**: إن الإحداثي الأفقي للمخطط يمثل المحتوى الحراري لمائع التثليج، وبوحدات (kJ/kg) أو حسب النظام المعتمد للوحدات وكما هو موضح بالشكل (5-2).



الشكل 5-2 خطوط ثبوت الضغط وثبوت المحتوى الحراري على مخطط (الضغط – المحتوى الحراري)

3- **خطوط ثبوت درجة الحرارة Isothermal Lines** تكون خطوط ثبوت درجة الحرارة ممتدة على مناطق حالات مائع التثليج. ففي منطقة السائل تكون خطوط درجة الحرارة قريبة من الشاقول وموازية لإحداثيات الضغط، وتكون أفقية وموازية لإحداثيات المحتوى الحراري في منطقة الخليط، أما في منطقة البخار فتكون مائلة إلى أسفل المخطط، وكما هو موضح بالشكل (5-3). وغالباً ما تكون بالوحدة السيليزية (°C) أو الفهرنهايتية (°F).



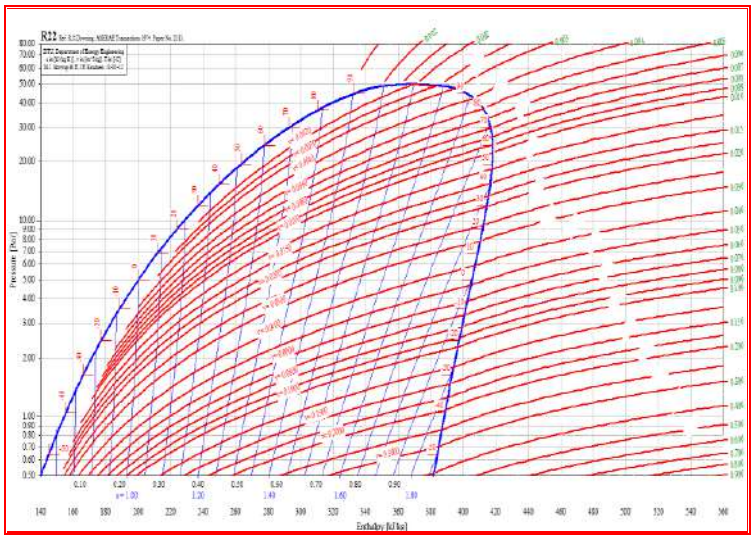
الشكل 5-3 خطوط ثبوت درجات الحرارة على مخطط الضغط – المحتوى الحراري

4- **خطوط ثبوت الحجم النوعي Constant Specific Volume Lines**: إن خطوط ثبوت الحجم النوعي مائلة قليلاً وترتفع إلى اليمين، وتكون في منطقة البخار المحمص مائلة بزاوية بسيطة تقريباً، وكما هو موضح في الشكل (5-4)، ووحدات الحجم النوعي هي وحدة الحجم إلى وحدة الكتلة (m^3/kg).

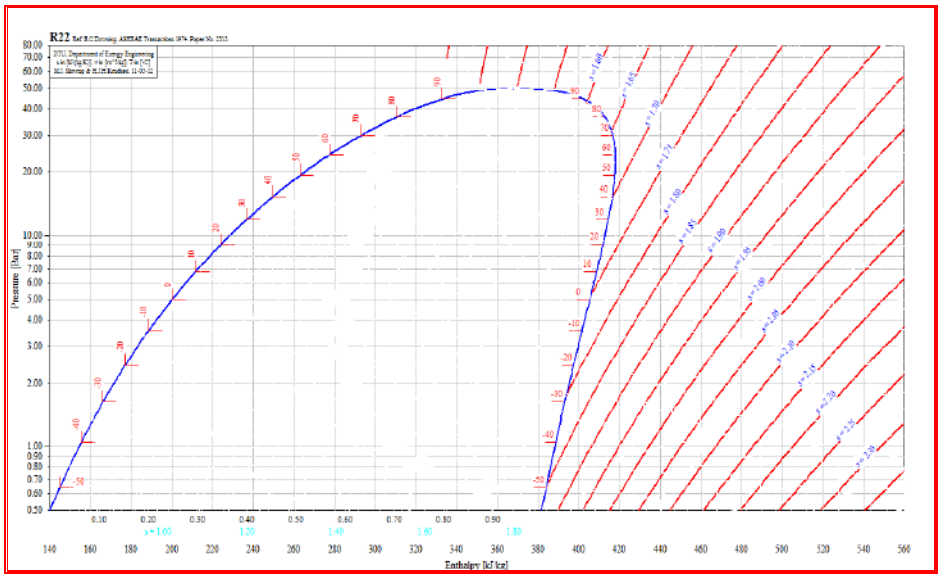
5- **خطوط ثبوت الإنتروبي Constant Entropy Lines**: تكون الخطوط مائلة باتجاه قطري تقريباً، كما هو مبين في الشكل (5-5) ووحدات الإنتروبي هي (kJ/kg.K).

6- **خطوط كسر الجفاف Constant Dryness Fraction Lines**: كسر الجفاف هو نسبة كتلة البخار إلى كتلة المائع الكلية في خليط البخار والسائل، وتمثل مقاديره بخطوط على مخطط (ضغط – إنثالبي)، كما هو مبين في الشكل (5-6).

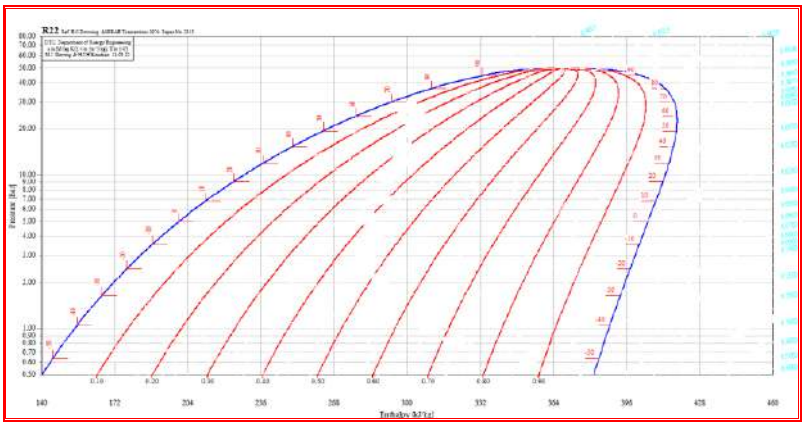
في الشكل (5-7) تم جمع كُل الخطوط المشار إليها أعلاه في مخطط (الضغط – الإنثالبي). وكذلك توضح الأشكال من (5-8) إلى (5-13) مخططات (ضغط – إنثالبي) لبعض موائع التثليج شائعة الاستخدام، التي يمكن الاستفادة منها لأغراض بعض الحسابات وتحديد الخواص المشار إليها سابقاً.



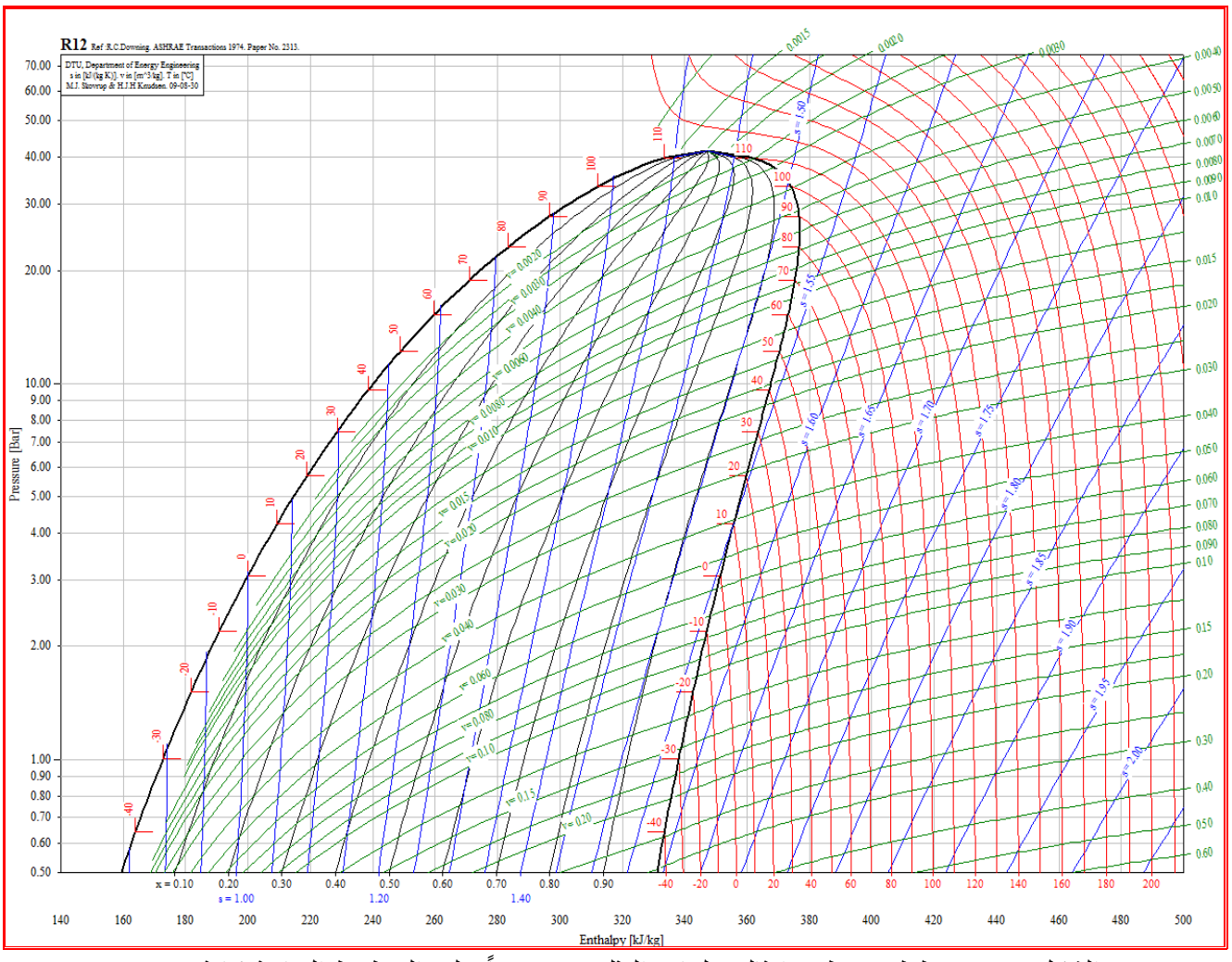
الشكل 5-4 خطوط ثبوت الحجم النوعي على مخطط ضغط – إنثالبي



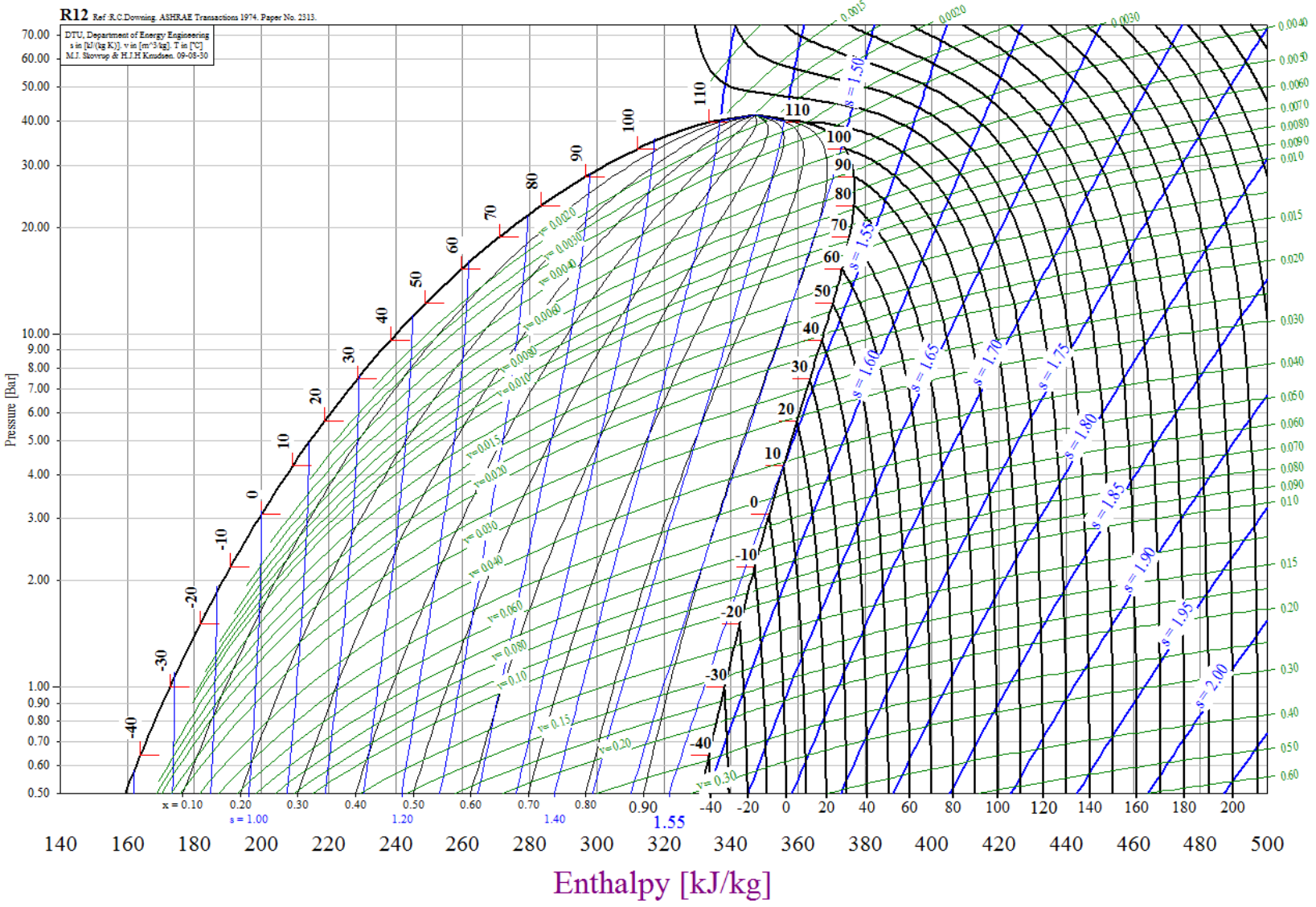
الشكل 5-5 خطوط ثبوت الإنتروبي على مخطط ضغط - إنثالبي



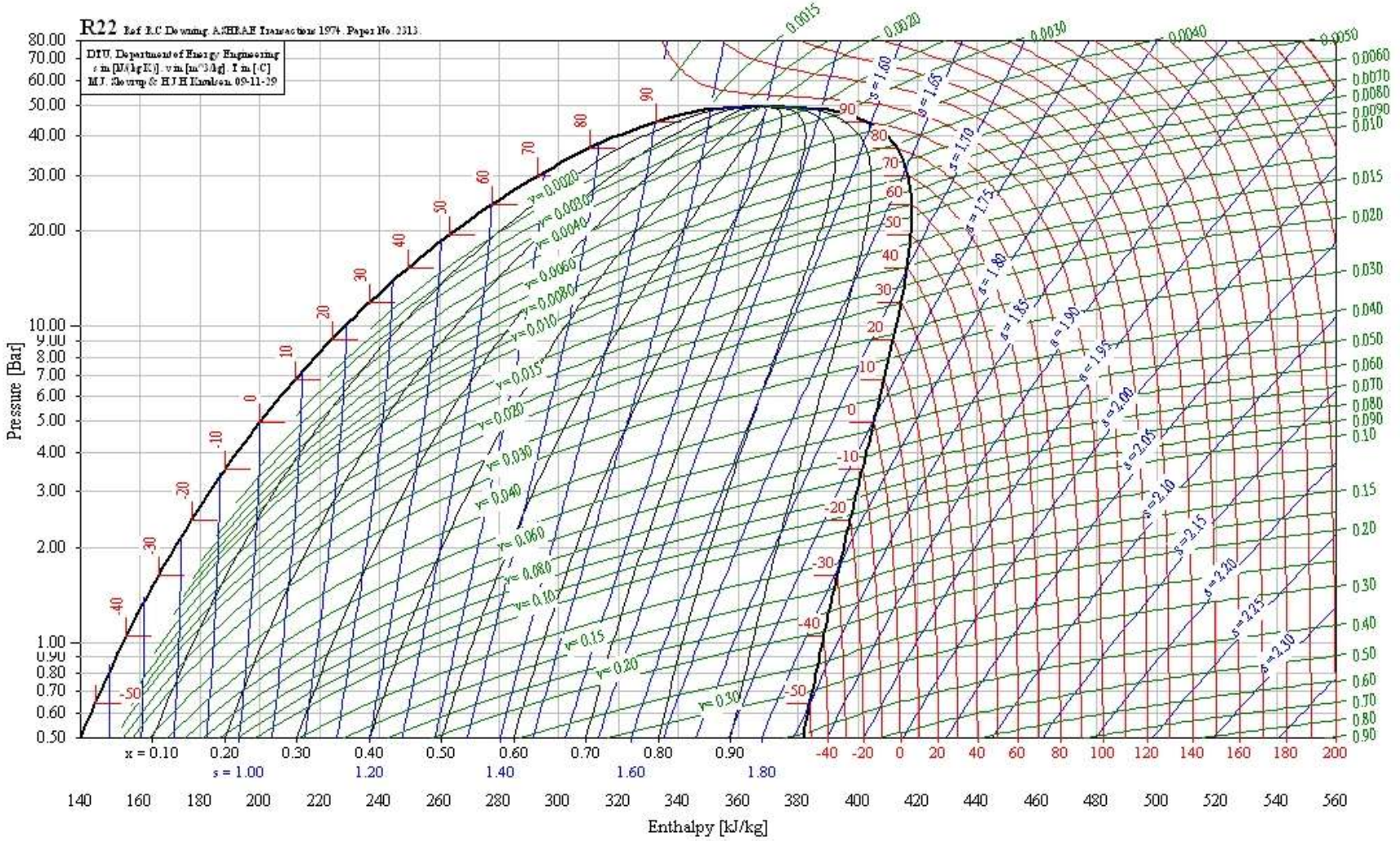
الشكل 5-6 خطوط ثبوت كسر الجفاف على مخطط ضغط – إنثالبي



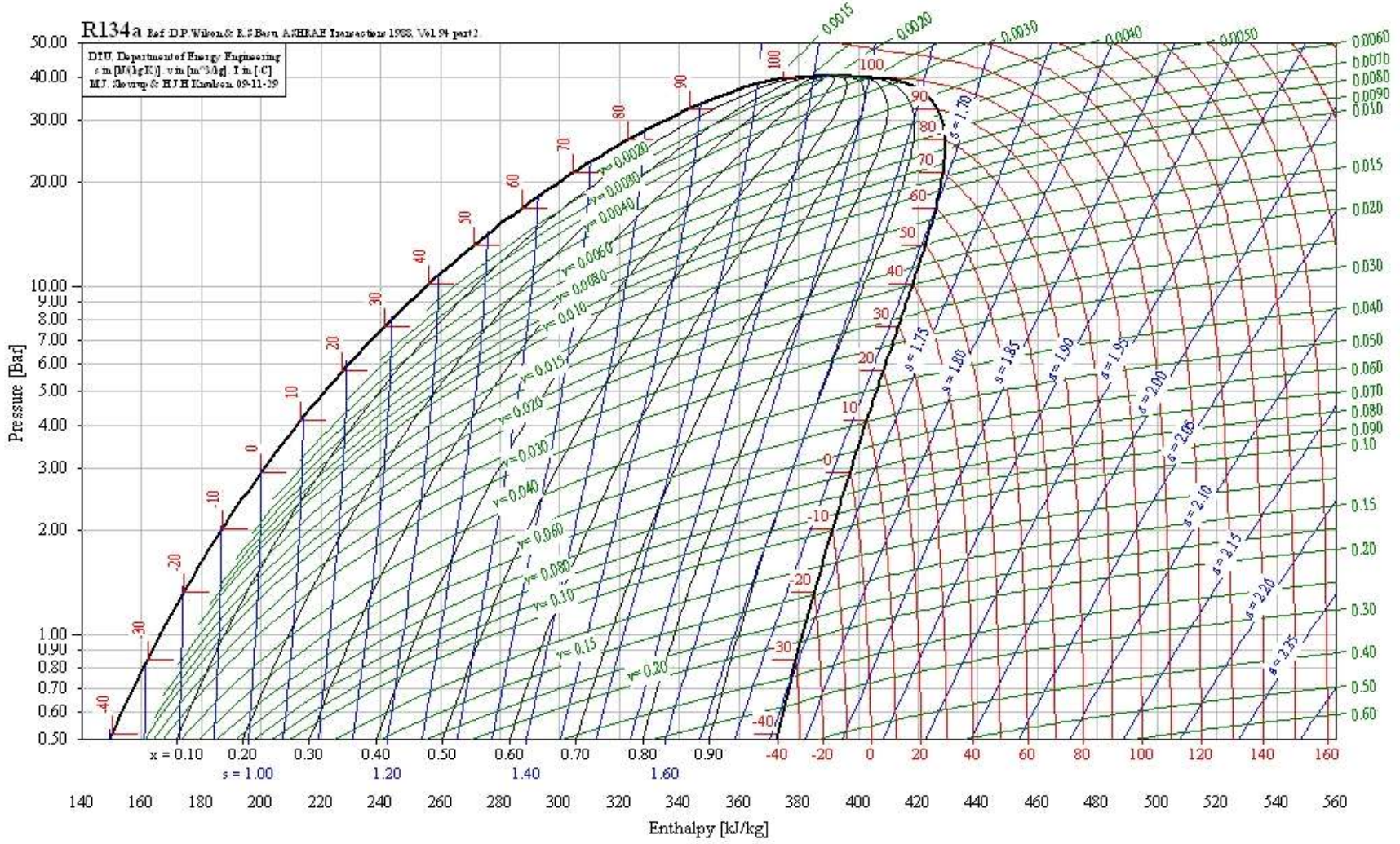
الشكل 5-7 مخطط ضغط – إنثالبي لمائع التثليج موضحاً عليه الخطوط السابقة كافة



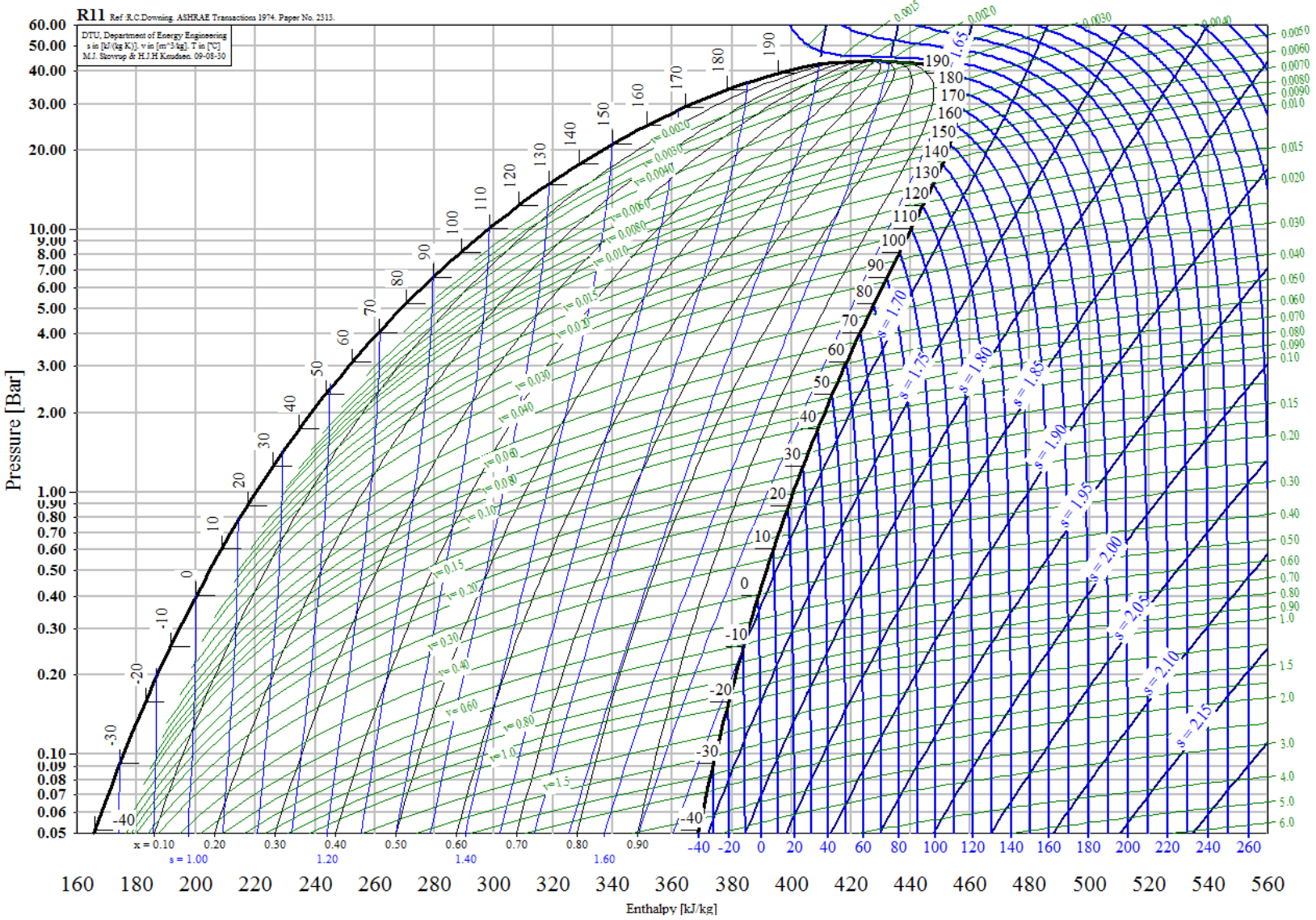
الشكل 5-8 مخطط ضغط – إنثالبي لمائع التثليج R-12



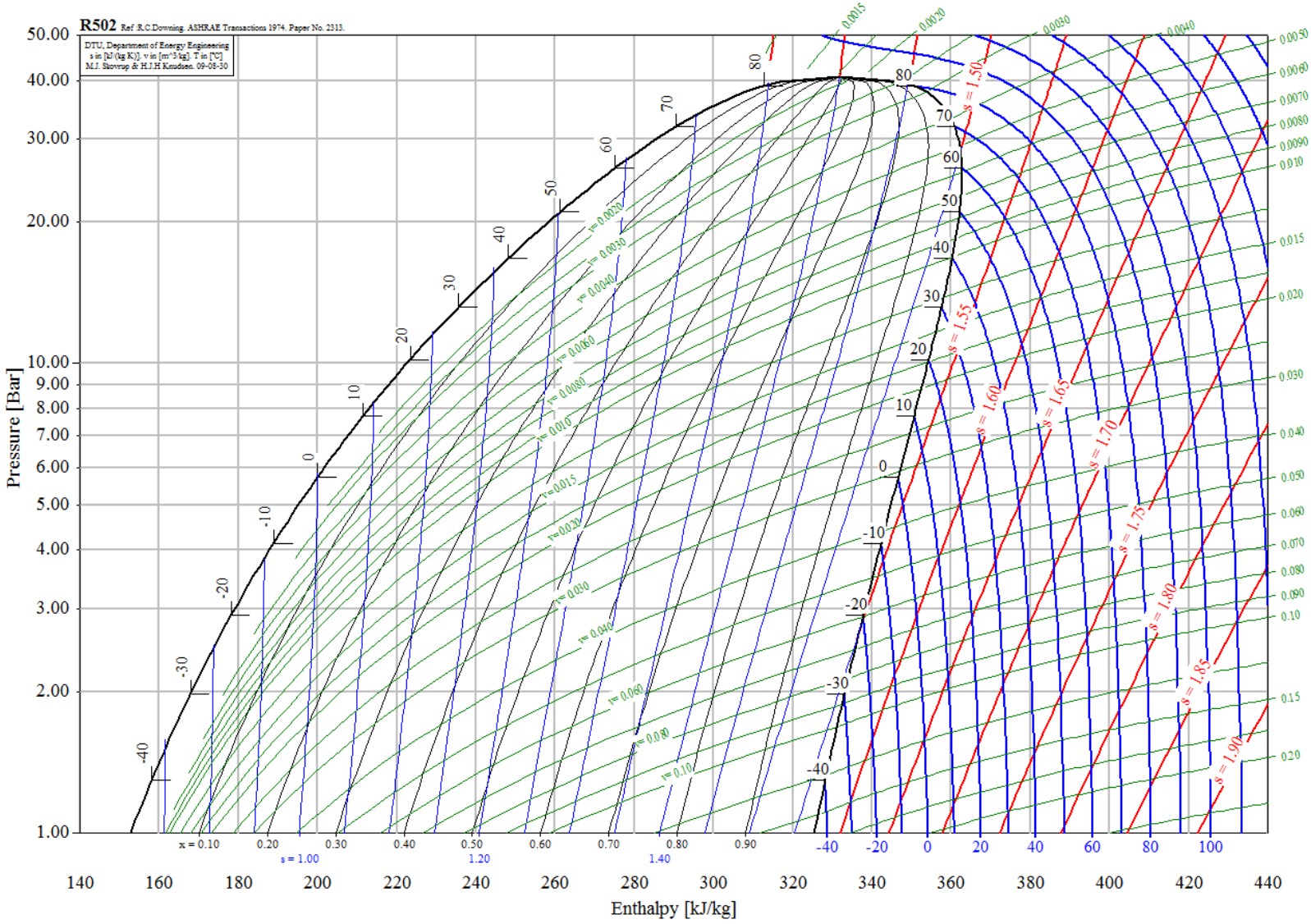
الشكل 5-9 مخطط ضغط ـ إنثالبي لمائع التثليج R-22



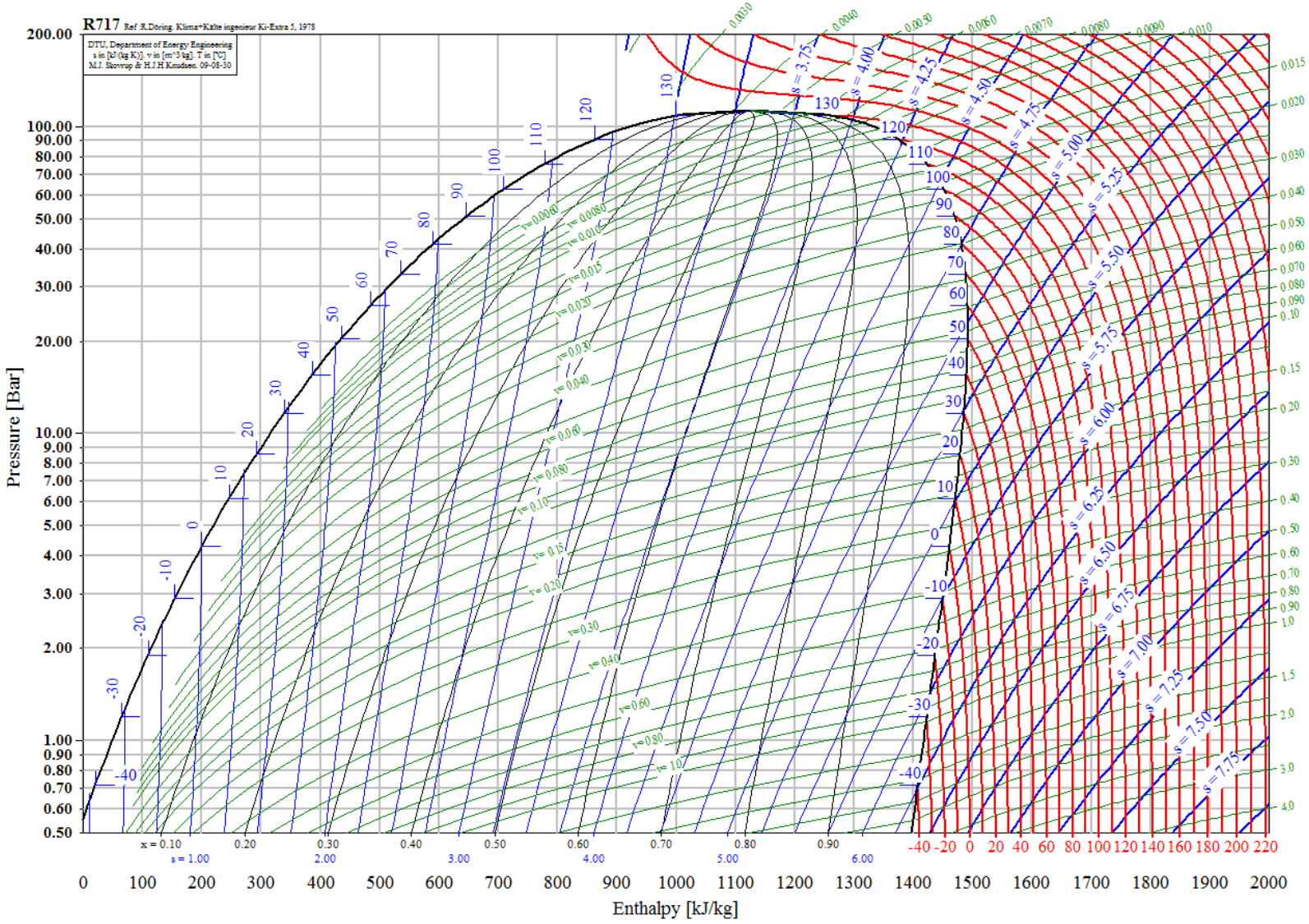
الشكل 5-10 مخطط ضغط ـ إنثالبي لمائع التثليج R-134a



الشكل 5-11 مخطط ضغط – إنثالبي لمائع التثليج R-11



الشكل 5-12 مخطط ضغط – إنثالبي لمائع التثليج R-502



الشكل 5-13 مخطط ضغط – إنثالبي للأمونيا (R-717)

أسئلة الفصل الخامس

س1: عرّف ما يأتي:
مائع التثليج، الهالوكاربونات، الموائع الآزيوتروبية، جهد تناقص الأوزون، الجهد الحراري الإجمالي، ظاهرة البيت الزجاجي، مانعات الانجماد، موائع التثليج الأساسية، وسائط التبريد الثانوية.

س2: اذكر أهم الخواص الواجب توفرها في المائع لكي يمكن استخدامه كمائع تثليج.

س3: علل ما يأتي:
أ- تحطم طبقة الأوزون.

ب- استخدام أنابيب حديدية بدل النحاسية في منظومات التبريد التي تعمل بالأمونيا.

ت- استخدام الأمونيا كمائع تثليج رغم كونه ساماً وقابلاً للالتهاب والانفجار.

ث- استخدام كلوريد الكالسيوم بدل كلوريد الصوديوم في المحاليل الملحية.

ج- استخدام الماء كوسيط تبريد ثانوي.

س4: اذكر لون الأسطوانة التي يحفظ فيها كل من موائع التثليج الآتية:

R-22 R-12 R-11 R-134a

س5: ما رقم مائع التثليج الذي تركيبه الكيميائي؟

NH_3 CO_2 $CF_2=CF_2$ CH_3Cl $CBrF_3$ H_2O

س6: اكتب التركيب الكيميائي لموائع التثليج:

R-718 R-501 R-717 R-22 R-12 R-11 R-134a

س7: رتب موائع التثليج ترتيبا تصاعديا حسب تأثيرها على طبقة الأوزون:

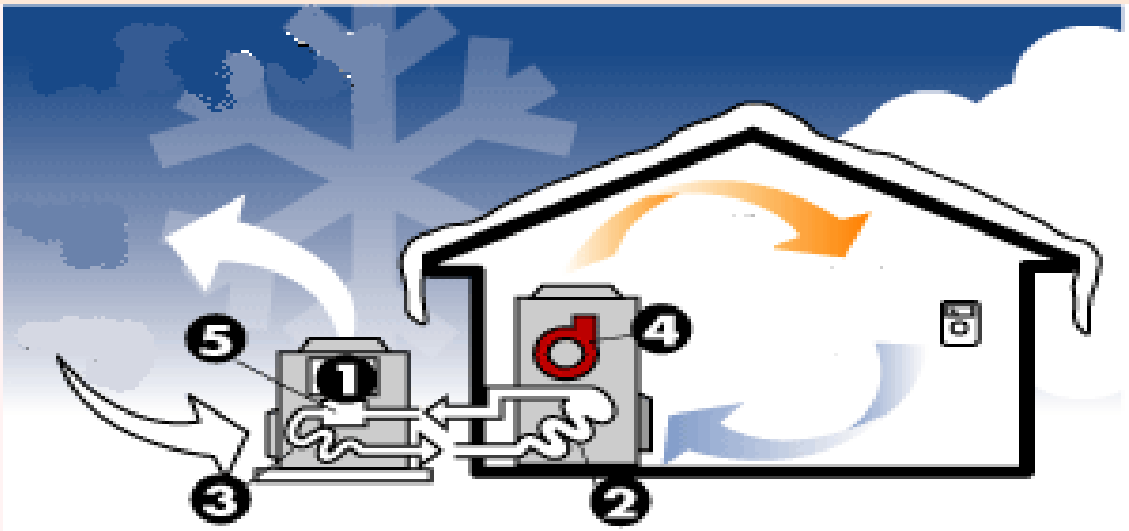
R-134a R-22 R-12 R-11

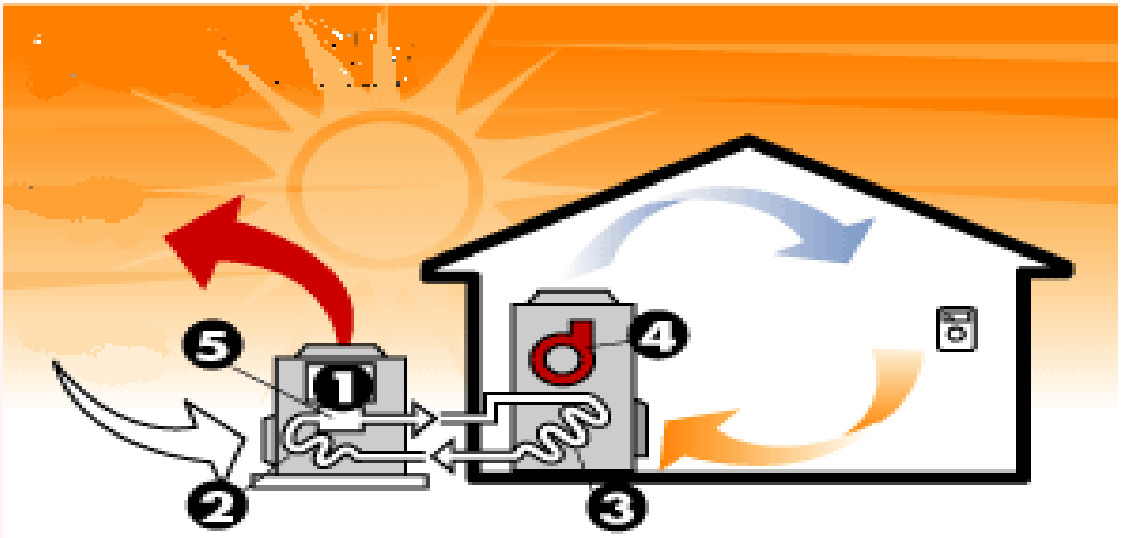
س8: ما الفرق بين موائع التثليج الأساسية والثانوية؟

الفصل السادس

دورة التثليج الانضغاطية

Vapor Compression Refrigeration Cycle





دورة التثليج الانضغاطية
Vapor Compression Refrigeration Cycle

1-6 مقدمة Introduction

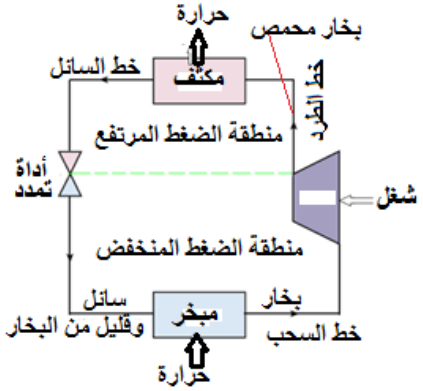
يعرف التثليج بأنه عملية تخفيض درجة حرارة مادة أو جسم، ثم المحافظة عليها أقل من درجة حرارة المحيط الذي توجد فيه المادة أو الجسم. وكذلك يمكن أن يعرف بأنه توفير درجة حرارة في مكان معين أوطأ من تلك السائدة في محيط ذلك المكان. وللحصول على التثليج يتطلب إزالة حرارة من المادة المراد تبريدها، ونقل هذه الحرارة إلى مادة أخرى أو مكان آخر، وتتم هذه العملية بواسطة مادة عاملة هي مائع التثليج.

لقد اعتمدت أساليب كثيرة للحصول على التبريد، ابتداءً من استخدام الثلج وانتهاءً بأجهزة التبريد المختلفة والمستخدمة حاليا في المجالات المنزلية، الصناعية، التجارية، تكييف الهواء وغيرها من التطبيقات المختلفة في الحياة المعاصرة. وفي هذا المجال تُعد دورة انضغاط البخار أكثر وأوسع دورات التثليج استخداماً في المجال العملي، ففي هذه الدورة يتم ضغط بخار مائع التثليج ثم يكثف للحالة السائلة وبعدها يتم تخفيض الضغط للحصول على درجات حرارة منخفضة مسببة انتقال الحرارة من المحيط إلى مائع التثليج وتحوله من الحالة السائلة إلى الحالة البخارية، ثم يعاد تدويره.

تُعد دورة انضغاط البخار للتثليج تطبيقا للقانون الثاني لديناميك الحرارة منطوق (صيغة كلاوزيوس المتعلق بمنظومات التبريد، الذي ينص على أن ***العمليات الدورية التي تُعدُّ نتيجتها الوحيدة نقل الحرارة من جسم بارد إلى جسم ساخن غير ممكنة، إلا في حالة بذل طاقة*** (**شغل**) ***على الدورة لكي يمكن نقل الحرارة من مستوى حراري أوطأ (درجة حرارة منخفضة) إلى مستوى حراري أعلى*** (***درجة حرارة مرتفعة***). وعلى هذا الأساس تكون وظيفة ماكنة التثليج النموذجية امتصاص أكبر قدر ممكن من الحرارة من المادة المراد تبريدها وبأقل قدر ممكن من الطاقة المبذولة (الشغل) في الدورة.

2-6 دورة انضغاط البخار المشبعة النموذجية Ideal Saturated Vapor Compression Cycle

تُعرف هذه الدورة بأنها الدورة المبسطة النموذجية (المثالية) لانضغاط بخار مائع التثليج، إذ تتم من خلال أربعة عمليات (إجراءات) متتالية، إن الأجزاء الميكانيكية الرئيسية لمنظومة التثليج التي تتم فيها العمليات الأربعة موضحة بالشكل (6-1) وهي الضاغط، المكثف، أداة (صمام) التمدد، المبخر. وترتبط هذه الأجزاء فيما بينها بأنابيب. تكون حركة مائع التثليج داخل هذه الأجزاء والأنابيب بمعزل عن الظروف الخارجية.



الشكل 6-1 أجزاء دورة انضغاط البخار النموذجية

1-2-6 أجزاء منظومة انضغاط البخار النموذجية

Elements of Ideal Vapor Compression System

1- **الضاغط Compressor**: يُعد قلب منظومة التثليج ويقوم بمهمة تحريك مائع التثليج داخل المنظومة من خلال سحب البخار من المبخر ورفع ضغطه وبالتالي درجة حرارته وعندها يمكن تكثيف هذا البخار في المكثف، إن تكوين ضغط منخفض في المبخر وضغط مرتفع في المكثف يجبر مائع التثليج على المرور خلال صمام التمدد، وكذلك يسهل عملية سحب الحرارة من المبخر وطرحها من خلال المكثف.

2- **خط الطرد أو التصريف Discharge Line**: وهو أنبوب يربط الضاغط بالمكثف ومن خلاله يتم نقل بخار مائع التثليج تحت ضغط عالٍ من صمام التصريف للضاغط إلى المكثف ويسمى أحياناً خط الغاز لأنه ينقل الوسيط بالحالة البخارية.

3- **المكثف Condenser**: هو عبارة عن مبادل حراري يتم فيه تحويل مائع التثليج من الحالة البخارية إلى الحالة السائلة نتيجة فقدانه للحرارة الكامنة للتكثف التي يتم سحبها منه بواسطة وسيط التكثيف (الماء أو الهواء أو الاثنان معا).

4- **خط السائل Liquid Line**: هو الأنبوب الذي يربط المكثف بأداة التمدد ومن خلاله يتم نقل سائل مائع التثليج تحت ضغط عالٍ من المكثف إلى أداة التمدد ويسمى خط السائل كونه يحمل مائع التثليج بالحالة السائلة.

5- **أداة التمدد Expansion Device**: عندما يقوم الضاغط برفع ضغط بخار مائع التثليج من ضغط المبخر المنخفض إلى ضغط المكثف المرتفع، فإن أداة التمدد تقوم بعمل معاكس لعمل الضاغط، وذلك بخفض ضغط سائل مائع التثليج من ضغط المكثف إلى ضغط المبخر وكذلك تنظيم معدل تدفق كتلة مائع التثليج الداخل للمبخر.

6- **المبخر Evaporator**: هو عبارة عن مبادل حراري يتم فيه تحويل مائع التثليج من الحالة السائلة إلى الحالة البخارية نتيجة اكتسابه للحرارة الكامنة للتبخر من المكان المراد تبريده أوتثليجه.

7- **خط السحب Suction Line**: وهوأنبوب يربط المبخر بالضاغط ومن خلاله يتم نقل بخار مائع التثليج تحت ضغط واطئ ودرجة حرارة منخفضة.

بالرجوع إلى الشكل (6-1) يلاحظ أن دورة انضغاط البخار المشبعة النموذجية، تقسم إلى قسمين من ناحية مقدار الضغط الداخلي. الأول قسم الضغط العالي (ضغط المكثف) والثاني قسم الضغط المنخفض (ضغط المبخر). وتكون نقطتا الفصل بين الضغطين هما ***صمام التمدد***، حيث يتم خفض ضغط سائل مائع التثليج من ضغط التكثيف إلى ضغط التبخير ***والضاغط***، وعنده يرفع الضغط من الواطئ إلى العالي.

2-2-6 تمثيل الدورة النموذجية على مخطط (ضغط – محتوى حراري)
Representation of Ideal Cycle on (P-h) Diagram

عندما تكون المنظومة عاملة ويدور في داخلها مائع التثليج فإن العمليات الأساسية التي يمر بها مائع التثليج عند جريانه داخل أجزاء المنظومة يمكن توضيحها بشكل متكامل من خلال تمثيلها على مخطط (ضغط – محتوى حراري) لمائع التثليج، وكما هو مبين في الشكل (2-6) الذي يمثل مخطط الحالة لدورة التثليج النموذجية. إن هذا المخطط يوضح الإجراءات التي تتألف منها الدورة والعلاقة بين هذه الإجراءات وتأثير كل إجراء على الآخر حيث يلاحظ الإجراءات التالية:

إجراء 2-1 الانضغاط (ثابت الإنتروبي) Isentropic Compression Process

وهو إجراء انضغاط بثبات الأنتروبي من بخار مشبع إلى بخار محمص على طول خط ثبوت الإنتروبي. ويكون إجراء ثابت الإنتروبي عندما لا يحصل انتقال للحرارة (الضاغط معزول حرارياً) وعدم وجود خسائر خلال الإجراء. ولهذا يكون مقدار الإنتروبي في نقطة دخول الضاغط ونقطة الخروج بنفس المقدار. حيث يقوم الضاغط بسحب البخار المشبع من المبخر ورفع ضغطه إلى ضغط التكثيف. ويتم تحديد نقطة البخار الداخل للضاغط (1) من تقاطع خط تشبع البخار مع الخط الأفقي الممثل لضغط المبخر، أما نقطة البخار المحمص (2) فتكون نتيجة تقاطع خط ثبات الإنتروبي المار بالنقطة (1) مع خط ثبات الضغط الممثل لضغط المكثف.

وتُعرف **الإنتروبي** (**Entropy**) على أنه مفهوم رياضي يمثل المحتوى الحراري للمادة نسبة إلى درجة الحرارة وهي من الخصائص الثرموديناميكية المحسوبة. ووحدة قياس الإنتروبي هي **(kJ/K)**، وتُعرف **الإنتروبي النوعية Specific Entropy** على إنها النسبة بين الإنتروبي ومقدار كتلة المادة، ووحدتها هي **(kJ/kg.K)**.

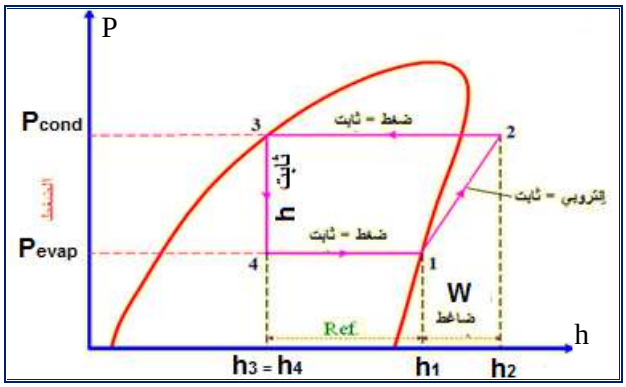
إجراء 2-3 التكثيف Condensation Process: وهو إجراء إزالة تحميص وتكثيف لبخار مائع التثليج عند ضغط ثابت **Isobaric Condensation Process** (ضغط التكثيف) في المكثف. حيث يتم التبادل الحراري بين بخار مائع التثليج ذي الضغط ودرجة الحرارة العاليتين ووسيط التكثيف (الهواء أو الماء) ذي درجة الحرارة الواطئة نسبياً، يتحول بخار مائع التثليج المحمص إلى بخار مشبع أولاً من خلال فقدانه حرارته المحسوسة (حرارة التحميص)، ويستمر سحب الحرارة الكامنة من البخار المشبع حتى يتحول إلى سائل مشبع عند ضغط التكثيف وبدرجة حرارة عالية النقطة (3). ولهذا تكون النقطة (3) حاصل تقاطع خط تشبع السائل مع خط ثبوت ضغط المكثف.

إجراء 3-4 التمدد Expansion Process: في أداة التمدد للدورة البسيطة ينخفض ضغط السائل الداخل لها إلى ضغط المبخر عند خروجه منها. وبما أن إجراء التمدد يحدث بثبوت المحتوى الحراري **Constant Enthalpy Process** بسبب انعدام انتقال الحرارة عبر أداة التمدد (معزولة حرارياً) بالإضافة إلى عدم وجود شغل خلال إجراء التمدد، لذلك تكون العملية خلال أداة التمدد على خط ثبوت المحتوى الحراري المار بالنقطة (3)، وتكون الحالة (3) هي نقطة البداية للإجراء، أما نهايتها النقطة (4) فتحدد من تقاطع خط ثبوت المحتوى الحراري المار بالنقطة (3) مع خط ثبوت ضغط المبخر.

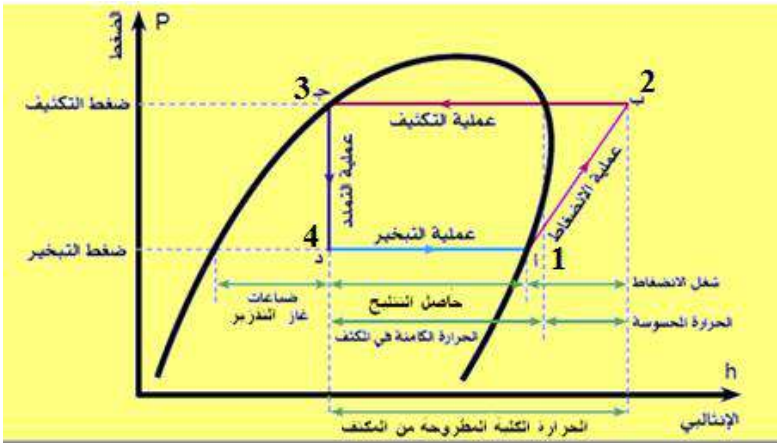
بعد عملية التمدد يكون مائع التثليج بحالة خليط من السائل والبخار. يتكون البخار بسبب تبخر كمية قليلة من السائل مسببا انخفاض درجة حرارة الخليط. إن البخار الناتج من إجراء التمدد يسمى **بغاز التذرير (Flash Gas)** وتحدد نسبته اعتماداً على خط كسر الجفاف المار بالنقطة (4).

إجراء 1-4 التبخر Evaporation Process: إن سائل مائع التثليج الداخل للمبخر بالنقطة (4) يتبخر بدرجة حرارة ثابتة وضغط ثابت **Isobaric Evaporation Process** مكتسباً الحرارة الكامنة للتبخر من محيط المبخر(الوسط أو المواد المطلوب تبريدها)، إذ تنتقل هذه الحرارة خلال جدران المبخر إلى مائع التثليج. ويكون مائع التثليج عند نهاية المبخر عبارة عن بخار مشبع ممثلا بالنقطة (1).

وبهذا تكون العمليات أعلاه دورة مغلقة كما هو واضح من تمثيلها على مخطط (ضغط - محتوى حراري) لمائع التثليج في الشكلين (6-2) و (6-3).



الشكل 6-2 مخطط الحالة لدورة التثليج النموذجية



الشكل 6-3 مخطط ضغط – محتوى حراري لدورة تثليج نموذجية

6-2-3 معامل أداء دورة انضغاط البخار النموذجية

Coefficient of Performance for Ideal Compression Vapor Cycle (COP)

من السهل جداً تحليل دورة انضغاط البخار النظرية وحساب معالم أدائها من شغل مصروف وكميات حرارة ومعامل أداء ومعدل تدفق مائع التثليج وغيرها على مخطط (ضغط – محتوى حراري) وتطبيق معادلات حفظ الطاقة والكتلة على كل واحدة من الإجراءات الأربعة للدورة. وقبل الخوض بهذه الحسابات لابد من التعرف على بعض المفاهيم الأساسية المتعلقة بدورة التثليج ومنها:

1- حاصل التثليج Refrigeration Effect

إن العملية الأساسية المرجوة من دورة التثليج هي امتصاص الحرارة من الحيز المراد تبريده من خلال عملية تبخر سائل مائع التثليج في المبخر. وتسمى كمية الحرارة التي يمتصها كل كيلوغرام واحد من مائع التثليج في المبخر من الحيز المراد تبريده بحاصل التثليج ويرمز له بالرمز q_{abs}. وهو عبارة عن الفرق بالمحتوى الحراري بين نقطتي الخروج والدخول للمبخر والمتمثلة بالعملية (1-4) على الشكل (2-6). إذاً حاصل التثليج هو:

$$q_{abs} = h_1 - h_4$$

أما كمية الحرارة المسحوبة من الحيز المراد تبريده لوحدة الزمن فتسمى سعة التبريد (التثليج). ويمكن تحديدها من خلال تحديد حاصل التثليج للدورة وتحديد كتلة مائع التثليج المار بالدورة في وحدة الزمن (تحديد التدفق الكلي لمائع التثليج بالدورة)، وهي:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times q_{abs}$$

وتستعمل وحدة خاصة للتعامل مع سعة التبريد تسمى ***طن التثليج Ton of Refrigeration*** ويرمز لها (**TR**). وطن التثليج هو كمية الحرارة اللازمة لتحويل طن أمريكي واحد من الجليد إلى ماء عند نفس درجة الحرارة خلال 24 ساعة ويساوي (**12000 Btu/h**) حسب النظام البريطاني للوحدات أو (3.516 kW) حسب النظام العالمي للوحدات.

2- شغل الانضغاط Compression Work

إن إجراء الانضغاط في دورة التثليج النظرية يتم **أديباتياً** (**Adiabatic**) (كظيمة الحرارة) أي الإجراء الذي لا يحصل فيه انتقال للحرارة وعكوسياً (دون خسائر) ولهذا يكون الإجراء ثابت الإنتروبي.

إن شغل الانضغاط يمثل عمل الضاغط في رفع ضغط بخار مائع التثليج من ضغط المبخر إلى ضغط المكثف. حيث يزداد المحتوى الحراري لمائع التثليج بمقدار الفرق بالمحتوى الحراري بين نقطتي الخروج والدخول للضاغط، وبالرجوع للشكل (2-6) فإن شغل الانضغاط لوحدة الكتلة من مائع التثليج وبوحدات (kJ/kg) هو:

$$W = h_2 - h_1$$

أما الشغل الكلي المصروف في الضاغط فيتحصل من حاصل ضرب شغل الانضغاط لوحدة الكتلة في معدل التدفق الكلي لمائع التثليج، وهو:

$$\dot{W} = \dot{m} \times (h_2 - h_1)$$

3- الحرارة المطروحة Rejected Heat

يكتسب مائع التثليج حرارة خلال عملية التبخر في المبخر متحولاً من سائل إلى بخار مشبع، وهي الحرارة الكامنة للتبخر. ثم يضاف إليه شغل الانضغاط متحولاً إلى بخار محمص بدرجة حرارة عالية. وذلك يتم في الإجرائين (1-4) و (2-1) وكما هو مبين في الشكل (2-6)، هذه الكمية من الطاقة التي تم اكتسابها في المبخر والضاغط يتطلب التخلص منها في المكثف، ونقلها من مائع التثليج إلى وسيط التكثيف

ومنه إلى المحيط الخارجي أو يتم استخدامها أحياناً لإغراض التدفئة. وتسمى كمية الحرارة التي يفقدها كل كيلوغرام واحد من مائع التثليج في المكثف بالحرارة المطروحة لوحدة الكتلة، وتكون قيمتها مساوية لمجموع حاصل التثليج وشغل الانضغاط وهي:

$$q_{rej} = q_{abs} + w_{comp}$$

$$q_{rej} = (h_1 - h_4) + (h_2 - h_1)$$

$$q_{rej} = h_2 - h_3$$

علماً أن: $h_3 = h_4$

أما الطاقة الحرارية الكلية المطروحة من مائع التثليج الموجود داخل المكثف إلى خارج المكثف، فهي:

$$q_{rej} = \dot{m} \times (h_2 - h_3)$$

4– معامل الأداء (COP) Coefficient of Performance

لايمكن استخدام مصطلح الكفاءة للدلالة على أداء منظومة (دورة) التثليج، لأن مصطلح الكفاءة المعتمد يدل على النسبة بين المستحصل إلى المصروف، أو يشير إلى نسبة الخارج إلى الداخل وهذه النسبة لا تلائم التطبيق في منظومات التثليج لان المستحصل من الدورة هو الحرارة المطروحة وهي من المفاقيد.

إن المصطلح المناسب لقياس الأداء في منظومات التثليج يسمى معامل الأداء للدلالة على كفاءة الدورة. ويعرف معامل الأداء على أنه عبارة عن نسبة الحرارة الممتصة في المكان المراد تبريده إلى الشغل المبذول من قبل الضاغط، أي إنه النسبة بين التبريد النافع إلى الشغل الصافي المبذول للحصول على ذلك التبريد، ولهذا فان:

$$COP = \frac{Q_{abs.}}{W_{comp.}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

مثال 1

دورة تثليج بسيطة لثلاجة منزلية تستعمل R-134a مائعاً للتثليج. درجة حرارة المبخر (-20°C) ودرجة حرارة مائع التثليج عند دخول المكثف 30°C، إذا كان مائع التثليج يدخل الضاغط بخاراً مشبعاً ومعدل جريانه 1 kg/s، إحسب الآتي:

1- شغل الضاغط ، 2- الحرارة المفقودة من المكثف، 3- حاصل التثليج 4- معامل أداء الدورة

الجواب

يتم تمثيل عمليات الدورة على مخطط (ضغط – محتوى حراري) لمائع التثليج R-134a، كما هو مبين في الشكل أدناه.

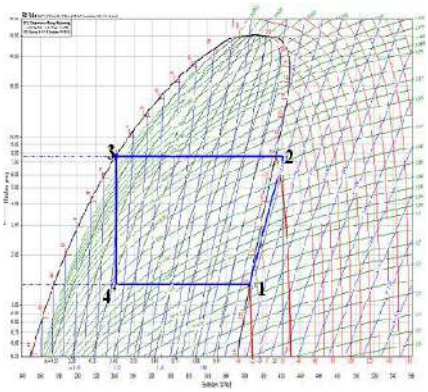
رسم خط أفقي من نقطة تقاطع

درجة حرارة المبخر -20°C مع منحني تشبع البخار،

الخط الأفقي السفلي.

رسم خط أفقي من نقطة تقاطع درجة حرارة المكثف 30°C

مع خط منحني تشبع البخار، الخط الأفقي العلوي.



- تحديد نقطة دخول مائع التثليج للضاغط (النقطة 1) الناتجة من تقاطع خط تشبع البخار مع خط درجة الحرارة (-20°C)، نقطة تقاطع الخط السفلي مع منحني البخار المشبع نطلق عليها رقم 1 تمثل حال البخار الداخل إلى الضاغط.
- نرسم خط من النقطة 1 يوازي خط ثبوت الإنتروبي حتى يتقاطع مع الخط العلوي (خط درجة الحرارة (30°C)، ونقطة التقاطع تعطى الرقم 2 والدالة على حالة البخار المحمص الخارج من الضاغط. وتقرأ قيمة المحتوى الحراري عند نقطة التقاطع (h_2).
- تقاطع الخط العلوي مع منحني تشبع السائل تعطي الرقم 3 وتمثل حال مائع التثليج الخارج من المكثف وهي حالة سائل مشبع.
- بعد ذلك نرسم خطاً عمودياً من النقطة 3 إلى الأسفل وعند تقاطع الخط العمودي مع الخط السفلي (خط درجة الحرارة (-20°C)، نحصل على نقطة 4 وتمثل حالة مائع التثليج بعد أداة التمدد.
- نقرأ قيم المحتوى الحراري من مخطط (الضغط – المحتوى حراري) ومن الجدول (2-4) لخواص السائل المشبع والبخار المشبع لمائع التثليج R-134a عند درجات الحرارة المعطاة وكما يأتي:

$h_1 = 385.5$ kJ/kg $\qquad h_2 = 417$ kJ/kg

$h_3 = h_4 = 241.5$ kJ/kg

$w = h_2 - h_1 = 417 - 385.5 = 31.5$ kJ/kg

$q_{rej} = h_2 - h_3 = 417 - 241.5 = 175.5$ kJ/kg

$q_{abs} = h_1 - h_4 = 385.5 - 241.5 = 144$ kJ/kg

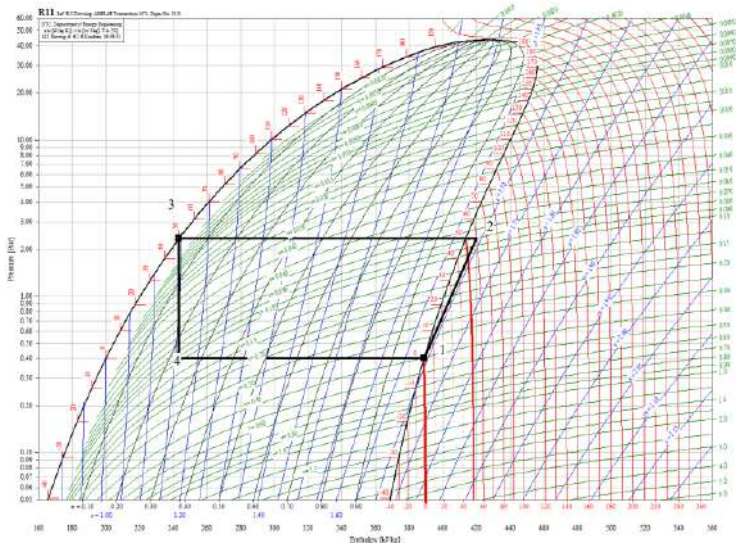
$$COP = \frac{q_{abs}}{w_{comp}} = \frac{144}{31.5} = 4.57$$

مثال 2

دورة تثليج بسيطة تعمل بمائع التثليج R-11 بين درجتي حرارة 0°C و 50°C. إذا كان حمل المبخر 36.5 kW، ارسم الدورة على مخطط (P-h)، ثُم احسب الآتي:
شغل الضاغط، الحرارة المفقودة في المكثف، حاصل التثليج، ومعامل الأداء.

الجواب

نرسم الدورة كما مر ذكرها في المثال السابق ونستخرج قيم المحتوى الحراري لكل نقطة:



$h_1 = 389$ kJ/kg

$h_2 = 419$ kJ/kg

$h_3 = h_4 = 243.5$ kJ/kg

$w = h_2 - h1$

$w = 419 - 389$

$w = 30$ kJ/kg

$q_{rej} = h_2 - h_3 = 419 - 243.5 = 175.5$ kJ/kg

$q_{abs} = h_1 - h_4 = 389 - 243.5 = 145.5$ kJ/kg

$$COP = \frac{q\ abs}{w\ comp} = \frac{145.5}{30} = 4.85$$

أسئلة الفصل السادس

س1: عرف الآتي:
التثليج ، حاصل التثليج ، المكثف ، طن التثليج ، شغل الانضغاط ، معامل الأداء.

س2: عدد أجزاء دورة التثليج الانضغاطية البسيطة، وما هي وظيفة كل جزء من هذه الأجزاء؟

س3: بين بالرسم المبسط أجزاء دورة التثليج الانضغاطية البسيطة، مؤشراً على الأجزاء وموضحاً اتجاه جريان مائع التثليج فيها.

س4:عدد الإجراءات التي تحدث في دورة التثليج الانضغاطية البسيطة، ثم مثل هذه الإجراءات على مخطط (ضغط – محتوى حراري).

س5: ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة فيما يأتي:

أ- من الأجزاء غير الأساسية لمنظومة التثليج الانضغاطية
المكثف ، المجفف ، المبخر

ب- خط التصريف هو الأنبوب الواصل بين كل من:
الضاغط والمبخر، الضاغط وأداة التمدد، الضاغط والمكثف

ج- تنحصر منطقة الضغط العالي بين:
صمام تصريف الضاغط وأداة التمدد، أداة التمدد ونهاية المبخر، صمام السحب للضاغط وأداة التمدد.

س6: علل ما يأتي:
أ- تكون حركة مائع التثليج داخل أجزاء المنظومة الانضغاطية بمعزل عن الظروف الخارجية.
ب- مرور مائع التثليج خلال جميع أجزاء دورة التثليج.
ت- قطر أنبوب خط السائل يكون أقل من قطر أنبوب خط السحب.
ث- وجود المكثف في الدورة الانضغاطية.
ج- وجود أداة التمدد في الدورة الانضغاطية.
ح- وجود المبخر في الدورة الانضغاطية.
خ- وجود ملحقات أخرى من غير الأجزاء الرئيسة في المنظومة الانضغاطية.

س7: ثلاجة تعمل بالمائع R-134a عند درجة تبخر (-20°C) ودرجة تكثيف (40°C) يدخل البخار مشبعاً عند مدخل الضاغط، ودرجة حرارته بعد الانضغاط هي (70°C) عند ضغط المكثف. اِحسب الشغل على الضاغط لكل كيلو واط تثليج، ومعامل الأداء.

س8: جهاز تكييف هواء يعمل بالدورة الانضغاطية النظرية (النموذجية) ويستخدم مائع تثليج R-22، إذا كانت درجة حرارة التكثيف (35°C) ودرجة حرارة التبخير (-4°C)، اِرسم الدورة على مخطط (ضغط – محتوى حراري) ثم احسب لكل كيلو غرام واحد من مائع التثليج الجاري داخل المنظومة كُلٍ من:
1- شغل الانضغاط 2- حاصل التثليج 3- معامل الأداء 4- الحرارة المطروحة في المكثف

س9: منظومة تثليج R-12 وتعمل بدورة انضغاط البخار النظرية بدرجة حرارة تكثيف (40°C) ودرجة حرارة تبخير (-12°C)، إذا كانت سعة تثليج المنظومة (80 kW) احسب: معدل الجريان الكتلي والحجمي لمائع التثليج والقدرة اللازمة لعمل الضاغط.

س10: دورة تثليج انضغاطية مثالية تعمل بمائع التثليج R-717 بدرجة حرارة تبخير(-20°C) ودرجة حرارة تكثيف (30°C)، وتنتج (30 TR) احسب: 1- معامل أداء الدورة 2- معدل الجريان الكتلي.

س11: دورة تثليج انضغاطية مثالية تعمل بالمائع R-12، سعة تبريدها (25 TR)، إذا كان ضغط المبخر (180.5 kPa) وضغط المكثف (1008.8 kPa)، اِحسب معدل الجريان الحجمي لمائع التثليج عند مدخل الضاغط والشغل المصروف في الدورة.

الفصل السابع

الضواغط

Compressors

الضواغط
Compressors

1-7 مقدمة Introduction

مما تقدم في الفصول السابقة، تتكون منظومة التبريد الأنضغاطية من أربعة أجزاء ميكانيكية أساسية هي الضاغط، المكثف، أداة التمدد، المبخر، إن لِكُل من هذه الأجزاء أنواعاً عديدة وخصائص تصميم وأداء محددة. ولهذا ففي الفصول التالية سيتم التطرق إلى هذه الأجزاء بصورة قد تبدو مطولة أحياناً، ولكن في حقيقة الأمر أنها مختصرة جداً أمام ما هو متوفر من انواع وابتكارات حديثة عن هذه المُعدات التي تدخل في تطبيقات هندسة التثليج وتكييف الهواء.

إن الضاغط يُعد قلب منظومة التثليج الانضغاطية وهو الذي يتولى عملية تحريك وتدوير مائع التثليج خلال أجزاء المنظومة، الذي ينتج عنه امتصاص الحرارة من الحيز المراد تبريده. وهنالك بالحقيقة أربعة أنواع رئيسة من الضواغط شائعة الاستخدام في منظومات التثليج المختلفة هي: ***الضواغط الترددية*** **Reciprocating**، **الدورانية Rotary**، **اللولبية Screw**، **ضواغط الطرد المركزي Centrifugal**

إن عملية الانضغاط وكما تمت الإشارة إليها في الفصول السابقة، تتم من خلال قيام الضاغط بسحب مائع التثليج بحالة البخار ذي الضغط الواطئ من المبخر ودفعه إلى المكثف بحالة البخار أيضاً ولكن بضغط عالٍ، ويمكن تصنيف الضواغط أيضاً اعتماداً على طريقة زيادة الضغط التي يمكن أن تنجز إلى نوعين أساسيين من الضواغط:

1- **ضواغط ذات إزاحة موجبة Positive Displacement Compressors**

وهي التي تضمن إدخال وتصريف موجب للجريان وتمنع انعكاسه داخل الضاغط مثل الضواغط الترددية، الدورانية، اللولبية، إذ يكون فيها جريان مائع التثليج باتجاه واحد فقط ومن جهة السحب إلى جهة الدفع ولا يمكن فيها انعكاس جريان المائع، ففي الضواغط الترددية يوجد صمامان أحدهما للسحب والآخر للدفع إذ يعملان بالتناوب لتحقيق عدم انعكاس جريان مائع التثليج.

2- **ضواغط ذات إزاحة غير موجبة Non-Positive Displacement Compressors**

يزداد الضغط من خلال تحول الطاقة الحركية للغاز المكتسبة خلال دورانه في الضاغط إلى طاقة ضغط حسب المبادئ الأساسية لميكانيك الموائع، ولا تحتوي هذه الضواغط على ما يمنع انعكاس الجريان مثل وجود الصمامات في الضواغط الترددية. ويخضع المائع فيها إلى عمليات جريان مستمر وينقل الشغل بتأثير تغير زخم جريان المائع الذي يجري بسرعة عالية، مثل ضواغط الطرد المركزي.

من وجهة نظر أخرى تصنف الضواغط حسب الطريقة التي تدار فيها إلى الضواغط الآتية:

1- ضواغط تدار مباشرة

وفيها تنقل الحركة من المحرك إلى الضاغط بشكل مباشر، وتكون بنوعين:

النوع الأول هي الضواغط المغلقة **Hermetic** حيث يكون المحرك والضاغط في علبة واحدة (بيت الضاغط)، كما هو مبين في الشكل (7-1)، وتكون هذه العلبة محكمة القفل (ملحومة) ولا يمكن فتحها ويعتبر الضاغط والمحرك قطعة واحدة ولا يخرج منه إلا عدد من الأنابيب أحدها للسحب والآخر للدفع وآخر لشحن المنظومة. وفي بعض الضواغط يوجد أنبوبان إضافيان لتبريد زيت الضاغط، وليس لهم أية علاقة بخط السحب أو الدفع. والضواغط من هذا النوع لايمكن إصلاحها عند عطبها، ومنها ضواغط أجهزة التثليج المنزلية (الثلاجة، المجمدة، براد الماء، مكيف الهواء، وغيرها).

أما النوع الثاني فهي الضواغط شبه المغلقة (**Semi-Hermetic**). وهذا النوع مشابه للنوع المغلق من ناحية التوصيل الميكانيكي بين الضاغط والمحرك الذي يديرها، باستثناء أن هذا النوع من الضواغط يمكن فتح غلافه الخارجي والوصول للأجزاء الداخلية، لكون أجزاء بيت الضاغط موصولة مع بعضها باللوالب (براغي) وليس باللحام. أي: إن النوع شبه المغلق يمكن إجراء الصيانة لأجزائه الداخلية وتبديل القطع التالفة وإعادة غلقه، وكما هو موضح بالشكل (7-2).

2- ضواغط تدار بشكل غير مباشر

أي إن الاتصال بين محور دوران الضاغط (العمود المرفقي **Crankshaft**) ومحور المحرك الذي يديره يكون غير مباشر وإنما من خلال السيور (الأحزمة)، وكما هو موضح بالشكل (7-3). ويسمى هذا النوع من الضواغط **بالضواغط المفتوحة Open Compressors**.

إن العمود المرفقي عند امتداده خارج بيت الضاغط يتطلب وجود حلقة لإحكام السد (**Seal**) لمنع تسرب مائع التثليج من الضاغط إلى الخارج من خلال امتداد العمود المرفقي، وتُعد مشكلة التسرب من مساوئ هذا النوع من الضواغط، إضافة إلى محدداتها من ناحية الضغوط.

الشكل (7-1) ضاغط مغلق

الشكل(7-2) ضاغط شبه مغلق

الشكل (7-3) ضاغط مفتوح

للضواغط بشكل عام بعض المفاهيم والمصطلحات العلمية يجب استيعابها بشكل دقيق لتسهيل عملية مناقشة أُسس الاختيار أو الصيانة وغيرها، ومن هذه المصطلحات:

1- ضغط السحب Suction Pressure: وهو ضغط بخار مائع التثليج عند صمام دخول الضاغط. ويمثل أقل مقدار للضغط في دورة التثليج الانضغاطية.

2- ضغط التصريف Discharge Pressure: وهو ضغط بخار مائع التثليج عند خروجه من صمام تصريف الضاغط، ويمثل أعلى ضغط في دورة التثليج الانضغاطية.

3- نسبة الانضغاط **Compression Ratio**: وهي النسبة بين ضغط التصريف إلى ضغط السحب للضاغط.

4- سعة الضاغط **Compressor Capacity**: وهي معدل التدفق الحجمي لبخار مائع التثليج خلال الضاغط أو كمية الغاز الحجمية التي تمر بالضاغط خلال وحدة الزمن عند ضغط السحب.

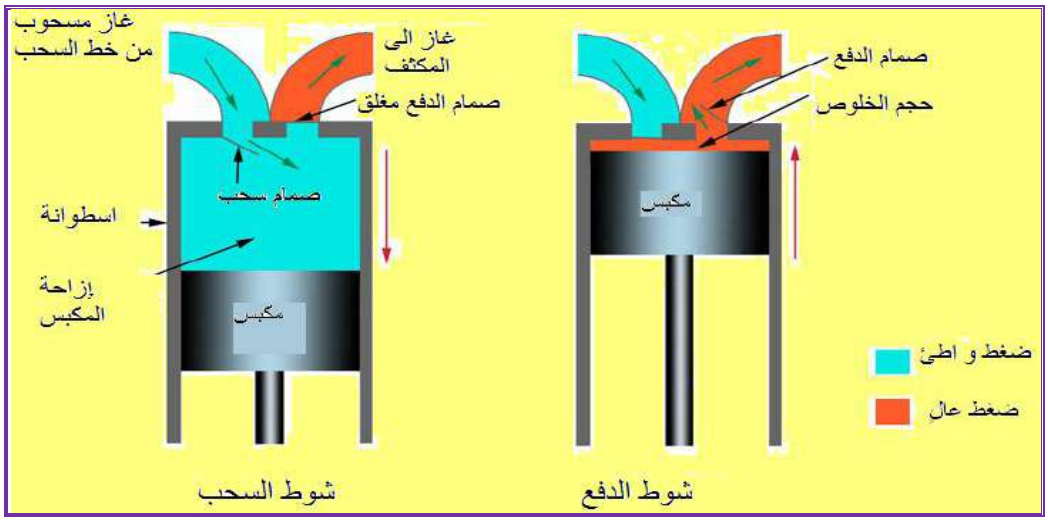
5- القدرة الفرملية **Brake Power**: وهي القدرة الميكانيكية اللازمة لإدارة الضاغط.

2-7 الضواغط الترددية Reciprocating Compressors

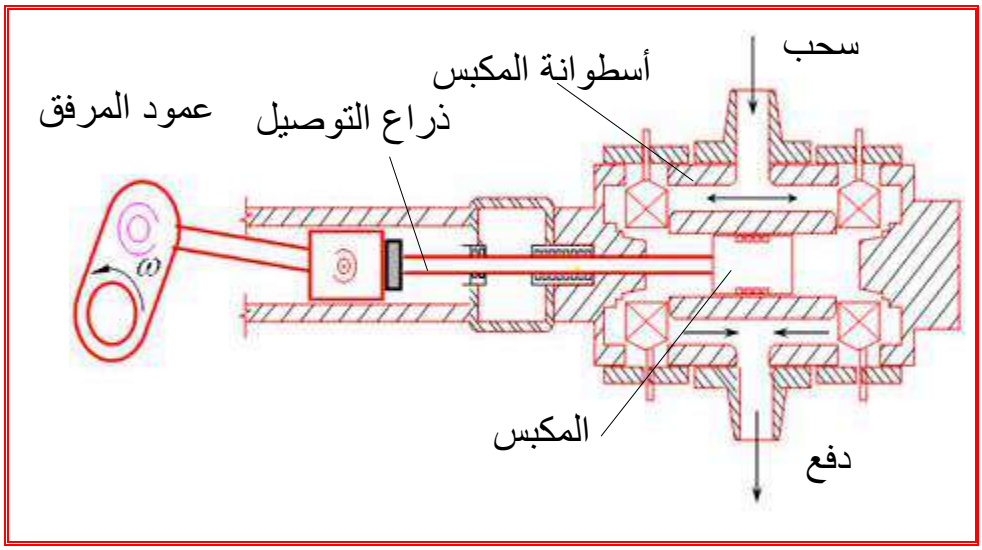
تُعد الضواغط الترددية الأكثر استخداماً في مجالات التثليج المختلفة، لتوفرها بسعات تتراوح بين جزء من طن التثليج إلى نحو 150 طن تثليج أو أكثر، وتميزها بمرونة العمل والملائمة للتطبيقات المختلفة.

إن مبدأ عمل الضواغط الترددية يمكن ملاحظته من الشكل (7-4)، وهو ضغط الغاز بحركة ترددية لمكبس داخل أسطوانة تحتوي على صمامين أحدهما لدخول الغاز (**SV**) والآخر لخروجه (**DV**). يتم الانضغاط من خلال شوطين للمكبس، الأول شوط السحب والثاني شوط التصريف. خلال شوط السحب تكون حركة المكبس من أعلى نقطة بالاسطوانة إلى أوطأ نقطة فيها يصاحبها انفتاح صمام السحب وانغلاق صمام التصريف. بعد دخول الغاز للاسطوانة يغلق صمام السحب فيما يستمر صمام التصريف مغلقاً ويتحرك المكبس من أوطأ نقطة في الاسطوانة إلى الأعلى مسبباً نقصان في حجم الغاز وزيادة في ضغطه، وعند وصول الضغط إلى قيمة محددة يفتح صمام التصريف ليخرج الغاز من الاسطوانة بضغط عالٍ.

إن عملية الانضغاط أعلاه تمت على جانب واحد فقط من المكبس، وتسمى مثل هذه الضواغط بضواغط ذات الفعل المفرد (**Single-Acting**). أما إذا تمت عملية الانضغاط على جانبي المكبس، بحيث يحدث الانضغاط مرتين لكل دورة لعمود المرفق فتسمى مثل هذه الضواغط بضواغط ذات الفعل المزدوج (**Double-Acting**)، والشكل (7-5) يوضح ذلك.

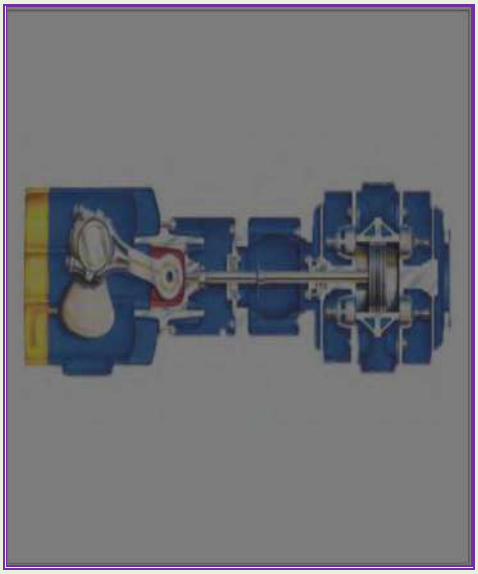


الشكل (7-4 أ) يوضح عمل الضاغط الترددي

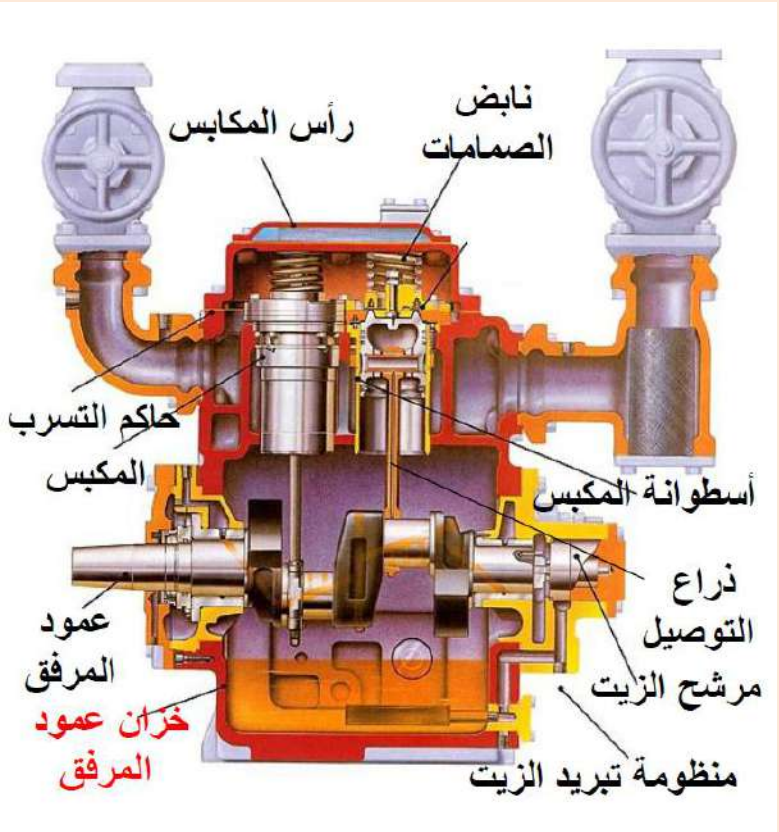


الشكل (7-4 ب) يوضح عمل الضاغط الترددي

بشكل عام يتكون الضاغط الترددي من أجزاء متعددة أساسية يوضحها الشكل (7-6) وهي:



الشكل 7-5 ضاغط ترددي ذو فعل مزدوج



الشكل 7-6 الأجزاء الأساسية لضاغط ترددي ذي أسطوانتين

1- الأسطوانة Cylinder

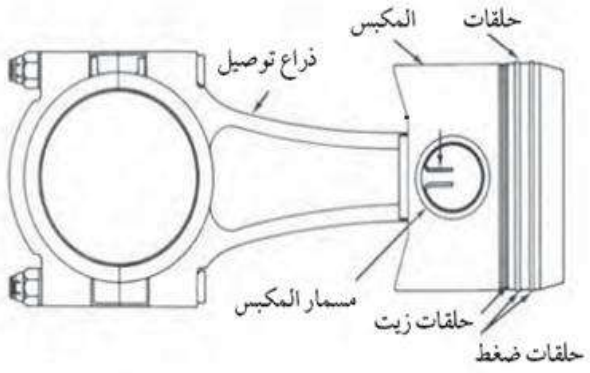
تتكون الضواغط الترددية من أسطوانة واحدة أو عدة أسطوانات وقد يصل عددها إلى (16) أسطوانة، وترتب هذه الأسطوانات بأشكال مختلفة حسب عددها ونوع تصميمها. ففي ضواغط الفعل المفرد Single Action يكون ترتيب الاسطوانات إما عمودياً أو دائرياً أو بشكل حرف (V, W). أما ضواغط الفعل المزدوج فان ترتيب أسطواناتها يكون بشكل أفقي.

إن رؤوس الأسطوانات التي تحتوي على صمامات السحب والدفع تربط بقوة بواسطة لوالب (براغي) إلى الاسطوانة ولكن في بعض الضواغط وبالأخص الكبيرة تركب رؤوس أمان **Safety Heads** فيها لتقليل خطر التلف نتيجة زيادة الضغط أكثر من ضغط التصميم لأي سبب كان.

تُصنع أسطوانات الضواغط المغلقة من حديد الزهر أو سبائك الألمنيوم، أما للضواغط المفتوحة فتصنع عادة من حديد الزهر من نوع متقارب الحبيبات، ويضاف إليه النيكل في بعض الأحيان لإعطائه المتانة المطلوبة.

2- المكبس والحلقات Piston & Rings

تُصنع المكابس المستخدمة في الضواغط الترددية الكبيرة والمتوسطة من حديد الزهر، أما المكابس الصغيرة فتصنع من سبائك الألمنيوم. وتحتوي المكابس ذات الأقطار الكبيرة عادة على حلقات انضغاط لمنع تسرب الغاز من جهة الضغط العالي إلى جهة الضغط الواطئ من خلال الخلوص الموجود بين الاسطوانة والمكبس، وحلقات تزيت لتزييت سطح الأسطوانة لتقليل الاحتكاك بين المكبس والاسطوانة ، كما هو موضح في الشكل (7-7). تكون هذه الحلقات مصنوعة من حديد الزهر أو البرونز، ومثبتة بشكل دقيق داخل حزوز المكبس. ونادراً ما تحتوي الضاغطات الصغيرة على مثل هذه الحلقات لصغر الخلوص، وعادة تزود المكابس الصغيرة بتجاويف للتزييت (**Oil Grooves**) لتكوين طبقة غشائية من الزيت على سطح الاسطوانة الداخلي تَمنع تسرب الغاز.



الشكل 7-7 ذراع توصيل وحلقات الضاغط الترددي

3- صمامات السحب والتصريف Suction & Discharge Valves

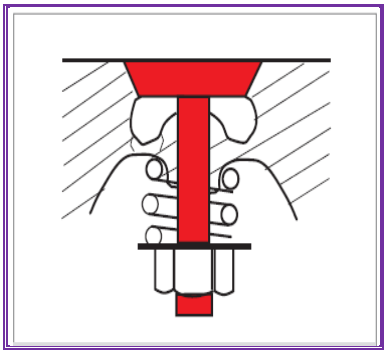
لجميع الضواغط صمامات لدخول وخروج الغاز المضغوط، تعتمد في تشغيلها على اختلاف الضغط بين داخل الاسطوانة وخطي السحب والدفع. إن فرق الضغط المطلوب لتشغيل الصمامات يعتمد على تصميم الصمامات وسرعة الضاغط. إن صمام السحب يفتح عندما يكون الضغط داخل الاسطوانة أقل من ضغط خط السحب، ويفتح صمام الدفع عندما يكون الضغط داخل الاسطوانة أكبر قليلاً من ضغط خط التصريف، لهذا فان مجال الانضغاط هو من ضغط أقل بقليل من ضغط المبخر الى أعلى بقليل من ضغط المكثف.

لمواصفات وتركيب الصمامات تأثير كبير على أداء الضاغط. لهذا تركب الصمامات حتى لا يزيد حجم الخلوص (الحجم في الأسطوانة عندما يكون المكبس عند النقطة الميتة العليا)، ويكون تدفق الغاز خلالها سلساً، ولا تسبب فقداناً كبيراً للضغط خلالها. وتقسم الصمامات بشكل عام إلى ثلاثة أنواع رئيسة:

أ- الصمامات القفازة Poppet Valves : تشبه الصمامات المستخدمة في محركات الاحتراق الداخلي (السيارات مثلا)، وتستخدم في الضواغط ذات السرعات الواطئة، ومن مزاياها قلة حجم الخلوص مما يؤدي إلى زيادة الكفاءة الحجمية للضاغط، والشكل (7-8) يوضح هذا النوع من الصمامات.

ب- صمام الصفيحة الحلقية Ring Plate Valves: توجد بعدة أشكال، وإحداها مبين بالشكل (7-9) ويستخدم هذا النوع من الصمامات في الضواغط الكبيرة وتكون ملائمة لضواغط السرع العالية والواطئة. تحتوي مجموعة الصفيحة الحلقية على صمام السحب في الحلقة الخارجية بينما يكون صمام التصريف في الحلقة الداخلية.

ج- الصمامات المرنة Flexible Valves: توجد عدة أنواع من هذه الصمامات من أهمها صمام الريشة، والصمام القلاب، ويناسب هذا النوع من الصمامات الضواغط الصغيرة.



الشكل 7-8 صمام القفاز

الشكل (7-9) صمام الصفيحة الحلقية

4- ذراع التوصيل Connecting Rod

يقوم ذراع التوصيل بنقل وتغيير حركة عمود المرفق (**Crank Shaft**) الدورانية إلى حركة خطية ترددية للمكبس، كما هو موضح في الشكل (7-4 ب). كما يربط ذراع التوصيل من جهة بالمكبس بواسطة مسمار المكبس (**Piston Pin**) ومن الجهة الثانية يربط بالعمود المرفقي، كما يبين الشكل (7-7). تصنع أذرع التوصيل من النحاس أو الألمنيوم أو الفولاذ واطئ الكاربون، وبأشكال ومقاطع مختلفة مثل (**I, H**) أو مجوفة لاحظ الشكل (7-10).

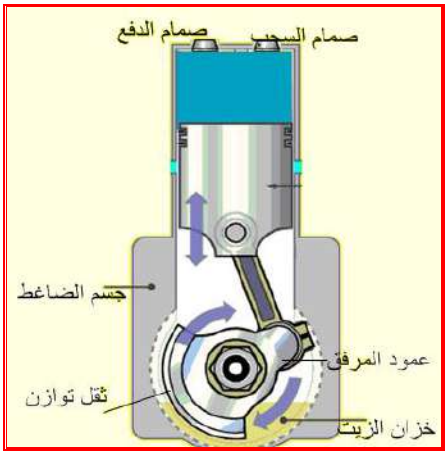
الشكل 7-10 أذرع توصيل

5- عمود المرفق ومانعات التسرب Crank Shaft & Seals

إن وظيفة عمود المرفق (الكَرنك) هي تحويل الحركة الدورانية للمحرك الى حركة ترددية للمكبس بواسطة ذراع التوصيل. وهنالك نوعان من عمود المرفق، الأول هو عمود المرفق ذو المرمي **Throw Crank**، الذي يستخدم غالبا في الضواغط الكبيرة، ويصنع من الفولاذ المطروق Forged Steel أو الصلب المسبوك Cast Steel، كما هو مبين في الشكل (7-11). أما النوع الثاني فهو عمود المرفق اللامركزي **Eccentric Crank** ويتكون من محور مستقيم من الفولاذ يرتبط مع ذراع التوصيل من خلال اللامتمركز (وهو جزء من المرفق له مركز دوران يختلف عن المحور)، والشكل (7-12) يوضح ذلك.

في الضواغط المفتوحة، يمتد عمود المرفق خارج علبة المرفق Crank Case مما يدعو إلى الحاجة الى مانع تسرب حول المرفق في مكان خروجه من علبة المرفق، وذلك لمنع تسرب مائع التثليج والزيت إلى خارج الضاغط أو دخول الهواء لداخله.

الشكل 7-11 عمود المرفق ذو المرمي



الشكل 7-12 عمود المرفق اللامركزي

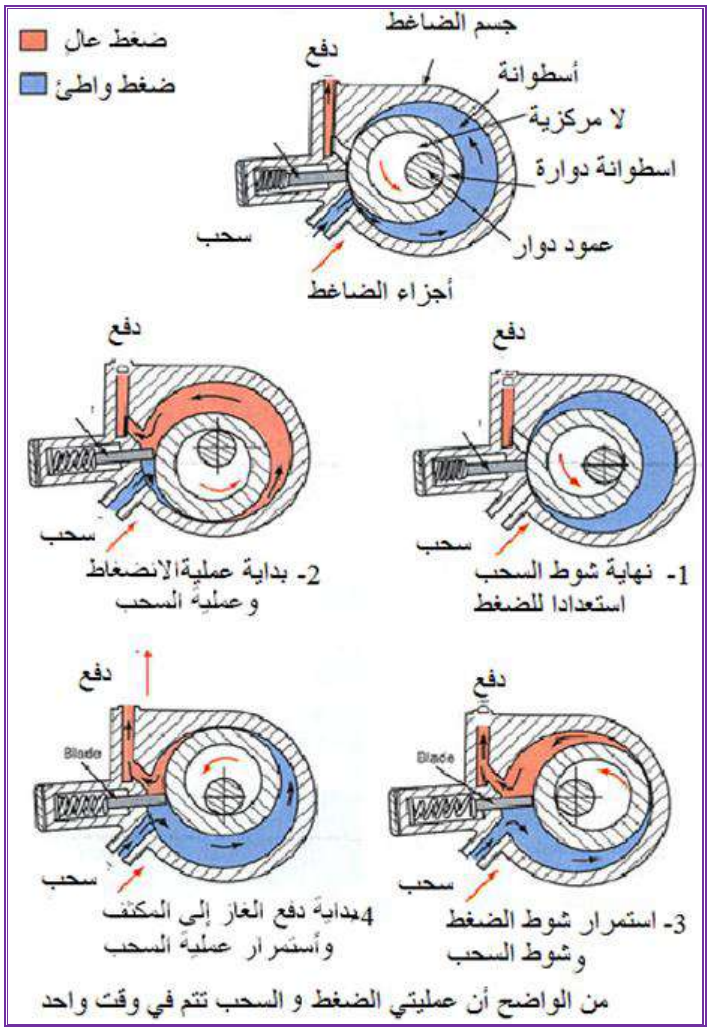
3-7 الضواغط الدوّارة Rotary Compressors

الضواغط الدوّارة (الدورانية) هي ضواغط ذات إزاحة موجبة. أي إن: عملية الانضغاط تحدث فيها نتيجة تقلص حجم الغاز، كما هو الحال في الضواغط الترددية. وتستخدم في العديد من أجهزة التبريد المنزلية، وتكون على نوعين:

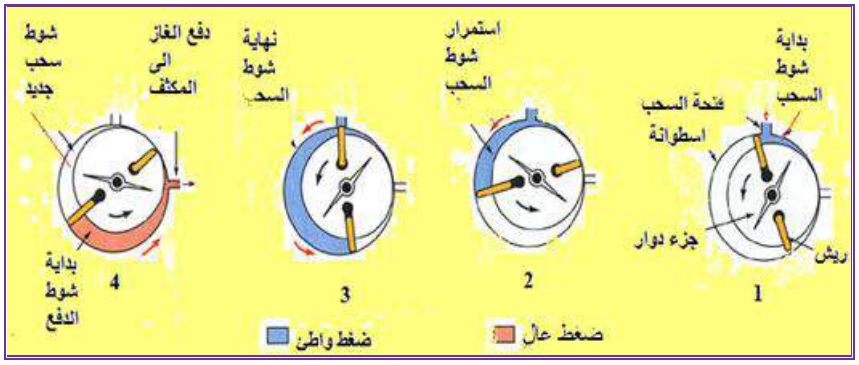
الأول نوع ذو ***ريشة واحدة*** ***Stationary blade compressors***، مكون من أسطوانة بداخلها قرص أسطواني **Roller** يدور على عمود لامركزي، ولكن يتطابق محور العمود مع محور الاسطوانة التي يدور بداخلها، كما هو مبين في الشكل (7-13). يدور القرص لامركزياً داخل الأسطوانة ويلامس سطح الأسطوانة الداخلي عند نقطة الخلوص الأقل في جدار الاسطوانة ويوجد فتحة مثبت فيها ريشة **Blade** مضغوطة بواسطة نابض لتبقى ملامسة لسطح القرص باستمرار، كما أن الريشة تتحرك في الفتحة إلى الداخل والخارج اعتماداً على القوة المسلطة عليها من القرص. إن الريشة تكون فاصلة بين فتحتي السحب والتصريف الموجودتين في جدار الاسطوانة من جهة، ومن الجهة الأخرى فإن نقطة التلامس بين سطح الأسطوانة الداخلي والقرص تكون هي الفاصل بين فتحتي السحب والدفع. إن حركة الأسطوانة الداخلية تؤدي إلى تقليل حجم الغاز المحصور بين القرص والأسطوانة في أثناء دورانها وبذلك يزداد ضغط الغاز ثم يخرج من فتحة التصريف. إن الأجزاء أعلاه تمثل مجموعة الضاغط تعمل في حيز مغمور بالزيت.

أما النوع الثاني فهي ضواغط ***متعددة الريش*** **Sliding Vane Compressors** إن تركيب هذا النوع من الضواغط يكون من أسطوانة داخلها جزء دوار **Rotor** ، يحتوي على مجموعة من الريش، مثبتة على مسافات متساوية على محيط الدوار. إن هذه الريش تنزلق من شقوق في جسم الجزء الدوار نحو الأسطوانة، بتأثير قوة الطرد المركزي في أثناء الدوران، وفي بعض التصاميم تضغط بواسطة نوابض مثبتة داخل الشقوق التي تنزلق داخلها الريش. يوضح الشكل (7-14) عملية الانضغاط لهذا النوع من الضواغط، كما يراعى في هذه الضواغط وجود طبقة من الزيت داخل الأسطوانة لتقليل الاحتكاك بين الريش وسطح الأسطوانة الداخلي، بالإضافة إلى مساعدة طبقة الزيت على منع تسرب الغاز المحصور بين الريش المختلفة. كما يركب صمام عدم إرجاع في كل من خط السحب وخط الدفع.

تمتاز الضواغط الدورانية بنعومة انسياب البخار في خطي السحب والتصريف، ولهذا فإنها تكون أقل اهتزازاً من الضواغط الترددية. كما أن كفاءتها الحجمية تكون جيدة لعدم وجود إعادة تمدد لبخار مائع التثليج المحصور في حجم الخلوص عند بدء شوط السحب كما في الضواغط الترددية. ولهذا فان الضواغط الدورانية تفضل على الضواغط الترددية عند ضغوط السحب الواطئة.



الشكل (7-13) ضاغط دوار ذو ريشة واحدة

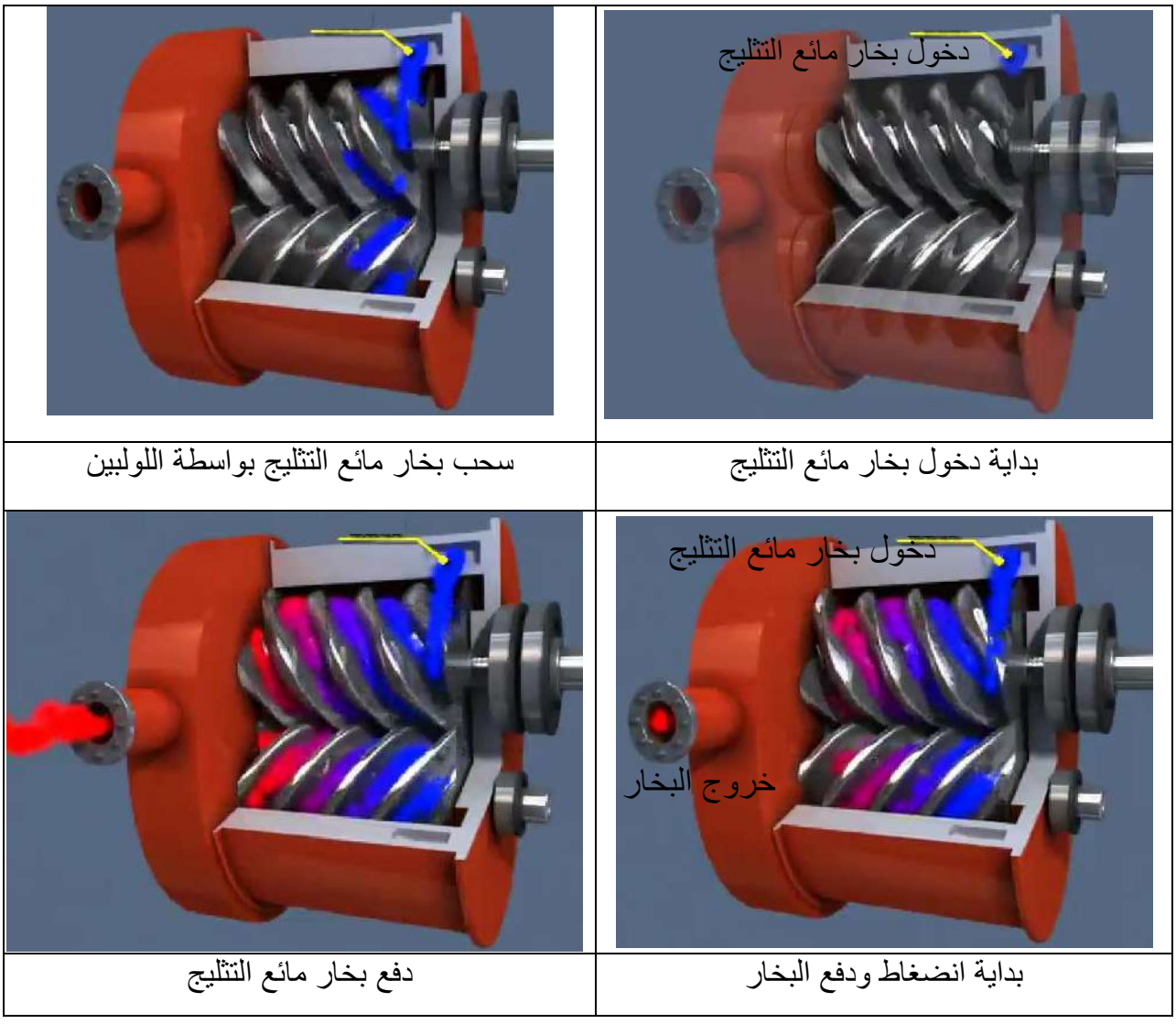


الشكل 7-14 ضاغط دوار متعدد الريش

4-7 الضواغط اللولبية Screw Compressors

الضواغط اللولبية هي ضواغط ذات إزاحة موجبة وتستخدم في منظومات التثليج التي تزيد سعتها عن 15 طن تثليج، وتكون على شكل ضاغطات مغلقة أو مفتوحة. يتكون الضاغط من زوج من الأجزاء الدوارة الخاصة. إن الجزئين الدوارين موضحان فـــي الشكل (7-15) فإحداهما جزء دوار قائد (ذكر) **Male Rotor** والآخر جزء دوار منقاد (أُنثى) **Female Rotor**، يدور الجزء القائد بواسطة المحرك ليدور معه الجزء المُنقاد، وتتم عملية تعشيق (تشابك) الجزئين داخل غلاف الضاغط الذي يحتوي على فتحة لدخول الغاز وأخرى لخروجه.

إن سرعة دوران الجزء القائد تكون أكبر من سرعة دوران الجزء المُنقاد. وتكون هذه الضواغط أقل تعرضاً للاهتزازات عند اشتغالها نتيجة لعملية الضخ المستمرة للبخار. الضواغط اللولبية ذات كفاءة عالية، ويمكن استخدامها مع أغلب موائع التثليج، كما أنها تلائم المنظومات ذات السعات العالية ودرجات الحرارة المنخفضة. ويتم ضخ الزيت للضاغط في أثناء التشغيل، ويعمل الزيت على تبريد الضاغط بالإضافة إلى تكوين طبقة تمنع تسرب الغاز بين الجزئين الدوّارين وكذلك بين الأسطوانة والجزئين الدوّارين.



بداية دخول بخار مائع التثليج	سحب بخار مائع التثليج بواسطة اللولبين
بداية انضغاط ودفع البخار	دفع بخار مائع التثليج

الشكل 7-15 طريقة عمل الضاغط اللولبي

5-7 الضواغط الطاردة المركزية Centrifugal Compressors

ضاغط الطرد المركزي هو ضاغط ذو إزاحة غير موجبة، يستخدم في منظومات التثليج ذات السعات الكبيرة (بين 100 الى 2000 طن تثليج أو أكثر). ويمكن أن يكون من النوع المغلق أو المفتوح، إلا أن النوع المغلق أكثر استخداماً. يتكون ضاغط الطرد المركزي من دفاعة (الدولاب الدوار) **Impeller** واحدة (أو اثنتين) مركبة على محور غالباً ما يصنع من الفولاذ، وموضوعة في غلاف من حديد الزهر، والأشكال (7-16) و (7-17) توضح الأجزاء الرئيسية للضاغط الطارد المركزي.

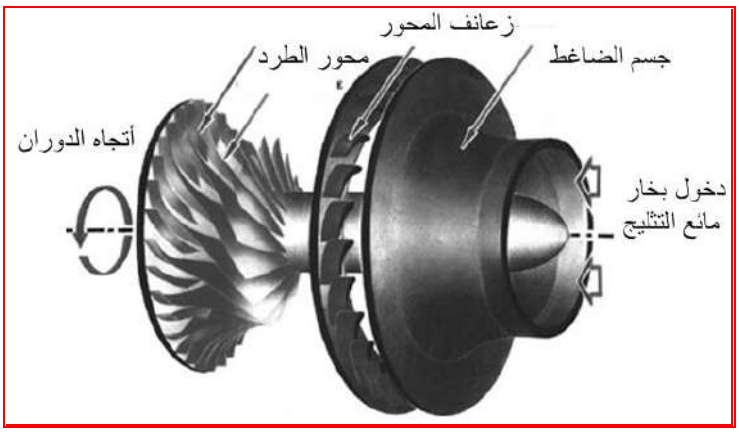
إن مبدأ عمل الضاغط هو العمل على زيادة سرعة الغاز أولاً (أي: زيادة الطاقة الحركية للغاز) في أثناء مروره في دفاعة الضاغط، ثم تحويل الطاقة الحركية الناتجة إلى طاقة ضغط من خلال تقليل سرعة الغاز في أثناء مروره في غلاف الضاغط. يلاحظ من الشكل (7-16) الذي يوضّح أساس عمل الضاغط الطارد المركزي، حيث يدخل بخار مائع التثليج بضغط واطئ من خلال عين الدفاعة. تتكون الدفاعة من مجموعة من الريش، التي تمثل ممر الجريان للغاز.

بما أن ريش الدفاعة تدور بسرعة عالية جداً، فإن الغاز المار خلالها من العين إلى المحيط (الأطراف) سيكتسب ضغط وسرعة عاليين عند المحيط. بعد خروج الغاز من محيط الدفاعة، يمر خلال غلاف مصمم على شكل بوق لتقليل سرعة الغاز تدريجياً، وبالنتيجة يتحول ضغط السرعة (الضغط الديناميكي) **Dynamic Pressure** إلى ضغط سكون **Static Pressure**، بعدها يدخل الغاز إلى غلاف الضاغط المصمم على نفس شكل الغلاف لكي يستمر الضغط بالارتفاع بسبب تحول الضغط الديناميكي إلى ضغط السكون، ثم يترك الغاز الضاغط من المنفذ بضغط عالٍ.

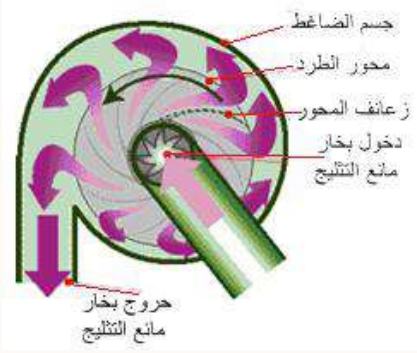
يتم عادة تزييت هذا النوع من الضواغط بطريقة التزييت القسري من خلال استخدام منظومة تزييت تحتوي على مضخة زيت وخزان زيت ومبرد للزيت. تدار مضخة الزيت بواسطة المحور الدوار للضاغط أو من خلال محرك خاص بدورة التزييت.

تمتاز ضواغط الطرد المركزي بما يأتي:

1- العمر التشغيلي أطول بالمقارنة مع الضواغط الترددية، وذلك لعدم احتوائها على أجزاء متحركة داخل الضاغط مثل المكابس والصمامات والأذرع.
2- قليلة الاهتزاز، لعدم وجود كتل غير متوازنة.
3- تعمل بسرع عالية، لهذا يمكن ربطها بشكل مباشر بالمحركات الكهربائية.
4- ذات كفاءة عالية.
5- أقل حجماً من الضواغط الترددية في حالة تساوي السعات.
6- معدل التدفق للبخار عال جداً خلال الضواغط.
7- فرق الضغط ما بين الدخول والخروج قليل.



الشكل 7-16 رسم تخطيطي لضاغط طرد مركزي



الشكل 7-17 أجزاء ضاغط الطرد المركزي

أسئلة الفصل السابع

س1: عرّف ما يأتي:
سعة الضاغط، نسبة الانضغاط، الضاغط المفتوح، ضاغط الفعل المزدوج، الصمام القفاز.

س2: صنف الضواغط حسب طريقة زيادة الضغط والطريقة التي تدار بها.

س3: عدد ثلاثة أنواع لصمامات الضواغط الترددية واشرح واحدة منها.

س4: في الضواغط الترددية، ما وظيفة كل من الأجزاء الآتية:
عمود المرفق صمامات السحب التصريف.

س5: وضّح بالرسم التخطيطي، ومؤشر على الأجزاء لكل مما يأتي:
أ- ذراع توصيل وحلقات الضاغط الترددي.
ب- ضاغط دوار ذو ريشة واحدة.
ت- ضاغط طرد مركزي.

س6: أذكر خمساً من مميزات ضواغط الطرد المركزي.

س7: ما الفرق بين:
أ- الضواغط الترددية ذات الفعل المفرد وذات الفعل المزدوج؟
ب- ضواغط الإزاحة الموجبة وضواغط الإزاحة غير الموجبة؟

س8: اشرح تركيب أسطوانة ومكبس الضاغط الترددي، موضحا ذلك بالرسم.

س9: علل ما يأتي:
أ- زيادة ضغط ضواغط الإزاحة الموجبة.
ب- زيادة ضغط الضواغط الديناميكية.
ت- وجود حلقة إحكام السد Seal في الضواغط المفتوحة دون المغلقة.
ث- استخدام الزيت للضواغط.
ج- احتواء المكابس في الضواغط الترددية الكبيرة على حلقات انضغاط وحلقات الزيت.

الفصل الثامن

المكثفات والمبخرات

Condensers and Evaporators

المكثفات والمبخرات

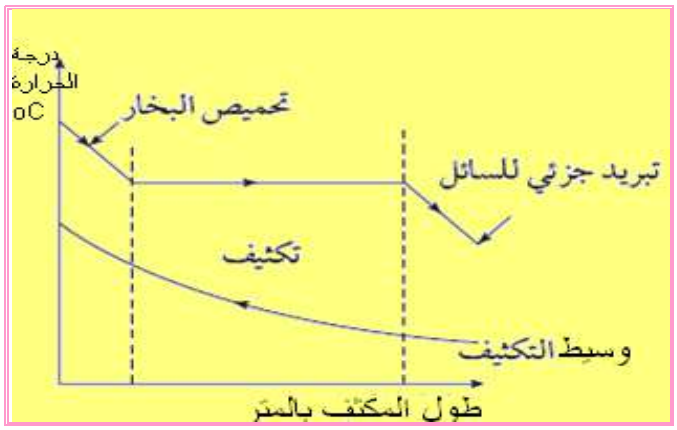
أولاً المكثفات Condensers

1-8 مقدمة Introduction

المكثف هو أحد الأجزاء الرئيسة لدورة التثليج، وهو عبارة عن مبادل حراري تنتقل من خلاله الحرارة من مائع التثليج **Refrigerant** إلى وسيط التكثيف **Condensing Medium**. إن مائع التثليج الداخل للمكثف يكون عبارة عن بخار محمص، حاملاً الطاقة الحرارية التي امتصها في المبخر، مضافاً إليها شغل الانضغاط الذي أُضيف للمائع في مرحلة الانضغاط.

يمكن تقسيم مراحل فقدان هذه الحرارة في المكثف إلى ثلاث مراحل، كما هو موضح بالشكل (8-1) وهي: **المرحلة الأولى** إذ تتم إزالة حرارة التحميص (حرارة محسوسة) وتحول مائع التثليج الى بخار مشبع، وتتم هذه المرحلة في خط التصريف وبداية المكثف. **المرحلة الثانية** وهي عملية تكثيف مائع التثليج (عملية فقدان الحرارة الكامنة للتكثف)، إذ يفقد البخار المشبع حرارته متحولاً إلى سائل مشبع. أما **المرحلة الثالثة** فهي خفض درجة حرارة سائل مائع التثليج إلى درجة حرارة أدنى وجعله سائل فائق التبريد، ويلاحظ من الشكل ذاته أن درجة حرارة وسيط التكثيف ترتفع نتيجة اكتسابه للحرارة.

إن وسائط التكثيف المستخدمة في المكثفات هي الهواء، الماء، أو الاثنان معاً. وتبعاً لذلك تقسم المكثفات الـــى ثلاثة أنواع رئيسة، إذ يدل اسـم وسيط التكثيف المستخدم على اسم كل نوع وهـــي: مكثفات **مبردة بالهواء**، مكثفات **مبردة بالماء** ومكثفات **مبردة بالهواء والماء** وتسمى المكثفات التبخيرية.



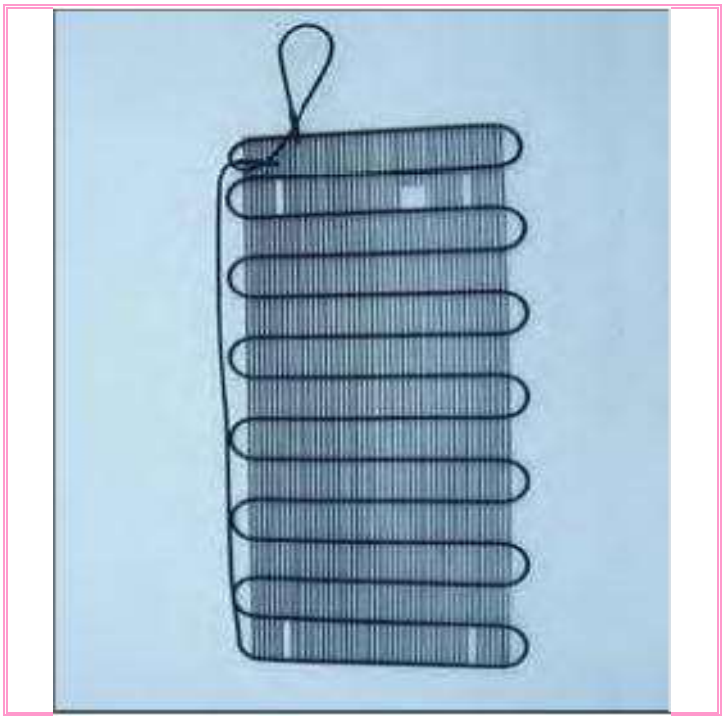
الشكل 8-1 درجة الحرارة في المكثف

2-8 المكثفات المبردة بالهواء Air Cooled Condensers

يستخدم الهواء في هذا النوع من المكثفات كوسيط تكثيف، إذ يمرر الهواء على السطح الخارجي للمكثف الذي يمر بداخله مائع التثليج ذو درجة الحرارة العالية. المكثفات المبردة بالهواء تكون عادة ذات زعانف **Fins** تعمل على زيادة المساحة السطحية لانتقال الحرارة من جهة الهواء، وتصنع الزعانف من مواد ذات معامل انتقال حرارة عالي مثل الألمنيوم والنحاس. كذلك يؤخذ بنظر الاعتبار عند تصميم الزعانف سلاسة انسياب الهواء على المكثف. ويمرر الهواء على المكثف بطريقتين هما الحمل الطبيعي والحمل الحثي (القسري) وعلى ضوئها تقسم هذه المكثفات إلى:

1- مكثفات الحمل الطبيعي (الحر) **Natural Convection Condensers**

تستخدم في أجهزة التثليج الصغيرة (الأجهزة المنزلية كالثلاجة والمجمدة)، لان سعتها التبريدية محدودة. إن كمية الهواء المار عبر المكثف ستكون قليلة لمروره بشكل طبيعي دون استخدام مراوح لتحريكه، مما يتطلب أن تكون مساحة سطح المكثف كبيرة. ولتوضيح ذلك لاحظ الشكل (8-2).



الشكل 8-2 مكثف حمل طبيعي

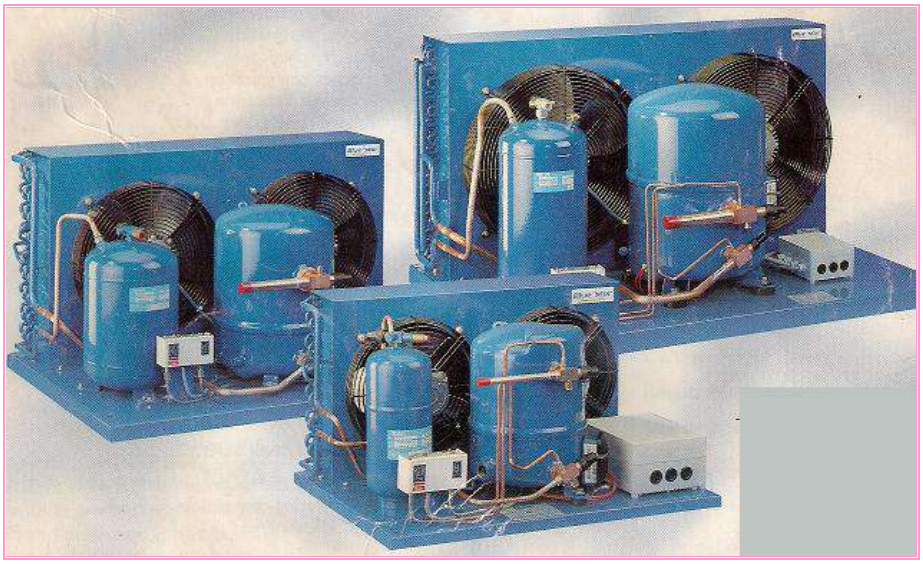
2- مكثفات الحمل القسري **Force Convection Condensers**

تستخدم في هذا النوع من المكثفات مراوح لتحريك الهواء عبر المكثف، كما هو موضح في الشكل (8-3). ويستخدم هذا النوع من المكثفات في المكيفات الجدارية (الشباكية) **Window Type**، برادات الماء، وبعض الثلاجات والمجمدات. كما أن مكثفات الحمل القسري تقسم أيضاً إلى نوعين، الأول يكون مجمعاً مع الضاغط في وحدة واحدة تدعى وحدة تكثيف **Condensing Unit**، والنوع الثاني يكون المكثف معزولاً عن وحدة التثليج.

الشكل 8-3 مكثف حمل قسري

عندما يجمع المكثف والضاغط في وحدة تكثيف واحدة نحصل على منظومة تثليج ذات أجزاء مجمعة صغيرة الحجم نسبياً، كما في الشكل (8-4) ويمكن استخدامها في بعض التطبيقات المنزلية والتجارية. أما المكثفات المعزولة عن وحدة التثليج فتركب على السطوح أو الجدران الخارجية.

إن المكثفات المبردة بالهواء تمتاز ببعض الخصائص منها، إمكانية التركيب خارج الحيز المبرد، إذ تستخدم معها مراوح لدفع كمية كبيرة من الهواء إذ إن المكثف يحتاج بحدود **500 لتر بالثانية لكل طن تثليج**، وأنها تحتاج إلى مساحة كبيرة لأن درجة حرارة الهواء تكون مرتفعة.

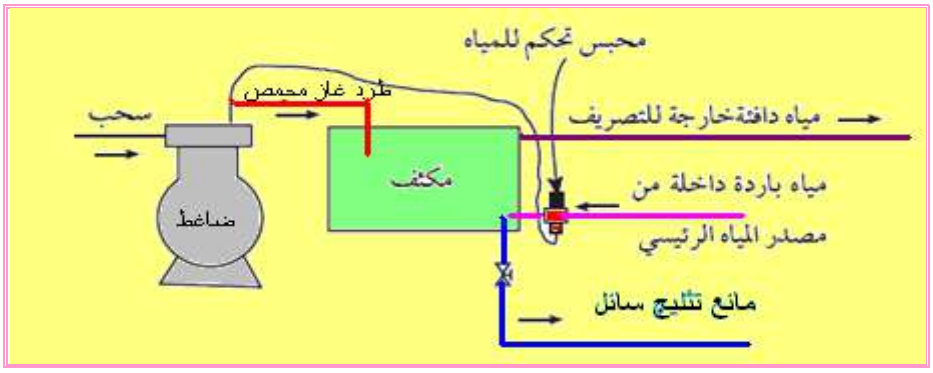


الشكل 8-4 وحدات تكثيف

3-8 المكثفات المبردة بالماء Water Cooled Condensers

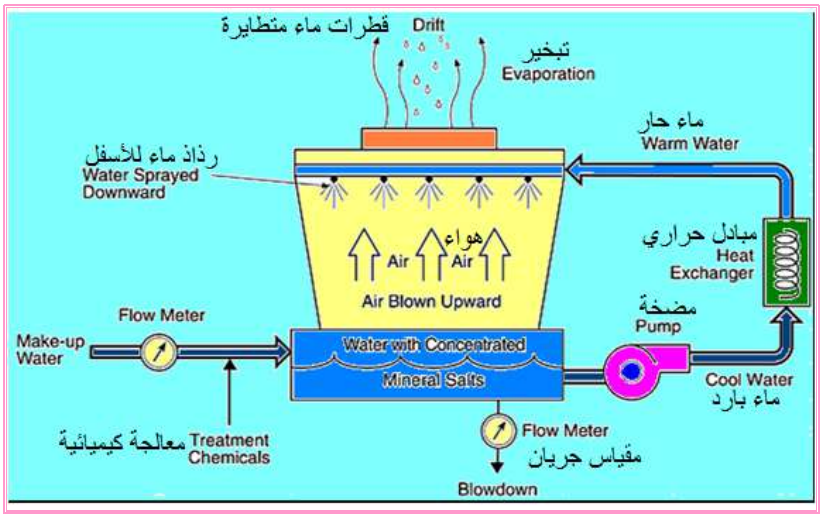
يكون الماء في هذا النوع من المكثفات وسيط التكثيف المستخدم، حيث تنقل الحرارة من مائع التثليج الساخن إلى الماء الذي يدخل المكثف بدرجة حرارة واطئة، ويخرج منه بدرجة حرارة أعلى من درجة حرارة الدخول. وتقسم هذه المكثفات حسب عملية تدوير الماء في المكثف الى:

1- الوحدات التي لا تعيد تدوير الماء فيها، والتي تسمى وحدات المرور لمرة واحدة، أو دورة التكثيف المفتوحة والشكل (8-5) يوضح هذه المنظومة، إن هذه المنظومة تستخدم اعتماداً على توفر المياه الصالحة وبأسعار منخفضة جداً وتستخدم غالباً في السفن البحرية أو وسائط النقل النهرية.



الشكل 8-5 دورة التكثيف المفتوحة

2- الوحدات التي يعاد تدوير الماء فيها، وهذا النوع هو الشائع الاستخدام في منظومات التثليج، وهنا يرسل وسيط التكثيف (الماء) بعد خروجه من المكثف إلى برج تبريد **Cooling Tower** ليُبرَّد (تخفيض درجة حرارته إلى القيمة المطلوبة) ويعاد استخدامه مرة أخرى، كما هو مبين بالشكل (8-6).



شكل 8-6 وحدة تكثيف يعاد تدوير الماء فيها باستعمال برج تبريد

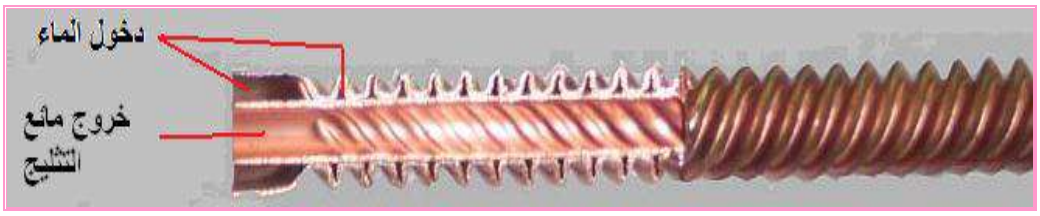
وبشكل عام تصنف المكثفات المبردة بالماء إلى **ثلاثة** أصناف أساسية هي:

1. **مكثفات الأنابيب المزدوجة**
2. **مكثفات الأسطوانة (الغلاف) والأنابيب**
3. **مكثفات الأسطوانة (الغلاف) والملف**

1-3-8 مكثفات الأنابيب المزدوجة Double Pipe Condensers

يتكون هذا النوع من المبادلات الحرارية من أنبوبتين متحدتي المركز إحداهما داخل الأخرى، وعادة ما يمر مائع التثليج في الأنبوبة الخارجية ويكون مساره من الأعلى إلى الأسفل، بينما يمر وسيط التكثيف (الماء) في الأنبوب الداخلي معاكساً لجريان مائع التثليج، وذلك لزيادة انتقال الحرارة بينهما. يمثل الشكل (8-7 أ) المكثف مزدوج الأنابيب ويبين الشكل (8-7 ب) مقطعا في أنابيب المكثف.

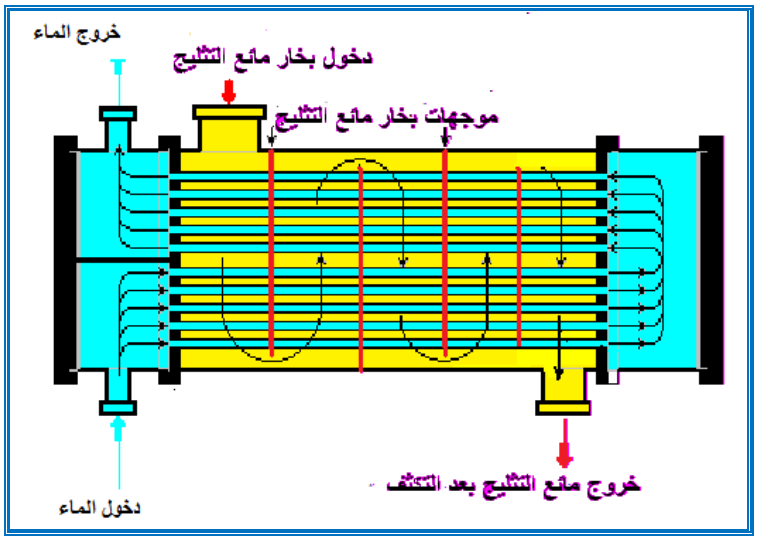
الشكل 8-7 أ مخطط لمكثف الأنابيب المزدوجة



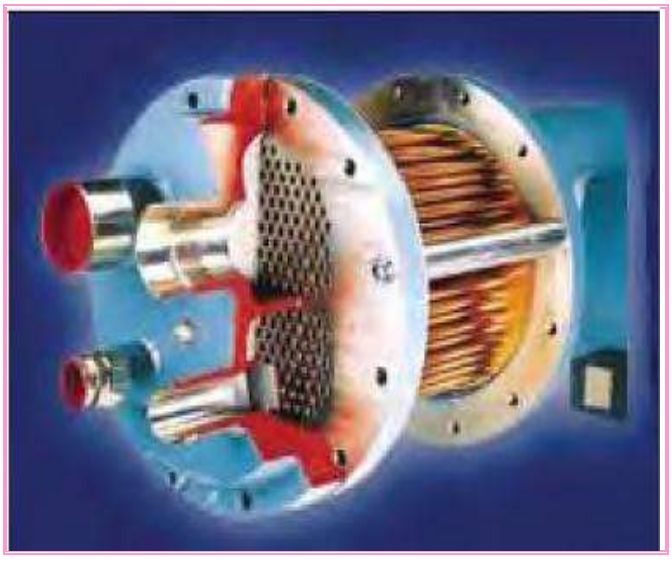
الشكل 8-7 ب مقطع في أنابيب المكثف مزدوج الأنابيب

8-3-2 مكثفات ذات الأسطوانة والأنابيب Shell and Tubes Condensers

يوضح الشكل (8-8) هذا النوع من المكثفات، إذ يدخل مائع التثليج من أعلى المكثف إلى باطن الأسطوانة ويتكاثف خارج الأنابيب التي يمر بداخلها الماء، متجمعا في قاع الغلاف، بينما يدخل الماء في الأنابيب من أحد الجوانب ويتحرك في عدة أنابيب من الأسفل إلى الأعلى، والمكثف المبين بالشكل (8-8 أ) يحتوي على مسارين فقط للماء، إن جوانب المكثف يمكن فتحها لإجراء عملية الصيانة وتنظيف الأنابيب التي يمر فيها الماء.



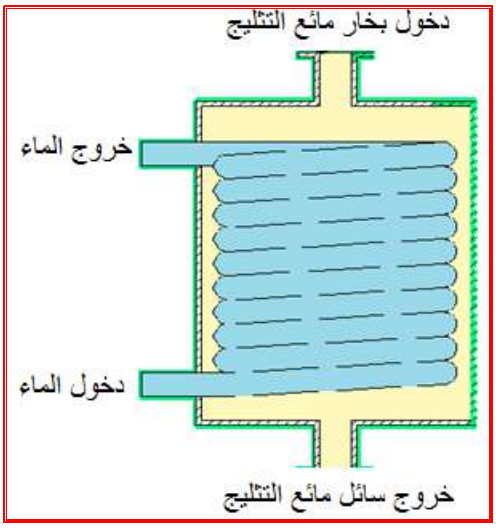
الشكل 8-8 أ رسم تخطيطي لمكثف ذو الغلاف والأنابيب



الشكل 8-8 ب مكثف الأسطوانة والأنابيب

3-3-8 مكثفات ذات الأسطوانة والملف Shell and Coil Condensers

في مكثفات ذات الأسطوانة والأنابيب يلاحظ بان الأنابيب تكون مستقيمة أفقياً أو عمودياً، أما هذا النوع من المكثفات فان الأنابيب تكون على هيئة ملف حلزوني واحد أو أكثر، وتكون الأنابيب بزعانف أو بدون زعانف. يمر الماء داخل ملف الأنابيب ويدخل مائع التثليج الى الأسطوانة من الأعلى ويتكاثف من خلال ملامسته لسطح الملف ثم يتجمع في أسفل الأسطوانة الذي غالباً ما يستخدم كخزان لتجميع سائل مائع التثليج. والشكل (8-9) يمثل رسماً تخطيطياً لهذا النوع من المكثفات. من الواجب ملاحظة أن هذا النوع من المكثفات يتطلب الدقة في عملية الشحن، لأن وجود كمية أكبر من المطلوب تسبب تجمع السائل في المكثف الذي قد يغطي جزءاً كبيراً من سطح الملف، وينتج عن هذا انخفاض في عملية انتقال الحرارة، مما يسبب زيادة درجة حرارة وضغط التصريف في المكثف. من سلبيات هذا النوع من المكثفات هي صعوبة التنظيف الميكانيكي، إذ إن التنظيف يتم من خلال تدوير سائل كيمياوي خلال ملفات المياه.



الشكل 8-9 مخطط توضيحي لمكثف الأسطوانة والملف

4-8 المكثفات التبخيرية Evaporative Condensers

في هذه المكثفات تتم عملية إزالة الحرارة من مائع التثليج من خلال استخدام الماء والهواء معا، ويبين الشكل (8-10) مخططاً توضيحياً لمقطع في مكثف تبخيري، إذ يتم سحب الماء من الحوض ويضخ من خلال رشاشات (**Nozzles**) ليتساقط على شكل قطرات أو رذاذ على سطح ملفات المكثف الخارجية ثم يسقط الماء إلى الحوض، وهكذا تتم عملية تدوير الماء.

أما عملية إمرار الهواء في المكثف التبخيري، فتكون بسحب الهواء الخارجي من الأسفل بوساطة مروحة ثم يطرح للخارج من الأعلى. أو أن توضع المروحة في الأعلى وتسحب الهواء من فتحات في أسفل المكثف ويقوم تيار الهواء المسحوب أو المدفوع في المكثف التبخيري بتبريد رذاذ الماء الذي يتجمع في حوض المكثف ليعاد تدويره ورشه مرة أخرى ماءً بارداً، وقد تستعمل المروحة فقط في المواسم المعتدلة لتكثيف بخار مائع التثليج دون الحاجة إلى الماء ويصبح عمله مثل عمل المكثف المبرد بالهواء. وفي كلتا الحالتين توضع مانعات رذاذ في طريق الهواء الخارج لمنع قطرات الماء من الخروج مع الهواء. من جانب آخر يمر مائع التثليج داخل ملفات المكثف، ويطرح الحرارة الى الهواء والماء فيتم تكثيف بخار مائع التثليج ويتحول إلى طور السائل.

الشكل 8-10 مخطط لمكثف تبخيري

5-8 أبراج التبريد Cooling Towers

ترتفع درجة حرارة الماء الخارج من المكثف في المكثفات المبردة بالماء. ومن أجل إعادة استخدامه يتم تبريدهُ في برج التبريد. إن مبدأ عمل برج التبريد يعتمد على عملية التبريد التبخيري، إذ يتبخر جزء من الماء في أثناء مروره بالبرج مسبباً انخفاض درجة حرارة الجزء المتبقي مـــن الماء (الماء الذي لا يتبخر).

تقسم أبراج التبريد حسب مبدأ العمل إلى:

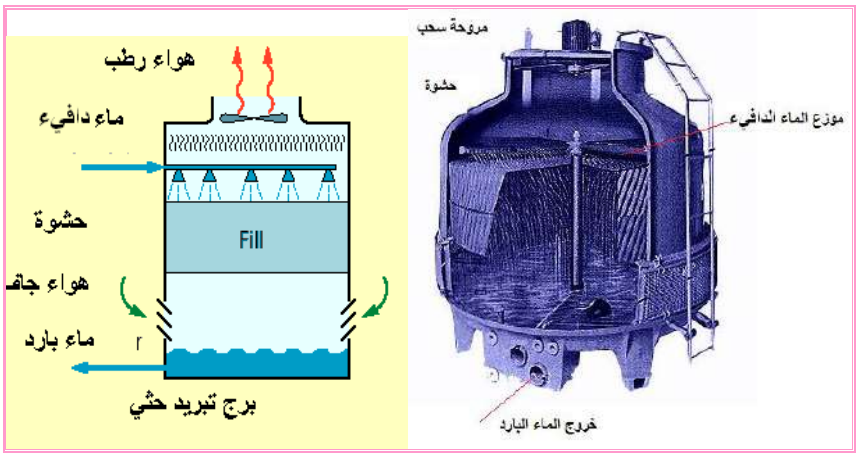
1- **أبراج التيار الطبيعي Natural Draft Cooling Tower**

إذ يمر الهواء عبر أجزاء البرج بالحمل الطبيعي متصاعداً من الأسفل إلى أعلى البرج دون الحاجة إلى مراوح، ولهذا تكون سرعة الهواء بطيئة، يتكون البرج من عدد من الطبقات على شكل رفوف مرتبة فوق بعضها البعض يمر من خلالها الهواء من الأسفل إلى الأعلى. أما الماء فيدور من خلال مضخة، وكما هو مبين بالشكل (8-11)، إذ يلاحظ أن محيط البرج السفلي يكون مفتوحاً للسماح للهواء بالدخول من جميع الاتجاهات.

الشكل 8-11 برج تبريد ذو سحب طبيعي

2– أبراج السحب الحثي (القسري) Forced Draft Cooling Tower

يكون مرور الهواء في هذا النوع من الأبراج من خلال استخدام مراوح مناسبة، توضع المراوح على جوانب أو أسفل البرج لدفع الهواء من خلاله، أو يتم وضعها في أعلى البرج لتقوم بسحب الهواء من خلال البرج، ويوضح الشكل (8-12) نموذج برج تبريد حثي.



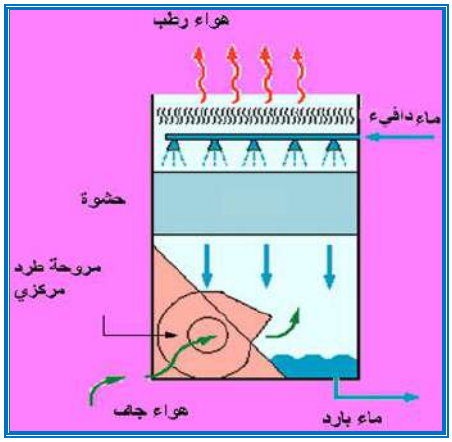
الشكل 8-12 برج تبريد ذو سحب قسري

كما يمكن تصنيف أبراج التبريد الحثية على أساس تدفق الهواء الى نوعين:

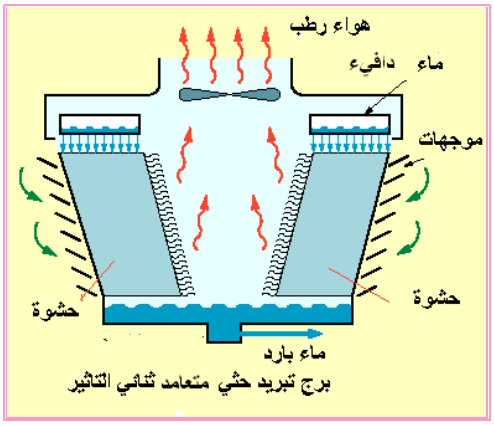
الأول **برج تبريد ذو تدفق متعاكس Counter Flow**، كما هو موضح في الشكل (8-13)، حيث ينزل الماء على شكل رذاذ من الأعلى الى الأسفل، يقابله جريان الهواء بشكل معاكس. إن هذا النوع من الأبراج يحتاج الى حيز أفقي قليل وارتفاع كبير.

أما النوع الثاني فهو **برج التبريد ذو التدفق المستعرض Cross Flow**، يكون فيه اتجاه جريان الهواء متعامداً مع اتجاه سقوط الماء، وهذا يتطلب ارتفاعاً أقل من الأول، كما هو موضح بالشكل (8-14).

إن أبراج التبريد القسري تمتاز عن الأبراج الطبيعية بمرونة التركيب في مواقع مختلفة، وإشغالها مساحة أقل وحجماً أصغر بكثير لكونها ذات قدرة عالية على التبريد ولكن كلفتها التشغيلية تكون أكبر بسبب وجود محركات المراوح. وبشكل عام يجب معالجة الماء قبل الدخول إلى برج التبريد من خلال إضافة كميات منتظمة من الكلور والمضافات الكيمياوية الأخرى، لمنع نمو بعض الكائنات الحية (الطحالب، البكتريا والفطريات)، لأن نموها يؤدي إلى عرقلة تدفق الماء وانخفاض في كفاءة البرج وكذلك لمنع التكلس.



الشكل 8-13 برج تبريد قسري متعاكس



الشكل 8-14 برج تبريد قسري متعامد

أسئلة الفصل الثامن ـ الجزء الأول

س1: ما هي مصادر حرارة مائع التثليج في المكثف؟

س2: ما أنواع المكثفات المستخدمة في وحدات التثليج؟ وما أساس تصنيفها؟

س3: اذكر مراحل عملية فقدان الحرارة من مائع التثليج في المكثف، موضحاً ذلك بالرسم.

س4: عدد أنواع المكثفات المبردة بالهواء واذكر خصائصها.

س5: اذكر ثلاثة أصناف أساسية للمكثفات المبردة بالماء.

س6: قارن بين دورتي التكثيف المفتوحة والمغلقة.

س7: علل ما يأتي:

أ- المكثفات المبردة بالهواء تكون عادة مزعنفة ومصنوعة من مواد ذات معامل انتقال حرارة عالي.

ب- مكثف الحمل القسري يكون أصغر حجماً من مكثف الحمل الطبيعي.

ت- المكثفات من نوع الوحدات التي يعاد تدوير الماء فيها هي النوع الشائع الاستخدام في دورات التثليج.

ث- استخدام أبراج التبريد في منظومات التثليج ذات السعات الكبيرة.

ج- في مكثفات الأنابيب المزدوجة، يكون جريان وسيط التكثيف عكس جريان مائع التثليج.

ح- تُعد عملية نفث الماء ضرورية في المكثفات التبخيرية وأبراج التبريد.

خ- معالجة الماء قبل تزويده لبرج التبريد.

د- تفضل أبراج التبريد الحثي على الأبراج الطبيعية في دورات التثليج.

س8: وضّح بالرسم دورة التكثيف المغلقة.

س9: عدد أنواع المكثفات المبردة بالماء وأشرح واحدة منها.

س10: وضّح بالرسم مكثفاً ذا الأسطوانة والأنابيب، مبيناً اتجاه جريان مائع التثليج ووسيط التكثيف.

س11: قارن بين مكثفات ذات الأسطوانة والأنابيب مع مكثفات ذات الأسطوانة والملف.

س 12: اشرح مستعيناً بالرسم التوضيحي المكثف التبخيري.

س13: اشرح مكونات أبراج التبريد للسحب الحثي موضّحاً ذلك بالرسم.

ثانياً: المبخرات Evaporators

6-8 مقدمة Introduction

المبخر هو أحد الأجزاء الأساسية من دورة التثليج الذي يتم فيه امتصاص الحرارة من الحيز المراد تبريده، إذ يتبخر مائع التثليج المار بداخل ملفات أو أنابيب المبخر بدرجة حرارة وضغط منخفضين، إن حرارة التبخر التي يمتصها مائع التثليج من خلال جدران أنابيب أو ملفات المبخر يكون مصدرها الحيز أو الوسط المطلوب تبريده. إذ إن التبادل الحراري يؤدي إلى غليان مائع التثليج متحولاً إلى بخار مشبع أو محمص، ونتيجة لهذه العملية تنخفض درجة حرارة الحيز أو الوسط المراد تبريده.

إن المبخرات المستخدمة تصمم بأشكال مختلفة تصنع من مواد ذات مواصفات معينة ويتم اختيار المواد وفق شروط خاصة منها، جودة التوصيل الحراري وعدم التآكل وتحمل الضغوط التشغيلية. واعتمادا على هذه الشروط يتم اختيار مائع التثليج المناسب في الدورة الانضغاطية. وبشكل عام يتم تصنيف المبخرات بالشكل الآتي:

أ- حسب عملية انتقال الحرارة من الوسط المراد تبريده إلى السطح الخارجي لملف المبخر. وعليه تقسم المبخرات إلى مبخرات الحمل الطبيعي وفيها تعتمد عملية انتقال الحرارة على حركة الوسط الذي تتكون فيه بسبب اختلاف كثافته وهو أما هواء أو ماء أو سائل آخر. أو مبخرات الحمل القسري، وهنا تكون حركة الوسط بسبب قوة خارجية محركة للوسط، مثل المراوح للغازات أو المضخات للسوائل.

ب- جريان مائع التثليج داخل أو خارج أنابيب المبخر. لأن عملية انتقال الحرارة خلال مرحلة غليان المائع تختلف عندما يكون المائع داخل الأنابيب عنها إذا كان خارج الأنابيب.

ج- ظروف أسطح انتقال الحرارة، هنا يعتمد على حالة مائع التثليج داخل المبخر، فإذا كان سائلاً يغطي السطح الداخلي للأنابيب فتسمى مبخرات مغمورة **Flooded Evaporators**، وإذا كان المبخر يستخدم لعملية تحميص بخار المائع إضافة إلى تبخره فتسمى مبخرات جافة **Evaporators Dry**.

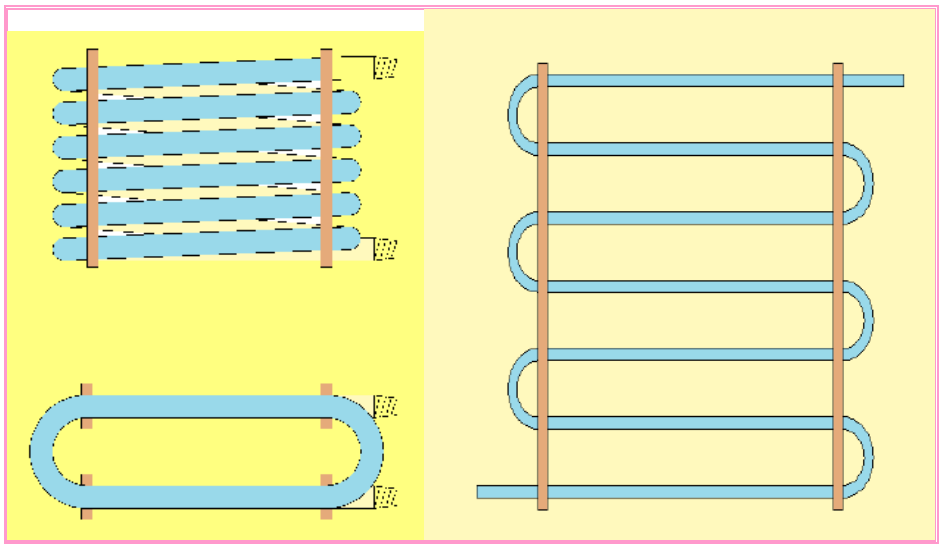
وهنا سيتم التطرق وبإيجاز إلى المبخرات مصنفة اعتماداً على نوع الوسط المراد تبريده، إلى مبخرات لتبريد الهواء وأخرى لتبريد الماء أو سوائل أخرى.

7-8 المبخرات المبردة للهواء Air Cooling Evaporators

يكون الهواء في هذا النوع من المبخرات هو الوسط المراد تبريده. إذ يمر الهواء على جدران أنابيب ملف التبريد الخارجية بينما يكون مائع التثليج ماراً داخل هذه الأنابيب. وبهذا تُسحب الحرارة الكامنة لتبخر مائع التثليج من الهواء مسببةً انخفاض درجة حرارته، وتكون هذه المبخرات بعدة أنواع حسب التكوين أو الإنشاء. منـــها المبخرات ذات الأنابيب غير المزعنفة (الملساء)، مبخرات ذات الصفائح (السطح اللوحي)، ومبخرات الأنابيب المزعنفة.

1-7-8 المبخرات ذات الأنابيب غير المزعنف (الملساء) Not-Finned Pipe Evaporators

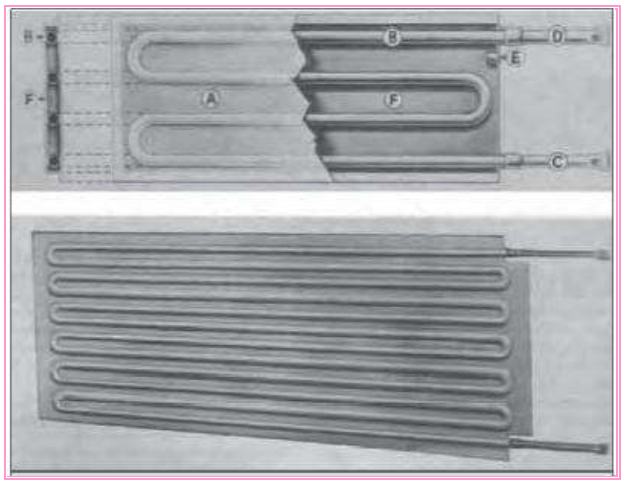
يبين الشكل (8-15) نموذجاً من هذا النوع من المبخرات، المتكونة من أنابيب غير مزعنفة والمصنعة من معادن تلائم مائع التثليج المستخدم (مثلاً في منظومات التثليج المستخدمة للأمونيا تكون مصنعة من الفولاذ وللموائع الهيدروكاربونية المهلجنة تصنع من النحاس). إن أشكال الأنابيب يمكن أن تكون بيضوية، ملتوية أو حلزونية، ويمكن أن تستخدم مع مراوح أو بدون مراوح.



الشكل 8-15 المبخرات ذات الأنابيب غير المزعنفة (الملساء)

8-7-2 المبخرات اللوحية (ذات الصفائح) Plate Evaporators

يصنع هذا النوع من المبخرات من لوحين معدنيين يترك بينهما فراغ لمرور مائع التثليج، كما هو الحال في مبخرات الثلاجات المنزلية. ويمتاز هذا النوع بسهولة التشكيل والتنظيف إضافة الى اقتصادية الإنتاج. كما يمكن أن يصنع على شكل أنبوبة ملتوية بين اللوحين المعدنيين مثبتة بإحكام (ملحومة) لتحقيق تلامس جيد ولتسهيل عملية انتقال الحرارة بين مائع التثليج والسطح الخارجي للمبخر، كما في مبخرات ثلاجات الشاحنات. من الممكن استخدام هذا النوع من المبخرات كرفوف في غرف ثلاجات العرض، والشكل (8-16) يمثل صورة ومقطعاً في المبخرات ذات الصفائح.



الشكل 8-16 مبخرات لوحية

8-7-3 المبخرات المزعنفة Finned Pipe Evaporators

في هذا النوع من المبخرات، يثبت على السطح الخارجي لملف الأنابيب المكونة للمبخر زعانف معدنية رقيقة **Fins** (غالباً ما تكون مصنوعة من الألمنيوم). تعمل الزعانف على زيادة مساحة التبادل الحراري في الجهة التي يمر بها الوسط المراد تبريده، وبالنتيجة يزداد التبادل الحراري بين مائع التثليج والوسط المراد تبريده. ويمتاز هذا النوع من المبخرات بصغر الحجم وكذلك صغر الحيز الذي تشغله مقارنة بالأنواع آنفة الذكر. الشكل (8-17) يمثل هذا النوع من المبخرات.

الشكل 8-17 مبخر مزعنف

8-8 المبخرات المبردة للسوائل Liquid Cooling Evaporators

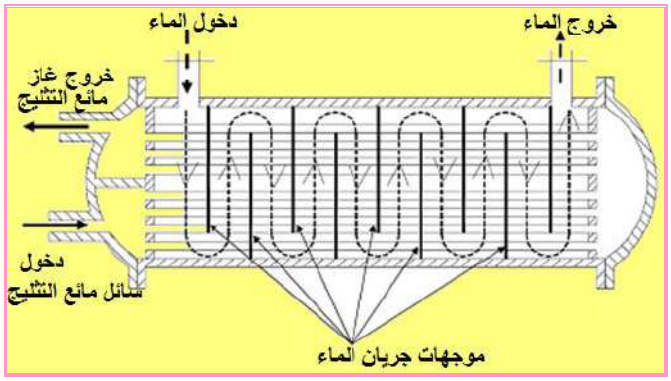
تدعى المبخرات المستخدمة لتبريد السوائل بمبردات السوائل **Liquid Coolers** أو مثلجات السوائل **Liquid Chillers**، وفي هذا النوع من المبخرات غالبا ما يكون السائل ماءً أو محلولاً ملحياً أو أي سائل ملائم للوسط المراد تبريده، إذ يمر السائل على جدران أنابيب ملف التبريد الخارجية بينما يكون مائع التثليج ماراً داخل هذه الأنابيب، وبهذا تسحب الحرارة الكامنة لتبخر مائع التثليج من السائل المراد تبريده مسببة انخفاض درجة حرارته. وهنالك أنواع من مبردات السوائل منها مبخرات التمدد الجاف، مبخرات ذات الملف المغمور ومبخرات مزدوجة الأنابيب.

8-8-1 مبخرات التمدد المباشر Direct Expansion Coil (D-X)

تسمى أحيانا بملفات التمدد الجاف **Dry Expansion**، وتتكون من أنابيب مستقيمة مرتبة في صفوف. يتم عملها بدخول مائع التثليج عبر أداة التمدد بكمية محددة لضمان تبخرهِ كاملاً نتيجة امتصاصه الحرارة من الوسط المراد تبريدهُ. ويمتاز هذا النوع بكونه قليل التكلفة، وتكون مشاكل إرجاع الزيت للضاغط قليلة، وكذلك تكون كمية مائع التثليج قليلة.

ويبين الشكل (8-18) مبخر تمدد مباشراً أو جافاً، بينما يبين الشكل (8-19) مخططاً لمبخر تمدد مباشر من نوع الأسطوانة والأنابيب **Shell and Tubes** موضحاً عليه مداخل ومخارج كل من مائع التثليج والماء. كما يلاحظ من الشكل وجود الحواجز **Baffles** التي توجه جريان الماء.

الشكل 8-18 مبخر تمدد مباشر (جاف)



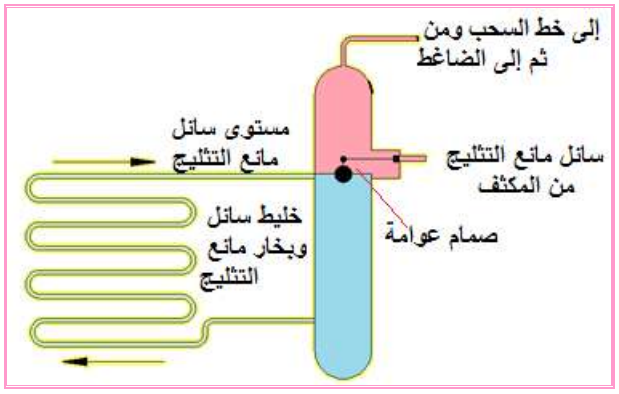
الشكل 8-19 مخطط مبخر تمدد مباشر نوع الأسطوانة والأنابيب

2-8-8 المبخرات ذات الملف المغمور Flooded Coil Evaporators

وتسمى أحياناً بالمبخرات المطّفحة، وتأتي هذه التسمية من وجوب أن تكون ملفات المبخر مملوءة بسائل مائع التثليج. وتتكون من خزان وملف، وتتم عملية التحكم بكمية مائع التثليج من خلال استخدام صمام عوامة (طوافة) في أعلى الخزان للمحافظة على مستوى السائل في المبخر. ويبين الشكل (8-20) مخططاً لهذا النوع من المبخرات، وتستخدم هذه المبخرات اعتيادياً لتبريد الماء أو المحاليل الملحية.

يخرج مائع التثليج في هذا النوع من المبخرات من المبخر على شكل بخار مشبع، ويتطلب وجوب وضع حاجز في أعلى خزان السائل لمنع قطرات من السائل من الخروج الى الضاغط وإتلافه.

كما يمكن أن يكون سائل مائع التثليج خارج الأنابيب (داخل غلاف المبخر) فتكون الأنابيب التي تحوي السائل المطلوب تبريدهُ مغمورةً بسائل مائع التثليج. وتتم المحافظة على مستوى سائل مائع التثليج داخل غلاف المبخر بواسطة صمام بعوامة، إذ يترك حيزاً أعلى من مستوى السائل لفصل البخار الناتج عن عملية التبخر.



الشكل 8-20 مخطط مبخر بملف مغمور

3-8-8 مبخرات مزدوجة الأنابيب Double Pipe Evaporators

إن عمل هذه المبخرات مشابه لعمل المكثفات مزدوجة الأنابيب التي مر ذكرها آنفاً. والشكل (8-21) يوضح ذلك جلياً. إذ يلاحظ من الشكل فتحات الدخول والخروج لمائع التثليج والماء المطلوب تبريده.

يتألف هذا النوع من المبخرات من أنبوبتين متمركزتين إحداهما داخل الأخرى، يجري مائع التثليج في الأنبوب الخارجي بينما يجري السائل المراد تبريده (ماء أو محلول ملحي) خلال الأنبوب الداخلي باتجاه معاكس لجريان مائع التثليج.

الشكل 8-21 مبخر مزدوج الأنابيب

أسئلة الفصل الثامن – الجزء الثاني

س1: اذكر أسس تصنيف المبخرات.

س2: ما الفرق بين مبخرات الحمل الطبيعي ومبخرات الحمل القسري؟

س3: اذكر ثلاثة شروط خاصة باختيار معادن المبخرات.

س4: عدد أنواع المبخرات المبردة للهواء واشرح واحدة منها.

س5: اشرح مع الرسم مبدأ عمل المبخر المغمور.

س6: اشرح مع الرسم مبدأ عمل مبخر مزدوج الأنابيب.

س7: علل ما يأتي:

أ- استخدام صمام بطوافة مع المبخرات المغمورة.

ب- يثبت مبخر الحمل الطبيعي في مكان مرتفع في الحيز المبرد.

ت- انخفاض درجة حرارة الهواء عند مروره على المبخر.

ث- وجود الحواجز في مبخرات الأسطوانة والأنابيب.

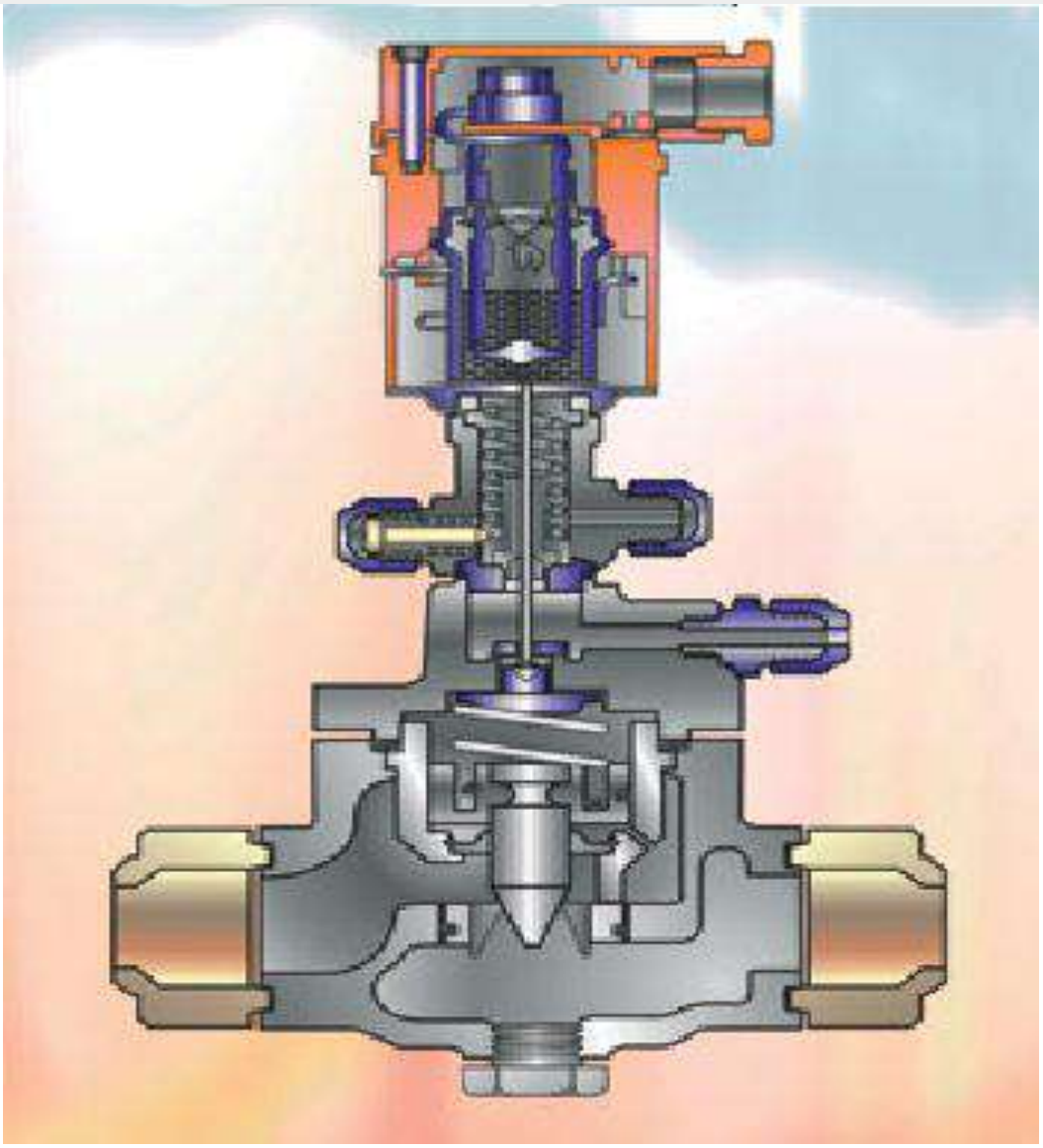
ج- وجوب وضع حاجز على خزان السائل في المبخرات المغمورة.

ح- استخدام الزعانف في جهة الهواء في المبخرات المبردة للهواء.

الفصل التاسع

أدوات التمدد

Expansion Devices



أدوات التمدد Expansion Devices

1-9 مقدمة Introduction

أدوات التمدد هي أحدى الأجزاء الرئيسة لدورة التثليج، التي تعمل على تخفيض الضغط العالي في المكثف إلى الضغط الواطئ في المبخر للحصول على درجة الحرارة الواطئة المناظرة لضغط المبخر. وكذلك تقوم بعملية تنظيم انسياب مائع التثليج إلى المبخر مساوياً لمعدل تبخر مائع التثليج في المبخر على ضوء الحمل الحراري. إن عملية التحكم في أنسياب مائع التثليج تؤدي إلى المحافظة على فرق الضغط لدورة التثليج، ليسمح للمائع بالتبخر بالمبخر والتكثف بالمكثف. وتقسم أدوات التمدد بشكل أساسي إلى الأنبوب الشعري، الصفيحة المثقوبة، وصمامات التمدد. إن صمامات التمدد كثيرة فمنها اليدوية، الميكانيكية، الحرارية، والإلكترونية، والأنواع شائعة الاستخدام هي:

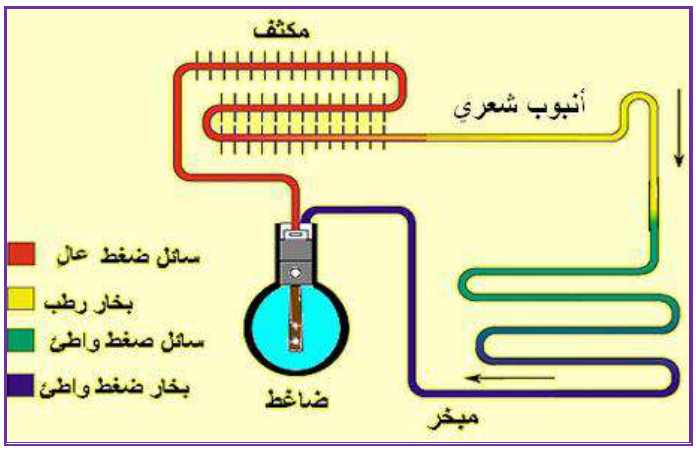
1. صمام التمدد الآلي (الأوتوماتيكي) Automatic Expansion Valve
2. صمام التمدد الحراري Thermal Expansion Valve
3. صمام التمدد اليدوي Manual Expansion Valve
4. طوافة الضغط العالي High Pressure Float
5. طوافة الضغط الواطئ Low Pressure Float
6. صمامات التمدد الإلكترونية Electronic Expansion Valves

وسيتم في هذا الفصل التطرق لبعضها.

2-9 الأنبوب الشعري Capillary Tube

الأنبوب الشعري عبارة عن أنبوب ذي قطر ثابت صغير(0.3-3 ملم)، وطول محدد يصل بين المكثف والمبخر في دورة التثليج، وهو من أدوات التمدد شائعة الاستخدام في الثلاجات والمجمدات المنزلية وأجهزة تكييف الهواء الشباكية والمنفصلة. وبشكل عام يستخدم مع المنظومات ذات السعات القليلة. والشكل (9-1) يوضح الأنبوب الشعري وموقعه في دورة انضغاط البخار البسيطة.

إن انخفاض الضغط خلال الأنبوب الشعري يكون بسبب الاحتكاك أساساً بين مائع التثليج والسطح الداخلي لجدران الأنبوب. وبالنظر إلى العلاقة الطردية بين مقاومة الاحتكاك وفرق الضغط بين طرفي الانبوب، يقوم الانبوب الشعري كذلك بالتحكم بمعدل الانسياب لسائل مائع التثليج من المكثف إلى المبخر، وأن معدل الانسياب يتناسب مع فرق الضغط. وحسب مبادئ ميكانيك الموائع، فإن فرق الضغط لمعدل انسياب محدد يتناسب طردياً مع طول الأنبوب وعكسياً مع قطره الداخلي.



الشكل 9-1 ربط الأنبوب الشعري

إن أي زيادة في فرق الضغط ينتج عنها زيادة في مقاومة الاحتكاك. وبما أن الضاغط والأنبوب الشعري مربوطان على التوالي ضمن منظومة التثليج، ولكي تعمل المنظومة بكفاءة وأتزان عند ظروف التشغيل، فعند درجتي حرارة التبخير والتكثيف التصميمية، يلزم أن يكون طول وقطر الأنبوب يحقق معدل انسياب مساوٍ لمعدل ضخ الضاغط عند نفس ظروف التشغيل.

ويعطي الجدول (9-1) بعض مقاسات الانابيب الشعرية لاجهزة التثليج المنزلية وعلاقتها بقدرة الضاغط. ومن خصائص الأنبوب الشعري المستخدم كأداة تمدد ما يأتي:

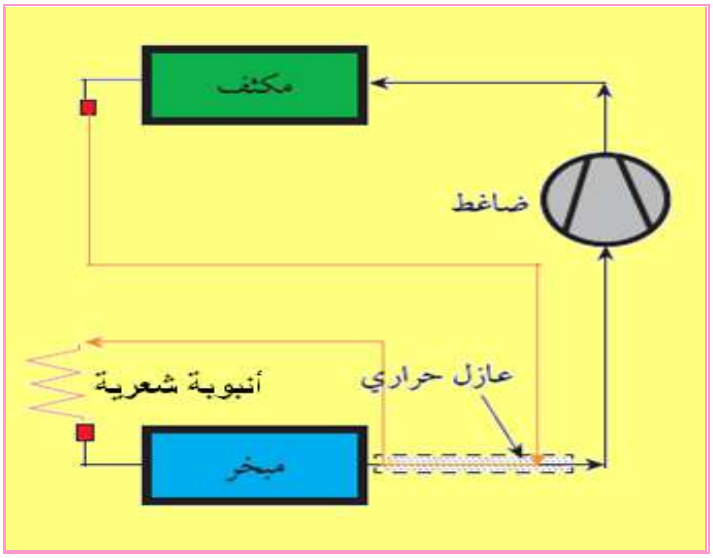
1- سهل التصنيع والتوصيل وقليل التكاليف، كما أنه لايحتوي على أجزاء متحركة.

2- إن كمية مائع التثليج في المنظومات التي تحتوي أنبوب شعري، تكون حرجة.

3- يحتاج إلى عزم دوراني ابتدائي منخفض لتشغيل الضاغط، وذلك لتعادل الضغط عند توقف الضاغط خلال فترة وجيزة.

4- تجهز المنظومات التي تعمل بأنبوب شعري عادة (بمجفف – مرشح) **Filter-Dryer** في مجرى السائل الداخل للأنبوب الشعري لمنع الرطوبة والمواد الغريبة من الدخول إليه.

ويمكن أن يعمل الأنبوب الشعري مع خط السحب كمبادل حراري، فمن خلال هذا المبادل يمكن أن تزداد الكفاءة التبريدية للمنظومة والتخلص من بخار مائع التثليج داخل الأنبوب قبل دخوله المبخر، ويتم ذلك من خلال تماس مباشر بين خط سحب الغاز للضاغط والأنبوب الشعري، وكما هو موضح بالشكل (9-2). إذ يتم التبادل الحراري بين الأنبوب الشعري وخط السحب، فتنتقل الحرارة من الأنبوب الشعري الساخن إلى أنبوب السحب البارد، فيتم تكثيف ما قد يوجد من بخار داخل الأنبوب الشعري، مصاحباً لتبخير بقايا السائل في أنبوب السحب.



الشكل 9-2 الأنبوب الشعري كمبادل حراري

جدول 9-1 أطوال الأنابيب الشعرية المستخدمة مع مائع التثليج R-134a

Q_{ASH}	M	Capillary tube length (m)													
		Capillary tube internal diameter (mm) & Evaporating temperature (°C)													
		0,6		0,7		0,8		0,9		1		1,2		1,5	
kcal/h	kg/h	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3
75	1,69	2,81	2,96												
80	1,80	2,47	2,60												
85	1,91	2,18	2,31												
90	2,03	1,95	2,06												
95	2,14	1,75	1,85												
100	2,25	1,58	1,67												
105	2,36	1,43	1,52	3,30	3,48										
110	2,48	1,30	1,38	3,00	3,17										
115	2,59	1,19	1,26	2,74	2,90										
120	2,70	1,10	1,16	2,52	2,66										
125	2,82	1,01	1,07	2,32	2,45										
130	2,93			2,14	2,26										
140	3,15			1,85	1,95	3,82	4,04								
150	3,38			1,61	1,70	3,32	3,51								
160	3,60			1,41	1,49	2,91	3,08								
170	3,83			1,25	1,32	2,58	2,72								
180	4,05			1,11	1,17	2,29	2,42								
190	4,28					2,06	2,17	3,90	4,12						
200	4,50					1,85	1,95	3,52	3,71						
210	4,73					1,68	1,77	3,18	3,36						
220	4,95					1,53	1,61	2,90	3,06						
230	5,18					1,39	1,47	2,65	2,79						
240	5,41					1,28	1,35	2,43	2,56	4,29	4,56				
250	5,63						1,24	2,23	2,36	3,94	4,19				
275	6,19							1,84	1,94	3,25	3,45				
300	6,76							1,54	1,63	2,72	2,89				
325	7,32								1,38	2,31	2,45				
350	7,88								1,19	1,98	2,10				
375	8,45								1,03	1,72	1,83				
400	9,01										1,60	4,11	4,34		
425	9,57										1,41	3,63	3,83		
450	10,14										1,26	3,22	3,40		
475	10,70										1,13	2,88	3,04		
500	11,26										1,01	2,59	2,73		
525	11,82											2,34	2,47		
550	12,39											2,13	2,24		
575	12,95											1,94	2,05		
600	13,51											1,78	1,87		
650	14,64												1,59		
700	15,77												1,36	4,38	4,61
750	16,89												1,18	3,79	4,00
800	18,02												1,03	3,30	3,49
850	19,14													2,91	3,07
900	20,27													2,58	2,72
950	21,40													2,30	2,42
1000	22,52													2,06	2,18

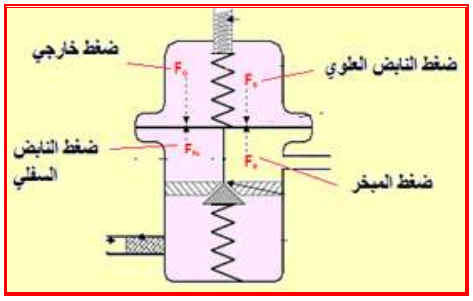
3-9 صمام التمدد الآلي (الاوتوماتيكي) Automatic Expansion Valves

لاحظ من الشكل (3-9) الذي يمثل مخططاً لصمام التمدد الآلي أن هذا الصمام يتكون أساسا من صمام إبري **Needle** ومقعد يحتوي على فتحة **Orifice** وحاجز مرن (الرق) **Diaphragm** وكذلك النابض **Spring** الذي يمكن التحكم بقوة شدهِ بواسطة لولب **Screw**، كما يحتوي الصمام على مصفاة **Strainer** عند فتحة دخول السائل لمنع دخول المواد التي قد تسبب انسداد الصمام، كما أن الشكل (4-9) يوضح مقطعاً في صمام التمدد الآلي الحقيقي.

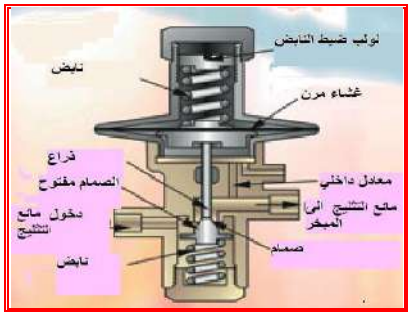
يعمل الصمام تلقائياً لتنظيم جريان مائع التثليج إلى المبخر، بحيث يبقى ضغط المبخر ثابتاً بغض النظر عن الحمل الحراري المسلط عليه، إن عمل الصمام يعتمد على القوى المؤثرة على الحاجز المرن والموضحة في الشكل (9-3)، وهذه القوى هي ضغط المبخر وضغط النابض. فإذا انخفض ضغط المبخر نتيجة انخفاض الحمل الحراري على المبخر، فضغط النابض سيكون أكبر من ضغط المبخر مما سيؤدي إلى حركة الحاجز المرن باتجاه غلق فتحة الصمام ويقل معدل جريان مائع التثليج إلى المبخرإلى أن يحدث التوازن مرة اخرى.

أما في حالة زيادة الحمل الحراري والذي يسبب زيادة ضغط المبخر، فان الصمام سيتحرك باتجاه الفتح ليزداد جريان السائل إلى المبخر، إلى أن يعاد التعادل بين ضغط المبخر وضغط النابض.

يُعد الصمام الأوتوماتيكي ذا كفاءة منخفضة بالمقارنة مع الصمامات الأخرى، وذلك بسبب كونهِ محدداً بضغط المبخر مما يحدد معدل التبخر داخل المبخر، وقد يسبب وصول كمية من السائل إلى خط السحب مما قد يسبب ضرراً للضاغط عند انخفاض حمل المبخر، أو يكون محدداً لسعة المنظومة ويقلل كفاءتها عند زيادة حمل المبخر.



شكل 9-3 مقطع في صمام تمدد آلي



الشكل 9-4 صمام آلي

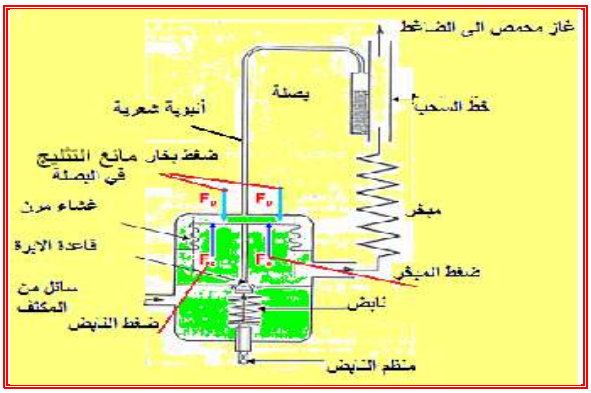
4-9 صمام التمدد الحراري Thermostatic Expansion Valve

يتحكم هذا الصمام بتدفق مائع التثليج السائل الى المبخر عن طريق المحافظة على درجة حرارة تحميص ثابتة عند مخرج المبخر. إن المحافظة على فرق درجات الحرارة بين مائع التثليج الخارج من المبخر ودرجة حرارة التشبع عند ضغط المبخر، تحقق أكبر إستفادة ممكنة من سطح المبخر. يمثل الشكل (9-5) صورة توضيحية لصمام حراري، أما الشكل (9-6) فيمثل رسماً تخطيطياً للصمام الحراري ويوضح أجزاء الصمام وتركيبه الداخلي وأجزاؤه الأساسية وهي: **إبرة ومقعد**، **رق**، **ونابض** يمكن التحكم بقوة شده عن طريق لولب، وبصلة **Bulb** تحتوي على كمية من مائع التثليج الذي غالباً ما يكون من نفس المائع المستخدم في المنظومة إلا في بعض الحالات.

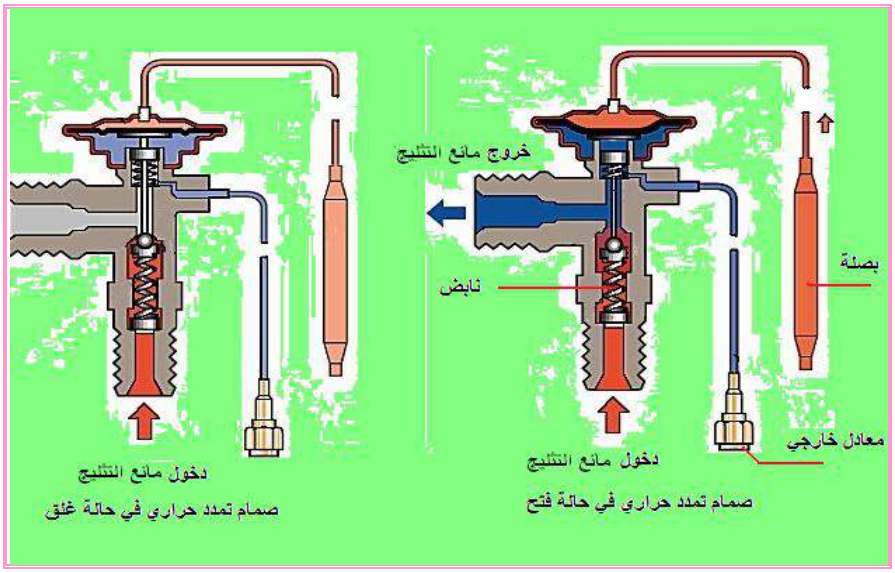
تتصل البصلة بالجزء العلوي للرق بواسطة أنبوب شعري، وتربط البصلة بشكل جيد على خط السحب بعد المبخر مباشرةً، لكي تتاثر بدرجة حرارة بخار مائع التثليج في منطقة الربط. كما تركب مصفاة عند فتحة دخول السائل إلى الصمام لمنع دخول الدقائق التي قد تؤثر على عمل الصمام.

تعتمد حركة الصمام للتحكم بجريان مائع التثليج الداخل للمبخر على ثلاث قوى كما هو مبين في الشكل (9-6) وهي **ضغط المبخر**، **ضغط النابض**، **وضغط البخار المشبع** الناتج من الوسيط الموجود في البصلة. حيث يؤثر ضغط النابض وضغط المبخر على الرق من الأسفل باتجاه غلق الصمام، أما ضغط البخار في البصلة فيكون من الاعلى باتجاه فتح الصمام، أما عند توقف الضاغط فيتعادل ضغط المبخر مع ضغط مائع التثليج في البصلة، ولهذا يعمل ضغط النابض على أقفال الصمام. ويبين الشكل (9-7) صمام تمدد حراري في حالتي الفتح والغلق.

الشكل 9-5 صمام التمدد الحراري



الشكل 9-6 رسم تخطيطي لصمام تمدد حراري



شكل 9-7 صمام تمدد حراري في حالة فتح وآخر في حالة غلق

5-9 صمام التمدد اليدوي Hand Expansion Valve

يمثل الشكل (9-8) صمام التمدد اليدوي الذي يُعد من أقدم أنواع الصمامات المستخدمة في مجال التثليج لتنظيم انسياب مائع التثليج، إذ يتحكم يدويا بالانسياب للمائع من خلال إبرة الصمام في فتحة الخروج من الصمام عن طريق ساق مسننة. يستخدم هذا النوع في بعض منظومات التثليج الصناعية الكبيرة (مثال ذلك منظومة الامونيا في معامل صنع الثلج). ولا يستخدم في الأجهزة المنزلية أو المنظومات التي تتعرض لتغير سريع في الحمل الحراري.

الشكل 9- 8 صمام تمدد يدوي

6-9 الصفيحة المثقوبة Orifice Plate

تستعمل الصفيحة المثقوبة مع الوحدات ذات السعات الكبيرة والتي يستخدم فيها الضاغط النابذ (الطرد) المركزي والضواغط الدوارة، حيث تكون معدلات تدفق مائع التثليج كبيرة جداً، وقد تستعمل صفيحة مثقوبة واحدة أو مجموعة متتالية منها موضوعة داخل أنبوب قصير لكي يحصل هبوط الضغط المطلوب.

ليس للصفيحة المثقوبة قابلية السيطرة على معدل تدفق مائع التثليج، إنما تتم السيطرة على معدل التدفق في مثل هذه الوحدات بصفائح توجيه **Guide Vanes** توضع عند مدخل بخار مائع التثليج إلى الضاغط أو بتغيير سرعة دوران دولاب الضاغط.

أسئلة الفصل التاسع

س1: عدد صمامات التمدد شائعة الاستخدام في منظومات التثليج.

س2: ما هي خصائص الأنبوب الشعري المستخدم كأداة تمدد في منظومات التثليج؟

س3: ارسم مخططاً توضيحياً لصمام تمدد حراري، شارحاً مبدأ عمله.

س4: قارن بين صمام التمدد الحراري والصمام الآلي.

س5: اشرح مع الرسم مبدأ عمل الصمام الآلي.

س6: قارن بين الأنبوب الشعري كأداة تمدد وصمام التمدد الحراري.

س7: علل ما يأتي:

أ- وجوب تحديد كمية مائع التثليج بشكل صحيح في المنظومات التي تستخدم الأنبوب الشعري.

ب- يتم عمل مبادل حراري بين الأنبوب الشعري وخط السحب في بعض منظومات التثليج.

ت- يُعد صمام التمدد الآلي أقل كفاءة من صمام التمدد الحراري.

ث- هبوط الضغط في الأنبوب الشعري.

ج- ربط بصلة صمام التمدد الحراري بشكل جيد على خط السحب بعد المبخر بشكل مباشر.

الفصل العاشر

التفريغ والشحن

Evacuation and Charging

التفريغ والشحن Evacuation and Charging

1-10 مقدمة Introduction

بعد إجراء أعمال التركيب والنصب والتوصيل لأجزاء المنظومة الانضغاطية الأساسية وملحقاتها، لابد من شحن المنظومة بمائع التثليج المناسب وزيت الضاغط لتهيئتها للتشغيل. كما أن هنالك الكثير من الحالات التي تتطلب تفريغ المنظومة من مائع التثليج قبل إجراء أعمال الصيانة والإصلاح للمنظومة، كما في حالة حدوث تسرب لمائع التثليج أو حالة تلوث الزيت نتيجة احتراق الضاغط وغيرها من الحالات.

إن عملية تفريغ وشحن منظومات التثليج بمائع التثليج تتطلب الدقة والمهارة من فني التبريد الذي يقوم بالعمل من أجل تحقيق أفضل أداء لعمل المنظومة. وفي هذا الفصل سيتم التطرق لعملية سحب مائع التثليج من المنظومة، وأعراض تسرب شحنة مائع التثليج وكيفية الشحن.

2-10 استعادة (استرجاع) مائع التثليج Refrigerant Recovery

حسب ما نصت عليه اتفاقية مونتريال بوجوب استعادة موائع التثليج المستنفدة للأوزون وخزنها في أسطوانات خاصة وعدم طرحها للفضاء الخارجي، لأن هذه الغازات تؤثر على ظاهرة الاحترار العالمي (**Global Warming**) والاضمحلال في طبقة الأوزون (**Ozone Depletion**)، لذا يجب أن يسحب مائع التثليج بواسطة وحدات استعادة مائع التثليج (**Recovery Units**).

إن وحدات استعادة مائع التثليج مصممة لاستعادة المائع بالحالة السائلة أو الغازية، مع فصل الزيت أو بدون فصل الزيت. وتستخدم لأغراض تخزين موائع التثليج المسحوبة من المنظومات أسطوانات خاصة مصممة لهذه الإغراض وذات صمامين أحداهما للسائل والآخر للغاز، وكما هو مبين في الشكل (10-1)، كما يجب أن يكتب أسم المائع على أسطوانة التخزين لضمان عدم خلط الموائع مع بعضها، ومن المهم جداً أن يكون الفني القائم بالعملية ذا إلمام كامل بخطوات العمل وقواعد الأمان والسلامة المهنية.

وفيما يأتي توضيح لعملية سحب مائع التثليج من المنظومة باستخدام الوحدات الخاصة بذلك أو استخدام الأجهزة التقليدية المتوفرة لدى أصحاب ورش صيانة أجهزة التثليج.

تتلخص عملية استعادة مائع التثليج من منظومات التثليج بالأجهزة التقليدية بالخطوات التي يوضحها الشكل (10-2) وهي كما يأتي:

1- توصيل أنبوب الضغط العالي في عُدة مقاييس الضغط نوع (المانيفولد) (**Manifold Gage**) إلى صمام الخدمة في خط السائل لمنظومة التثليج.

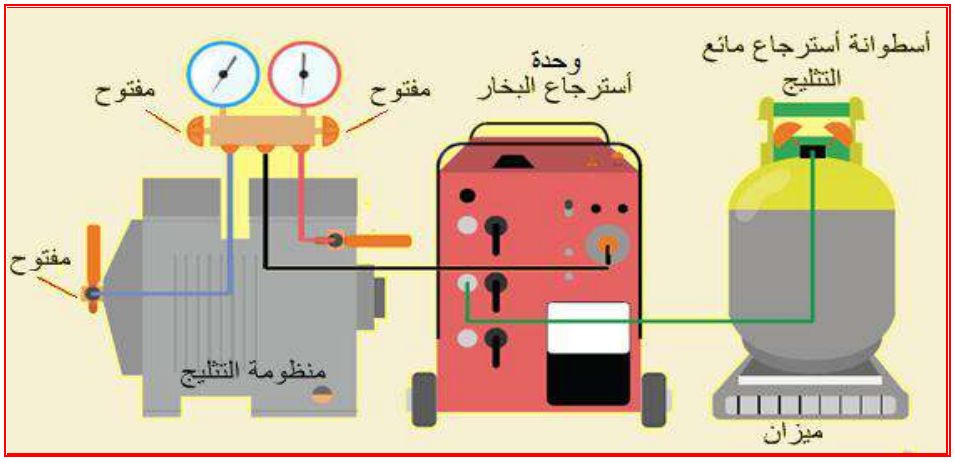
2- توصيل أنبوب الخدمة الوسطي في عُدة مقاييس الضغط إلى صمام السائل في أسطوانة التخزين.

3- طرد جزء من الغاز إلى الخارج للتخلص من الهواء والرطوبة الموجودة في عُدة مقاييس الضغط والأنابيب.

4- فتح صمام السائل في أسطوانة التخزين، ثم يتم فتح صمام الضغط العالي في عُدة مقاييس الضغط.

5- يمكن ملاحظة انتقال مائع التثليج إلى الأسطوانة من خلال مراقبة زجاجة بيان عُدة مقاييس الضغط. كما يمكن تسريع عملية التفريغ من خلال وضع الأسطوانة في ماء بارد.

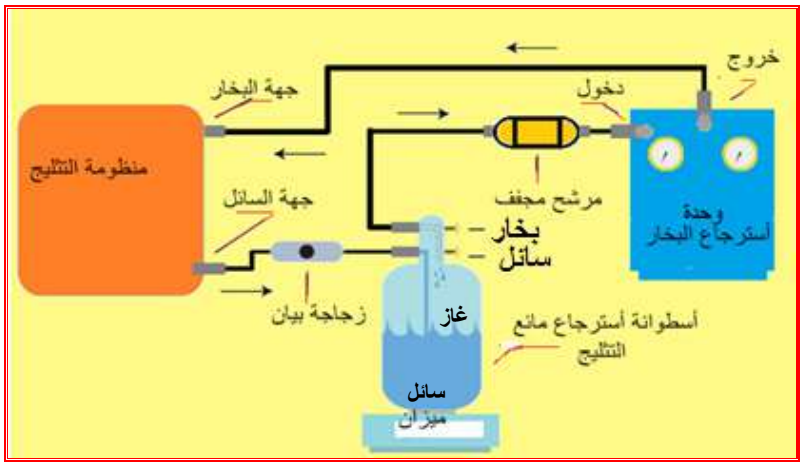
الشكل 10-1 نموذج من أسطوانات تخزين الغازات



الشكل 10-2 الخطوات الأساسية لاستعادة مائع التثليج

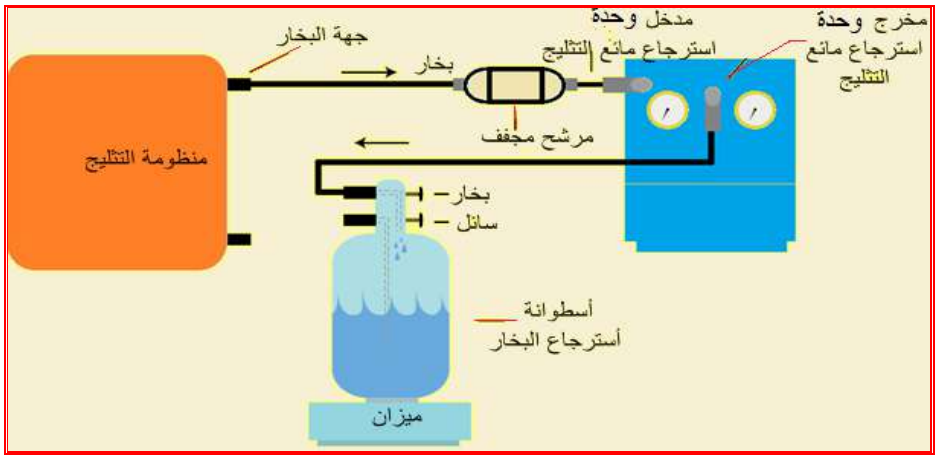
ويمكن إجراء العملية من خلال استخدام وحدة استعادة مائع التثليج، إما بسحب سائل مائع التثليج أو بسحب بخاره، وفيما يلي توضيح لذلك:

يبين الشكل (10-3) مخططاً لربط وحدة استعادة مائع التثليج بحالة سائلة من المنظومة المراد تفريغها. وهي طريقة سريعة تعتمد عملية الربط الموضحة بالشكل. ويمكن التأكد من انتقال مائع التثليج إلى أسطوانة التخزين من خلال زجاجة البيان. وبعد تعادل الضغط بين الوحدة وأسطوانة التخزين، تترك الوحدة لعُدة دقائق ثم يتم غلق صمام السائل في الأسطوانة ومن ثم صمام الضغط العالي في عُدة مقاييس الضغط وبعدها يتم فصل الوحدة.



الشكل 10-3 طريقة استعادة مائع التثليج السائل

أما عملية سحب مائع التثليج بحالته البخارية والتي تستخدم للوحدات الصغيرة فيوضحها الشكل (10-4) إذ تلاحظ التوصيلات اللازمة. إن وحدات إعادة الاستخدام لسحب الغاز مصممة على أساس سحب البخار ثم تكثيفه وإرساله إلى أسطوانة التخزين.



الشكل 10-4 طريقة استعادة بخار مائع التثليج

10-3 دلائل التسرب Leak Detection

يمثل مائع التثليج جزءاً حيوياً في منظومات التثليج، وأن تسربه يعد من المشاكل الأساسية في هذه المنظومات وسبباً لأعطالها، ويحدث التسرب عادة في مناطق ربط أجزاء المنظومة الأساسية (مناطق الوصلات واللحام)، أو نتيجة كسر أو فطر لأحد الخطوط أو من خلال مانع التسرب في الضواغط المفتوحة.

هنالك جملة من الحالات يسببها فقدان مائع التثليج ويمكن من خلالها الاستدلال على وجود التسرب ومنها:

1- نقص الشحنة التي يستدل عليها في الأجهزة الحاوية على زجاجة بيان.

2- انخفاض في كفاءة التبريد، والتي يمكن ملاحظتها من خلال ارتفاع في درجة حرارة الوسط المبرد مسبباً ضعف في تبريد المنظومة، وهذا يعتمد بشكل أساسي على كمية مائع التثليج المتسربة، فمثلا في الثلاجة المنزلية، يلاحظ أحياناً تجمع جليد على أجزاء من المبخر (مقدمة المبخر) والجزء المتبقي يكون خالياً من الجليد ويقُل أداء الجهاز بشكل كبير.

-3 ازدياد تحميص مائع التثليج الخارج من المبخر.

-4 سماع أزيز في صمام التمدد، إن هذا الصوت يشير إلى أن خليطاً من سائل مائع التثليج وبخاره يمر خلال خط السائل بدلاً من مرور مائع التثليج بحالة السائل فيه. أما في الحالة الاعتيادية فلا يسمع أي صوت.

-5 انخفاض ضغط السحب والدفع للضاغط.

-6 وجود بقع من الزيت على مناطق التسرب.

-7 انبعاث روائح بعض موائع التثليج، كالأمونيا.

4-10 وسائل الكشف عن التسرب Leak Detection Means

بعد ظهور واحدة أو أكثر من دلائل فقدان مائع التثليج من المنظومة فهنالك عُدة وسائل يتطلب اعتماد واحدة منها أو أكثر للكشف عن مكان التسرب لكي يعالج وتعوض الشحنة الناقصة للمحافظة على عمل المنظومة بكفاءتها التصميمية. وندرج أدناه أهم الوسائل المعتمدة للكشف عن تسرب موائع التثليج ولكل وسيلة خطوات عمل يتطلب الالتزام بها بدقة. كما يجب ضمان التهوية المناسبة عند العمل لان بعض موائع التثليج تكون مضرة في تركيز معين.

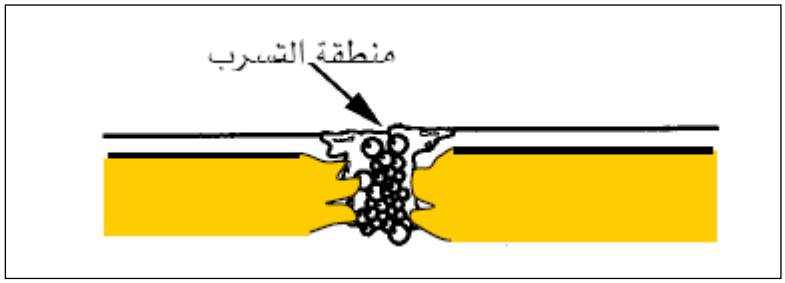
1-4-10 الشعلة الهاليدية Halide Test Lamp

تستخدم هذه الطريقة للكشف عن موائع التثليج الهالوكاربونية (الهيدروكربونات المهلجنة)، لأن العناصر الهالوجينية مثل الكلور أو الفلور تؤدي إلى تغير لون الشعلة. يوضح الشكل (10-5) مكونات جهاز شعلة الهاليد، وهي عبارة عن أسطوانة مملوءة بمادة قابلة للاحتراق مثل البروبان **Propane** أو كحول المثيلين **Methylene**، وصمام (محبس) تحكم بالغاز الخارج من الأسطوانة. وتزود الشعلة بالهواء عن طريق أنبوب الشم **Sniffer Hose** حيث توضع نهاية الأنبوب قرب المكان المتوقع وجود تسرب منه. توجد في نقطة الاحتراق شبكة من النحاس وفي حالة وجود تسرب يسحب بخار مائع التثليج مع الهواء من خلال هذا الأنبوب إلى نقطة الاحتراق، مما يؤدي إلى تغير لون اللهب من الأحمر إلى الأخضر الفاتح أو الأخضر الغامق أو الأزرق أو الأرجواني وذلك حسب شدة التسرب ونوع مائع التثليج.

الشكل 10-5 جهاز الشعلة الهاليدية

2-4-10 فحص الفقاعات Bubble Test

تُعد طريقة استخدام فقاعات الصابون من أبسط وأقدم الطرائق للكشف عن تسرب مائع التثليج من منظومات التثليج. إذ تتكون الفقاعات في منطقة التسرب بتأثير الغاز المتسرب، والشكل (10-6) يوضح ذلك.



الشكل 10-6 فقاعات الصابون

3-4-10 كاشف التسرب الالكتروني Electronic Leak Detector

يبين الشكل (10-7) صورة لجهاز كاشف التسرب الإلكتروني الذي يستخدم للكشف عن الهالوجينات فقط. حيث يحتوي الجهاز على عنصر حساس للهالوجينات (تتغير حساسيته حسب قيمة الهالوجين في الهواء) ويؤثر العنصر الحساس على دائرة كهربائية تغير من وضع المؤشر الدال على التسرب، فيقوم بإصدار صوت متقطع مصحوب باشتعال مصباح إشارة للتسرب. يمكن أن تحدد حساسية الجهاز حسب شدة تسرب مائع التثليج.

الشكل 10-7 كاشف التسرب الإلكتروني

4-4-10 كاشف التسرب بالأشعة فوق البنفسجية Ultraviolet Leak Detector

يبين الشكل (10-8) صورة جهاز كاشف التسرب بالأشعة فوق البنفسجية، والذي يستخدم للكشف عن الهالوجينات في الوحدات الصغيرة والسيارات، إذ تتلخص طريقة استخدامه بما يأتي:

1- إضافة الصبغة المناسبة لنوع مائع التثليج للمنظومة وتركها تعمل لبضع دقائق.

2- وصل المصباح بالمصدر الكهربائي ويترك حتى يتوهج.

3- يمرر المصباح على الأماكن المتوقع وجود تسرب منها مثل مناطق الربط واللحام.

فعند وجود تسرب يلاحظ أن الصبغة الفلورية **Fluorescent** تتوهج عند سقوط الأشعة فوق البنفسجية عليها.

الشكل 10-8 كاشف التسرب بالأشعة فوق البنفسجية

5-10 تفريغ منظومة التثليج من الهواء والرطوبة Air and Moisture Evacuation

عند الحاجة لشحن منظومة التثليج بمائع التثليج، يجب التأكد أولاً من خلوها من الهواء والرطوبة. إن وجود الهواء أو النيتروجين (الذي أُستخَدم في عملية ضغط المنظومة في أثناء عملية كشف التسرب)، مع مائع التثليج يؤدي إلى ارتفاع ضغط المكثف وارتفاع درجة حرارة التصريف، مما يسبب انخفاض أداء المنظومة. كما أن وجود الرطوبة مع مائع التثليج يؤدي إلى تكون الأحماض المسببة لتلف محرك الضاغط، وتآكل في معادن أجزاء المنظومة وكذلك قد يسبب الانسداد في أداة التمدد مما يعيق جريان مائع التثليج إلى المبخر.

وفيما يأتي العمليات الواجب إتباعها من أجل تفريغ المنظومة من الهواء والرطوبة:

1- توصيل عُدة مقياس الشحن شكل (10-9) أو وحدة شحن مائع التثليج شكل (10-10) بصمامات الخدمة الموجودة بخطي السحب والطرد للمنظومة بواسطة الأنابيب الخاصة. ويمكن استخدام الصمام الثاقب في حالة عدم وجود صمامات خدمة كما في المنظومات الصغيرة.

2- يتم فتح صمامي الضغط العالي والضغط الواطئ في عُدة مقاييس الضغط ، وذلك لطرد الغازات المتبقية داخل المنظومة.

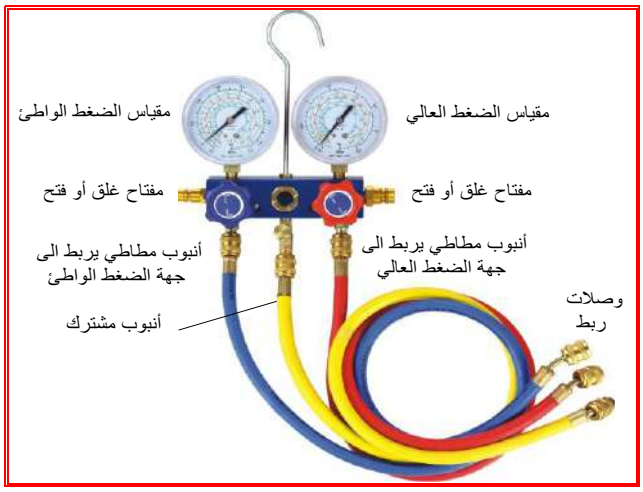
3- يتم إيصال مقياس ضغط التفريغ في أنبوب الخدمة الوسطي، بهدف دقة قراءة ضغط التفريغ.

4- تدقيق صلاحية مضخة التفريغ وفحص الزيت وتغييره عند الحاجة، وتوصيل مضخة التفريغ بمقياس الضغط بالإضافة إلى إحكام التوصيلات.

5- تشغيل مضخة التفريغ حتى يصل الضغط في مقياس ضغط التفريغ إلى قرابة واحد بار تحت الضغط الجوي.

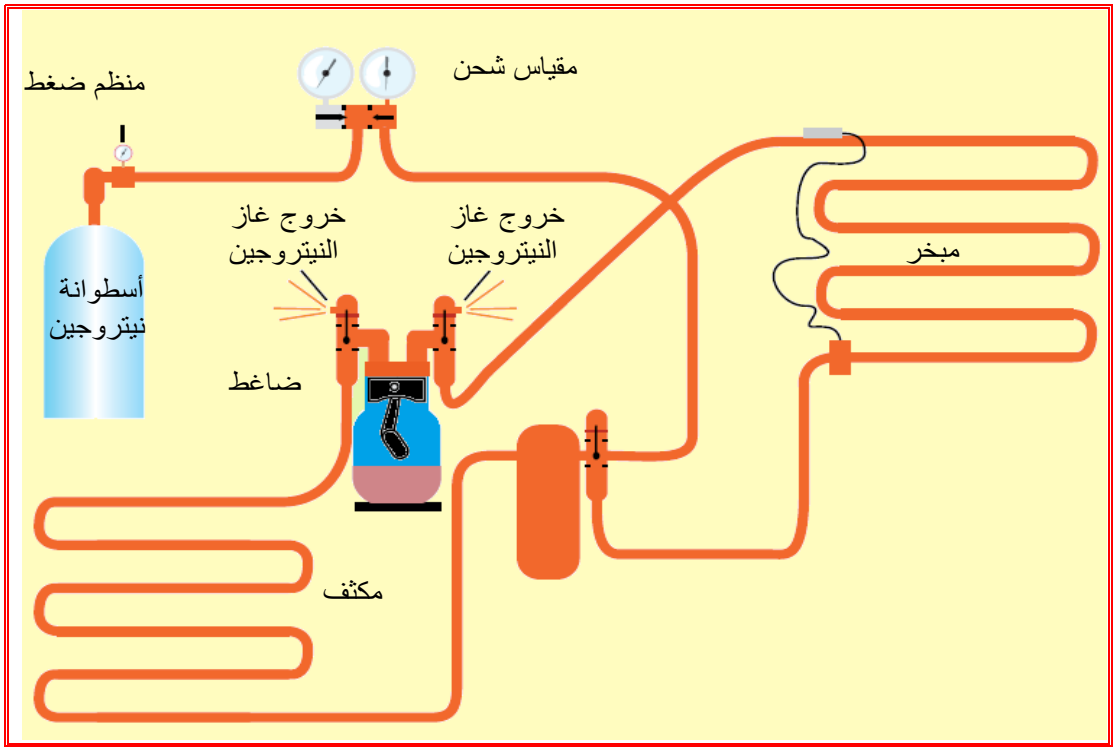
6- يتم غلق صمامات عُدة مقاييس الضغط بشكل محكم لضمان عدم رجوع الهواء للمنظومة، ثم يتم إيقاف المضخة والانتظار بحدود عشر دقائق ثم يلاحظ مقياس ضغط التفريغ، إذا ازداد الضغط مرة أخرى دل على وجود تسرب وهذا يتطلب الكشف عنه وإصلاحه، أما إذا زاد الضغط زيادة ملحوظة واستقر فهذا دليل على وجود رطوبة. في حالة وجود الرطوبة يجب إدخال النيتروجين شكل (10-11) أو مواد معينة مزيلة للرطوبة متوافقة مع منظومات التثليج لطرد الرطوبة وإعادة التفريغ.

7- عند التأكد من ثبوت الضغط، أي عدم وجود تسرب، تُفصل مضخة التفريغ لإنهاء عملها، وبذلك تكون المنظومة جاهزة للشحن.



الشكل 10-9 مقياس شحن مائع التثليج

الشكل 10-10 وحدة شحن مائع التثليج



الشكل 10-11 ربط النيتروجين لأغراض إزالة الرطوبة

6-10 شحن المنظومة بمائع التثليج Charging the Unit with Refrigerant

يتوقف عمل منظومة التثليج بشكل طبيعي على مقدار أو كمية مائع التثليج الذي تحتويه المنظومة، مما يتطلب الدقة بإعطاء المنظومة الشحنة المناسبة المطلوبة، لأن نقصان الشحنة يقلل من كفاءة المنظومة بسبب عدم توفر الكمية المناسبة للمبخر من مائع التثليج، وكذلك انخفاض ضغط السحب الذي قد يسبب تلف الضاغط بسبب احتمال رجوع مائع التثليج للضاغط بحالته السائلة.

أما زيادة الشحنة فيؤدي إلى زيادة في ضغط ودرجة حرارة خط التصريف مما يسبب تحميلاً إضافياً للضاغط وزيادة كلفة التشغيل. يمثل الجدول (10-1) نموذجاً لكمية بعض موائع التثليج اعتماداً على سعة الضاغط ونوع المبخر المستخدم في بعض المنظومات.

الجدول 10-1 كمية الشحنة بالكيلوغرام لبعض المنظومات

R-502		R-22		R-12		قدرة الضاغط (hp)
مغمور	جاف	مغمور	جاف	مغمور	جاف	
0.6	0.8	0.6	0.8	0.5	0.6	0.50
1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	1.2	0.75
1.6	1.6	1.6	2.0	1.4	1.6	1.00
2.5	5.8	2.5	2.8	2.2	2.5	1.5

يمكن أن يجهز مائع التثليج للمنظومة بحالته الغازية أو السائلة، وغالباً ما تستخدم طريقة الشحن بالغاز في بداية الشحن بعد التفريغ مباشرة ومن ثم تستكمل الشحنة بالغاز أو السائل.

هنالك العديد من وسائل الشحن لمنظومات التثليج اعتماداً على عوامل كثيرة منها السعة التبريدية أو مكونات المنظومة. ومن وسائل الشحن المعتمدة في ورش التبريد ما يأتي:

1- استخدام الميزان (الوزن).
2- استخدام الأسطوانة المدرجة.
3- عن طريق مقياس الشحن.
4- عن طريق مراقبة زجاجة البيان.
5- عن طريق مراقبة خط السحب.
6- عن طريق مراقبة التيار الكهربائي المسحوب للضاغط.
7- عن طريق تحديد مستوى السائل.

1-6-10 الشحن بغاز (بخار) مائع التثليج Vapor Charging

تستخدم هذه الطريقة للمنظومات الصغيرة ومنها المنزلية بشكل خاص، إذ يشحن مائع التثليج بحالته الغازية من خلال خط السحب للضاغط ويستخدم ضاغط المنظومة لسحب المائع من الأسطوانة. إن الشحن بغاز مائع التثليج يضمن نظافة المائع المجهز للمنظومة من الشوائب، نتيجة تبخره داخل الأسطوانة وانفصاله عن الشوائب العالقة. كما يمكن أن تعجل سرعة الشحن بوضع الأسطوانة في حوض ماء دافئ من أجل زيادة التبخر للمائع داخل الأسطوانة، مع ملاحظة عدم تعريض الأسطوانة للهب أو مصدر حراري شديد من أجل السلامة والأمان.

إن الخطوات العامة للشحن ببخار مائع التثليج والتي تتبع بشكل عام، يمكن تلخيصها بحسب الشكل (12-10) وقواعد الأمان والسلامة المهنية بما يأتي:

1- توصل أنبوبة الخدمة الوسطى (الأنبوبة الصفراء) بأسطوانة الشحن (المائع الملائم للمنظومة)، وتوصل الأنبوبة الحمراء للضغط العالي بين صمام خدمة الطرد وجهة الضغط العالي في عُدة مقاييس الضغط للعُدة، أما الأنبوبة الزرقاء فتوصل بين صمام خدمة خط السحب وجهة الضغط الواطئ للمقياس.

2- فتح صمامات عُدة مقاييس الضغط مع إبقاء صمامات الخدمة في المنظومة مغلقة. ثم فتح صمام الأسطوانة قليلاً لطرد قسم من الغاز للخارج من خلال مناطق الربط لصمامات الخدمة والأنابيب، وذلك لضمان التخلص من الهواء والرطوبة الموجودة في الأنابيب وعُدة مقاييس الضغط، ثم تحكم مناطق الربط للمنظومة أولاً وبعدها تغلق صمامات المقاييس والأسطوانة.

3- بعد التأكد من طرد الهواء والرطوبة الواردة في الفقرة (2) أعلاه بشكل دقيق، يتم فتح صمامات المقاييس، الخدمة، والاسطوانة، يلاحظ صوت جريان المائع في الأنابيب وتوقف الصوت يدل على امتلاء المنظومة بالمائع بضغط الأسطوانة.

4- يغلق صمام الضغط العالي بمقياس الشحن ثم يتم تشغيل المنظومة مع استمرار الشحن على شكل دفعات إلى أن يكتمل الشحن بالكمية التي تحتاجها المنظومة. إن اكتمال الشحن للمنظومة يمكن الاستدلال عليه بعُدة طرائق تمت الإشارة إليها سابقاً في هذا الفصل.

5- بعد التأكد من اكتمال الشحن تغلق صمامات الخدمة ثم صمام الأسطوانة، وبهذا تكون المنظومة جاهزة للعمل.

2-6-10 الشحن بسائل مائع التثليج Liquid Charging

تستخدم هذه الطريقة للمنظومات ذات السعات التبريدية الكبيرة المزودة بصمام شحن السائل في خط السائل أو عند خزان السائل **Liquid Receiver**، إذ يشحن المائع بحالته السائلة ولا يجوز إطلاقاً الشحن بالسائل من خلال خط السحب لما لذلك من مخاطر على الضاغط، كما أن الضاغط خلال عملية الشحن يجب أن يكون متوقفاً عن العمل، الشكل (13-10) يوضّح مخطط لآلية الشحن بسائل مائع التثليج.

يمكن تحديد الخطوات الآتية لشحن منظومة مفرغة من مائع التثليج بما يأتي:

1- تربط المقاييس إلى المنظومة وأسطوانة الشحن كما هو موضح بالأشكال.

2- يتم فتح صمام الخدمة (صمام الشحن) بشكل كامل.

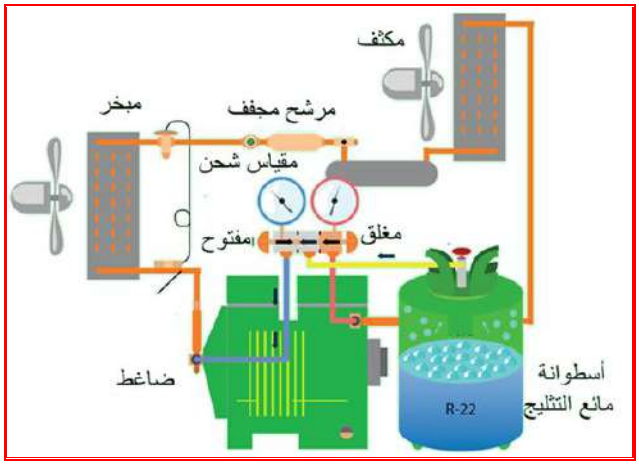
3- يتم فتح صمام الأسطوانة وقلبها كما هو موضح بالشكل. وبما أن الضغط داخل الأسطوانة أكبر من الضغط الموجود داخل المنظومة، فإن المائع سينتقل إلى داخل المنظومة.

4- عند توقف جريان المائع واستقرار الضغط، والذي يتم الاستدلال عليه من استقرار مقياس الضغط، يتم بعد ذلك غلق صمام الأسطوانة وتشغيل المنظومة.

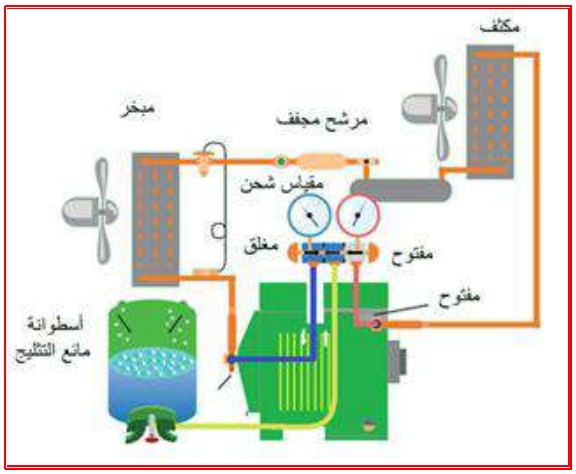
5- يتم التأكد من الشحنة في المنظومة بإحدى الطرائق المحددة سابقاً، ثم يتم استكمال الشحنة الناقصة ببخار المائع عن طريق خط السحب.

ملاحظة عند استعمال مقياس الشحن لتحديد إستكمال الشحنة للجهاز، يتم ذلك عن طريق درجات الحرارة المناظرة لضغوط التشبع عند حالة البخار المشبع والمثبتة في مقياس الضغط الواطئ (الأزرق) من مقياس الشحن وحسب نوع مائع التثليج، وكذلك درجة الحرارة المناظرة لضغطوط التشبع لحالة السائل المشبع والمثبتة في مقياس الضغط العالي (الأحمر) من مقياس الشحن، وذلك عن طريق وضع محارير دقيقة لقياس درجات الحرارة على خطي السحب لقراءة درجة حرارة بخار مائع التثليج وخط السائل بعد المكثف لتحديد درجة حرارة سائل مائع التثليج.

أي لا يتم تحديد كمية الشحن عن طريق تحديد مقادير الضغطين العالي والواطئ لأنها ليست ثابتة بل متغيرة بحسب درجة حرارة المحيط في حينها ولأسباب أخرى. إذاً سيتم تحديد درجات الحرارة المناظرة للتشبع.



الشكل 10-12 شحن منظومة التثليج ببخار مائع التثليج



الشكل 10-13 شحن المنظومة بسائل مائع التثليج

أسئلة الفصل العاشر

س1: وضح مستعيناً بالرسوم التخطيطية عملية استعادة مائع التثليج من المنظومة إلى الأسطوانة الخاصة للحالات الآتية:

أ- باستخدام الأجهزة التقليدية.

ب- باستخدام الوحدات الخاصة لاستعادة المائع بحالته البخارية.

ت- باستخدام الوحدات الخاصة لاستعادة المائع بحالته السائلة.

س2: ما هي دلائل تسرب مائع التثليج من المنظومة؟

س3: ما هي وسائل الكشف عن تسرب مائع التثليج، عددها واشرح إحداها؟

س4: مستعيناً بالرسوم التخطيطية، اذكر العمليات الواجب إتباعها لتفريغ منظومة التثليج من الهواء والرطوبة.

س5: اشرح بشكل مفصل مستعيناً بالرسوم التخطيطية لتوصيلات الأجهزة والمعدات، عملية الشحن لمائع التثليج بحالته البخارية.

س6: اشرح بشكل مفصل مستعيناً بالرسوم التخطيطية لتوصيلات الأجهزة والمعدات، عملية الشحن لمائع التثليج بحالته السائلة.

س7: ماهي الوسائل المعتمدة لتحديد كمية شحنة مائع التثليج المجهزة للمنظومة خلال عملية الشحن.

س8: علل ما يأتي:

أ- استعادة مائع التثليج من المنظومات دون تسربه للفضاء الخارجي.

ب- شحن منظومة التثليج بمائع التثليج.

ت- تفريغ المنظومة من مائع التثليج أحياناً.

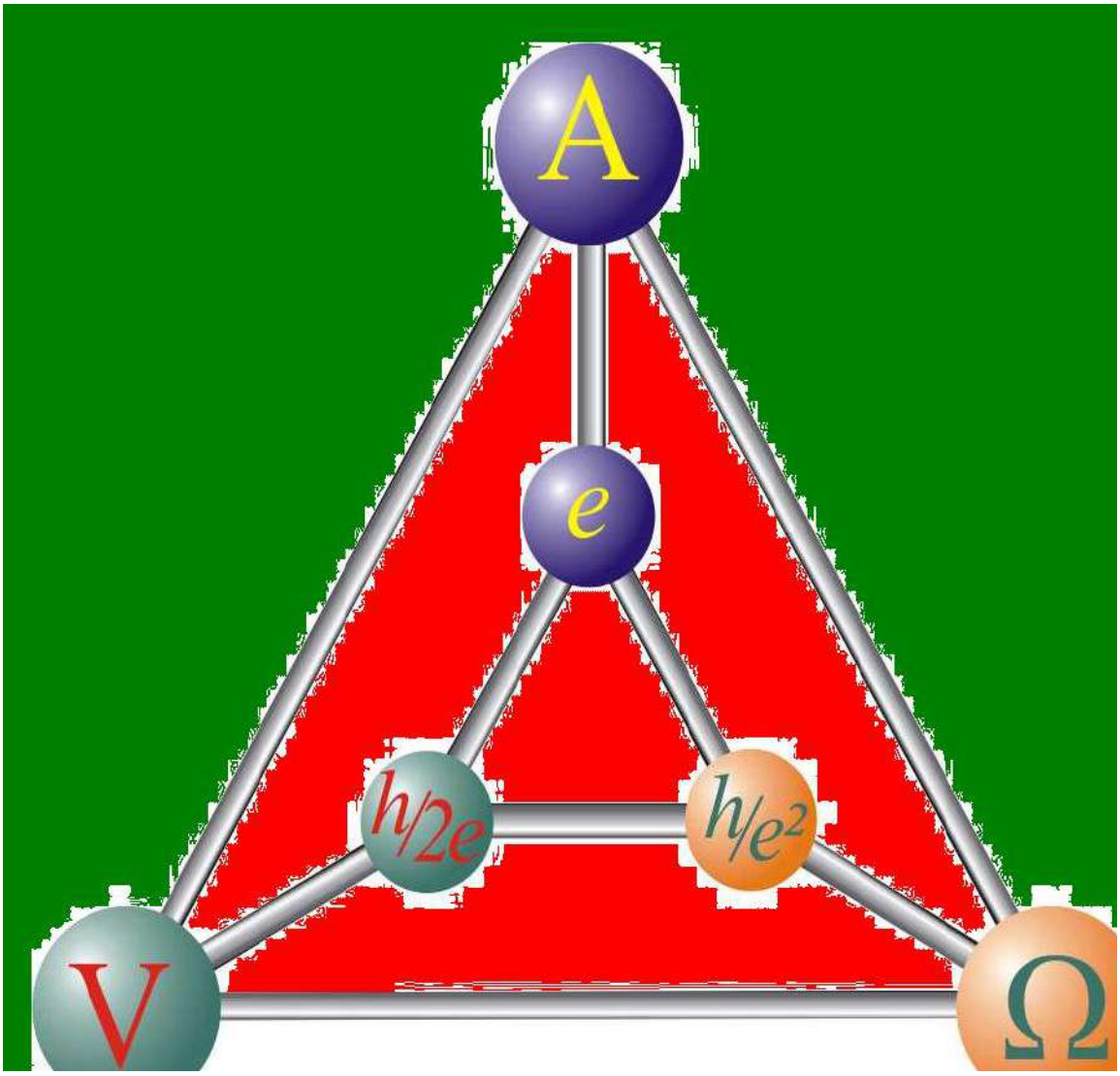
ث- سماع صوت (أزيز) في صمام التمدد أحياناً.

ج- وجوب تفريغ منظومة التثليج من الهواء والرطوبة قبل الشحن.

الفصل الحادي عشر

أساسيات كهربائية

Electric Principles



أساسيات كهربائية Electric Principals

11-1 التركيب الإلكتروني للذرات Electronic Construction of Atoms

حاول الإنسان كثيراً أن يكتشف هذا الكون الذي يعيش فيه. ولقد بذل جهوداً كثيرة وسوف يستمر في بذل هذه الجهود للدراسة والوصول إلى معنى الظواهر في العالم المحيط به وعليه، بحث الإنسان في طبيعة الكهرباء وأصبح يدرك تمام الإدراك مفهوم التيار الكهربائي كجوهر كهربائي حتى أصبح هذا المعنى معروفاً وواضحاً بدرجة كبيرة وباستخدام النماذج كطرائق عملية تمكنه من معرفة كل ما يتعلق بالكهرباء وعلى الأخص تفسير الظواهر التي تنقصها المشاهدات المباشرة فبدأ بدراسة المواد والمركبات التي وجدت في الطبيعة، ويتكون كل عنصر من وحدات من نفس النوع يطلق عليها (ذرات) وهي أصغر جزء من العنصر له نفس خواص العنصر مثل (الرائحة والقوة ونقل الكهرباء) وعليه فان أصغر جزء من قطعة من عنصر النحاس هي (ذرة النحاس).

التركيب الذري:

الشكل (11-1) يوضح التركيب الذري للذرة والتي تتكون من:

1- **النواة** وتحتوي على:

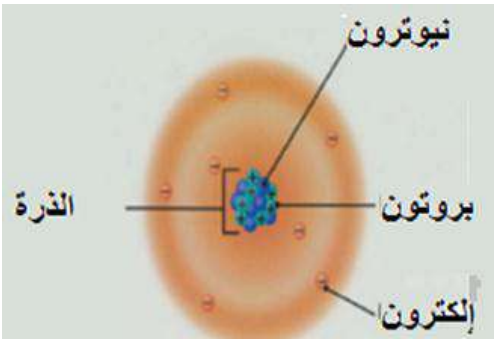
أ – نيوترونات متعادلة الشحنة.

ب – بروتونات موجبة الشحنة.

وبذلك تصبح شحنة النواة موجبة وتتركز فيها أغلب الكتلة الذرية.

2- **الغلاف الذري**

وتدور فيه الإلكترونات سالبة الشحنة ذات الكتلة الخفيفة جداً مقارنة مع كتلة النواة في مدارات مغلقة ويكون شكل هذه المدارات دائرية أو على شكل قطع ناقص وكل مدار يحمل طاقة محددة تقل بالاقتراب من النواة.



شكل 11-1 التركيب الذري

11-2 مبادئ الكهرباء Principles of Electricity

1- تعريف الكهرباء الساكنة

الكهرباء الساكنة من علوم الفيزياء الأساسية ولها العديد من التطبيقات في حياتنا العملية مثل مكائن التصوير وطابعات الليزر والمعجلات النووية، ولدراسة هذا العلم سوف نقوم بشرح مفاهيمه الأساسية التي يعتمد عليها هذا العلم، وتتلخص تلك المفاهيم في مفهوم الشحنة الكهربائية والتيار الكهربائي والجهد الكهربائي. وسنقوم أيضاً بدراسة بعض التطبيقات الأساسية مثل المتسعات والتيار الكهربائي المستمر.

2- مفاهيم أساسية:

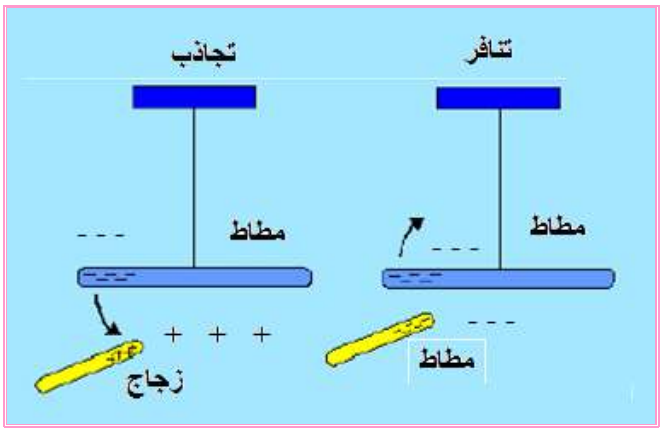
أ- الشحنة الكهربائية:

إن الأجسام الطبيعية المحيطة بنا تكون عادة متعادلة رغم أنها تتكون من جسيمات تحتوي على شحنات كهربائية (إلكترونات وبروتونات)، وهذا نتيجة لكون الشحنة الموجبة التي تحملها النواة تكون مساوية للشحنة السالبة التي تحملها إلكترونات هذه الذرة.

ب- أنواع الشحنات:

بواسطة التجارب يمكن أثبات أن هنالك نوعين مختلفين من الشحنة. فمثلاً إذا دلك ساق من الزجاج بواسطة قطعة من الحرير وتم تعليقها بخيط عازل وقربنا ساقاً آخر (مشابهاً له ودلكه بالحرير أيضا) من الساق المعلق فانه سوف يتحرك في اتجاه معاكس، أي أن الساقين يتنافران، وبتقريب ساق من البلاستيك تم دلكه بواسطة الصوف فان الساق المعلق سوف يتحرك باتجاه الساق البلاستيكية أي أنهما يتجاذبان، لاحظ الشكل (11-2).

وقد سمى العالم الأمريكي (فرانكلين) الشحنة التي تتكون على اللدائن بالشحنة السالبة، واستنتج أن الشحنات المتشابهة تتنافر والشحنات المختلفة تتجاذب.



شكل 11-2 تنافر الشحنات المتشابهة وتجاذب المختلفة

3-11 التيار الكهربائي Electrical Current

يُعد التيار الكهربائي من الكميات الكهربائية الأساسية ويرمز له بالرمز (I)، ويعتمد في حركته على الشحنات الموجبة عكس حركة الإلكترونات ذات الشحنة السالبة، ويعرف ***معدل مرور الشحنة الموجبة باتجاه ما بالنسبة للزمن تحت تأثير قوة ما (فرق الجهد) بأنه التيار الكهربائي***، إذ إن:

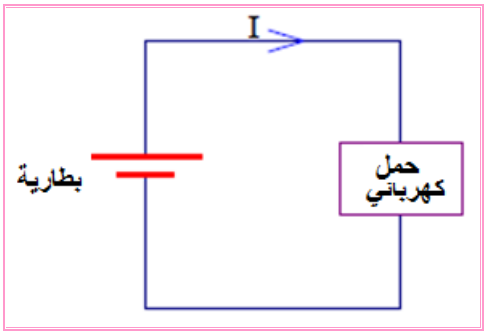
$$I = \frac{Q}{t}$$

ويقاس التيار بالأمبير **Ampere (A)**

والذي يكافئ الكولوم لكل ثانية، إذ إن :

I	التيار الكهربائي	A
Q	الشحنة	C
t	الزمن	s

لكي يمر تيار في دائرة كهربائية شكل (11-3)، يتطلب ذلك وجود مصدر خارجي يحرك الإلكترونات خلال الموصل بين نقطتين، وينشأ مايسمى بفرق الجهد بين هاتين النقطتين.



شكل 11-3 دائرة كهربائية بسيطة

ويمكن التعبير عن مسار التيار الكهربائي بأنه يسري من القطب الموجب إلى القطب السالب لمصدر جهد خارجي، وكذلك من القطب السالب إلى القطب الموجب لمصدر جهد داخلي، أي داخل مصدر الجهد. ولذلك فإن حركة التيار تكون من النقطة ذات الجهد الأعلى إلى نقطة أخرى يكون جهدها أقل.

ويمكن القول بأن للتيار الكهربائي أنواعاً مختلفة تختلف باختلاف شكل المصدر كما يأتي:

1. **تيار مستمر نقي (Pure D.C. Current)**

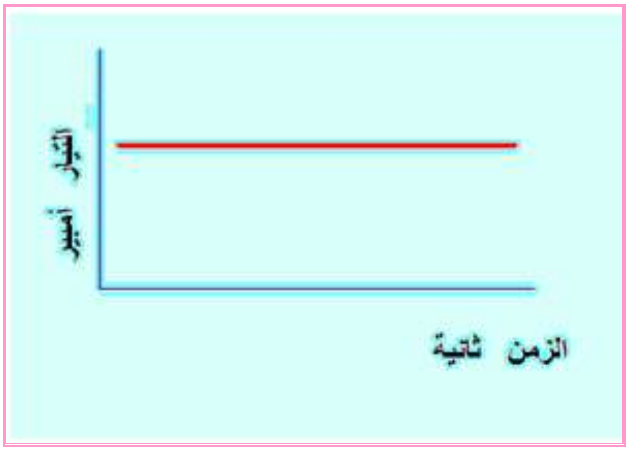
التيار المستمر ثابت القيمة ولا يغير اتجاهه بالنسبة للزمن، كما هو مبين في الشكل (11-4).

2. **التيار النبضي (Pulsating Current)**

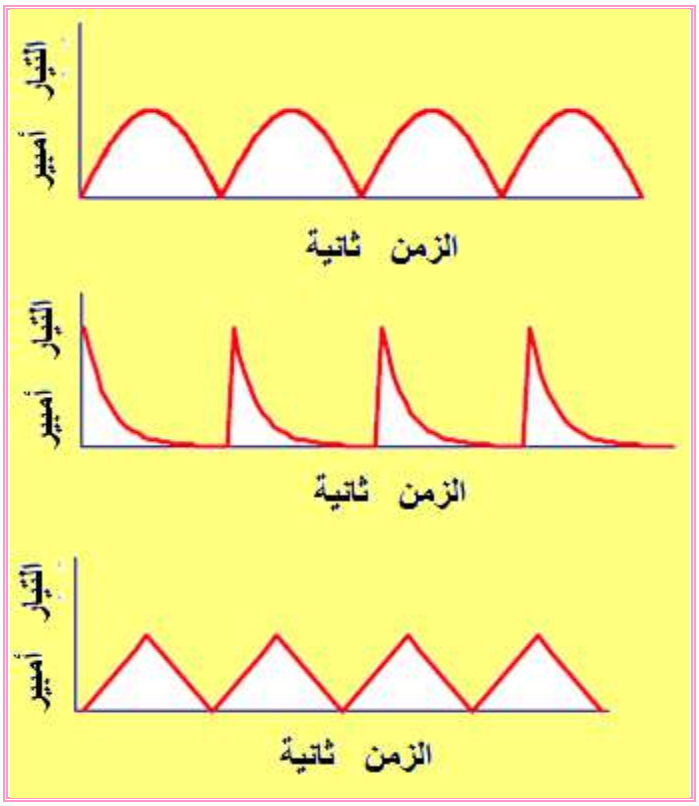
وهو تيار مستمر تتغير قيمته دوريا ولا يغير اتجاهه، كما هو مبين في الشكل (11-5).

3. **تيار متناوب (ترددي) (Alternating Current)**

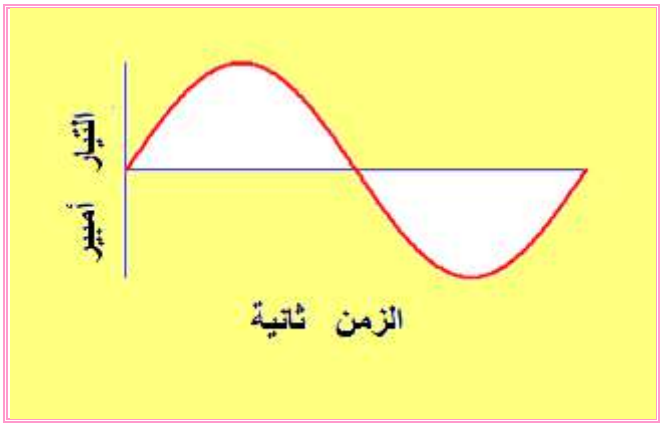
وهو تيار يتغير في القيمة والاتجاه دوريا. فمثلا الموجة الجيبية تعتبر شكلا من أشكال التيار المتناوب وكما هو مبين في الشكل (11-6).



شكل 11-4 تيار مستمر نقي



شكل 11-5 تيار نبضي

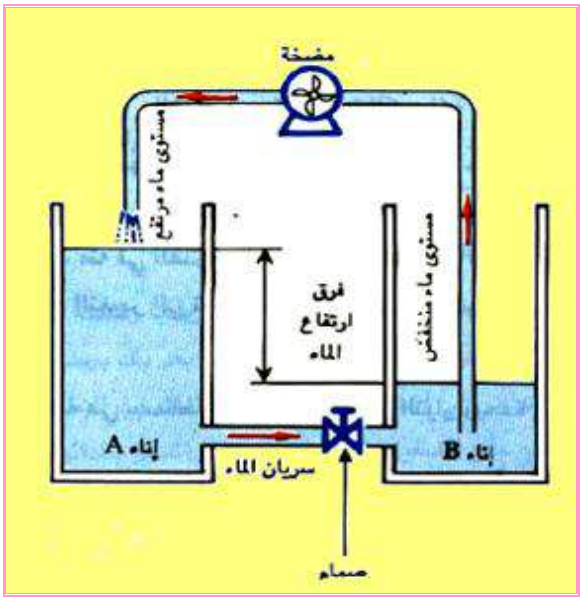


شكل 11-6 موجة التيار المتردد

4-11 الجهد الكهربائي Electric Potential

لغرض توضيح مفهوم الجهد الكهربائي نبين التجربة الآتية:

إذا كان لدينا إناءان **B**، **A** وتم إيجاد الفرق بين مستوى سطح الماء فيهما وذلك بتوصيلهما عن طريق أنبوبة واستخدام مضخة كما بالشكل (11-7) فإنه عند فتح الصمام الموجود في الأنبوبة بين الإناءين نجد أن الماء يسري من الإناء **A** حيث سطح الماء مرتفع إلى الإناء **B** حيث سطح الماء منخفض. وعليه فإن الجهد الكهربائي يناظر الفرق في مستوى الماء بين الإناءين، التيار الكهربائي يناظر جريان الماء من الإناء **A** إلى **B** أما المضخة التي تتسبب في إيجاد الفرق بين سطحي الماء (فرق الجهد) فهي تناظر مصدر الجهد (بطارية مثلاً).



شكل 11-7 مفهوم الجهد الكهربائي

11-4-1 تعريف الجهد الكهربائي Define of Electric Potential

يعرف الجهد بأنه الشغل اللازم لنقل وحدة الشحنات من نقطة إلى أخرى، ويقاس بالفولت (**Volt**) والذي يكافئ جول لكل كولوم أي إن:

$$V = \frac{w}{Q}$$

إذ إن:

V	فرق الجهد	V
w	الشغل	J
Q	الشحنة	C

11-5 القدرة الكهربائية Electric Power

هي مقدار الشغل المبذول لتحريك شحنة من النقطة (A) إلى النقطة (B) في زمن محدد وتُقاس بوحدات الواط نسبة إلى العالم الاسكتلندي جيمس واط.

$$P = \frac{w}{t}$$

P	القدرة	W
w	الشغل	J
t	الزمن	s

6-11 التيار المستمر DC-Current

مصادر الطاقة الكهربائية:

توجد بصورة عامة عدة مصادر للطاقة الكهربائية منها:

1- البطاريات **(Batteries)**

وفيها تتحول الطاقة الكيميائية في أثناء عملية التفريغ إلى طاقة كهربائية وهي تنتج فروق جُهد صغيرة نسبياً بين طرفيها ويسري التيار خارج البطارية من القطب الموجب (عبر الأحمال المختلفة) إلى القطب السالب.

2- المولدات الكهربائية **(Electric Generators)**

وفيها تتحول الطاقة الميكانيكية (يتم توليد الحركة عن طريق بخار الماء أو احتراق الوقود) إلى طاقة كهربائية عن طريق الحث الذي يحدث في المولد بين المجال المغناطيسي والتيارات المارة في أسلاك المولد ويوجد نوعان من أنواع المولدات، مولدات التيار المستمر ومولدات التيار المتردد.

3- الخلايا الشمسية **(Solar Cells)**

تقوم الخلية الشمسية بتحويل ضوء الشمس مباشرة إلى طاقة كهربائية باستخدام أشباه الموصلات عن طريق إكساب الإلكترونات طاقة. فعن طريق الضوء تتحول هذه الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية نتيجة تحرر أزواج من الإلكترونات الحرة.

7-11 المقاومة الكهربائية Electrical Resistance

المقاومة الكهربائية كلمة لها مفهومين:

المفهوم الأول: يقصد بها الأجزاء أو الأجهزة الكهربائية التي يستفاد من مقاومتها (مقاومة نافعة) أي أنها تكون عنصراً من عناصر الدائرة الكهربائية.

المفهوم الثاني: يقصد بها خاصية المقاومة في الموصل أي إعاقة مرور التيار (مقاومة ضارة).

تعريف المقاومة: ***هي عبارة عن إعاقة المادة لمرور التيار الكهربائي (الإلكترونات).***

يرمز للمقاومة بالرمز: **(R)**.

وحدة قياس المقاومة : **أوم (Ω)**.

تعريف **الأوم**: ***هو مقدار المقاومة بين نقطتين على طول موصل إذا كان بينهما فرق جهد مقداره فولت واحد يتسبب بمرور تيار مقداره واحد أمبير.***

الموصلية الكهربائية: ***وهي مقلوب أو عكس المقاومة الكهربائية. ويرمز للموصلية الكهربائية بالرمز γ. وحدة قياس الموصلية الكهربائية سيمنس (S).***

1-7-11 أنواع المقاومات الكهربائية Types of Electrical Resistance

يمكن تقسيم المقاومات إلى نوعين رئيسين هما:

1- **المقاومات الثابتة**

2- **المقاومات المتغيرة**

2-7-11 رموز ألوان المقاومات Colors Symbols of Resistance

أ- عن طريق ألوان المقاومة:

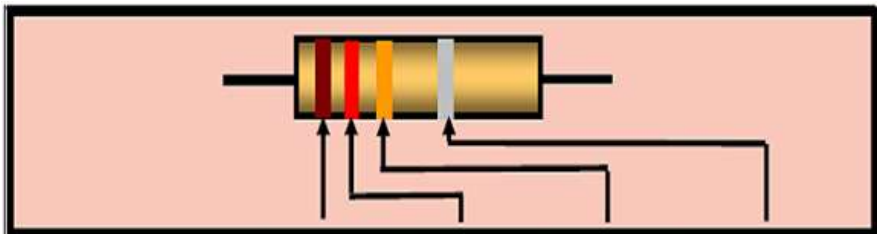
يمكن إيجاد قيمة المقاومة الشريطية بالأوم عن طريق الألوان الموجودة عليها، كما يوضح الجدول والشكل (11-8).

مثال 1

الجواب

الحل :

أسود	برتقالي	أحمر	بني
20%	1000	2	1
12 ×1000 = 12000 ohm ±20%			



اللون	الرقم الأول	الرقم الثاني	الأس العشري	التفاوت المسموح %
أسود	0	0	$10^0=1$	±20
بني	1	1	10^1	±1
أحمر	2	2	10^2	±2
برتقالي	3	3	10^3	±3
أصفر	4	4	10^4	±4
أخضر	5	5	10^5	±5
أزرق	6	6	10^6	±6
بنفسجي	7	7	10^7	±7
رمادي	8	8	10^8	±8
أبيض	9	9	10^9	±9
ذهبي			10^{-1}	±5
فضي			10^{-2}	±10
بدون لون				±20

شكل 11-8 جدول لتحديد قيمة المقاومة عن طريق اللون

ب- استخدام جهاز قياس المقاومة (الأوميتر) Ohmmeter

قياس المقاومة:

لو أردنا قياس قيمة مقاومة موصلة بدائرةٍ ما فيجب إزالتها من الدائرة قبل بدء القياس حتى نحصل على القراءة الصحيحة وحتى لا يتلف جهاز القياس. ثم نقوم بلمس طرف المجس الأحمر (الموجب) بأحد أطراف المقاومة وطرف المجس الأسود (السالب) بطرف المقاومة الآخر (يوصل المقياس بالتوازي مع العنصر المراد قياس مقاومته). لنفرض أننا وصلنا جهاز الأوميتر في الدائرة وحصلنا على انحراف لمؤشر الأوميتر وكان وضع مفتاح التدريج (المدى)، كما هو موضح بالشكل (11-9).

قراءة المقياس بوحدات الأوم، فعندما يكون المؤشر على الرقم 5 في الجهاز نضرب الرقم في 200 **أي أن:** **R= 5 x 200=1000 Ω**	**قراءة المقياس بوحدات الكيلو أوم، فعندما يكون المؤشر على الرقم 3 نضرب في 2 ليكون الناتج بالكيلو أوم، أو نضرب في 2000 ليكون الناتج بالأوم أي أن:** **R= 3 x 2=6 k Ω** **R= 3 x 2000=6000 Ω**	**قراءة المقياس بوحدات الميكا أوم، فعندما يكون المؤشر على الرقم 4 نضرب في 2 ليكون الناتج بالميكا أوم، أو نضرب في 2000 ليكون الناتج بالكيلو أوم أو نضرب في 2000000 ليكون الناتج بالأوم، أي أن** **R= 4 x 2=4 M Ω** **R= 4 x 2000=8000 k Ω** **R=4x2000000=8000000 Ω**

شكل 11-9 طريقة قياس المقاومة الكهربائية

11-7-3 مقاومة الموصلات الكهربائية Electrical Wiring Resistance

نلاحظ عند تشغيل الأجهزة الكهربائية ارتفاع درجة حرارة أسلاك التوصيل وذلك بسبب حدوث تصادم بين الإلكترونات في الموّصل مما يجعل الإلكترونات تفقد جزءاً من طاقتها الحركية وتتحول إلى حرارة وهذا يعني أن للموصل مقاومة كهربائية.

العوامل التي تتوقف عليها مقاومة الموصل

Factors Effect Wiring Resistance

1. **طول الموصل**: كلما زاد طول الموصل تزداد قيمة المقاومة، أي أن العلاقة طردية بين طول الموصل ومقاومته.
2. **مساحة مقطع الموصل**: كلما زادت مساحة مقطع الموصل قلت قيمة مقاومة الموصل، أي إن العلاقة عكسية بين مساحة مقطع الموصل ومقاومته.

3. **نوع مادة الموصل**: تتوقف قيمة المقاومة على نوع مادة الموصل المصنوع منها، أي أن لكل مادة مقاومة كهربائية معينة، وتسمى بالمقاومة النوعية للمادة.

المقاومة النوعية: وهي مقاومة سلك طوله متر واحد ومساحة مقطعه (**1 mm^2**) عند درجة حرارة (**20°C**)، ويرمز للمقاومة النوعية (**ρ**). ويبين الجدول (11-1) المقاومة النوعية بحسب نوع المادة.

جدول 11-1 المقاومة النوعية والموصلية الكهربائية لمواد مختلفة عند درجة حرارة (**20°C**)

المادة عند **20°C**	المقاومة النوعية (ρ) $\Omega \cdot mm^2/m$
فضة	0.0165
نحاس	0.0178
ذهب	0.021
ألمنيوم	0.0285
خارصين	0.06
نيكل	0.10
بلاتين	0.111
فولاذ	0.13
كونستنتان	0.5

4. **درجة الحرارة**: موصلية المادة تتغير بتغير درجة الحرارة، إذ تزداد قيمة مقاومة المعادن مع ارتفاع درجة الحرارة، وتنخفض قيمة مقاومة أشباه الموصلات مع ارتفاع درجة الحرارة.
ويمكن حساب مقاومة الموصل (**R**) بدلالة المقاومة النوعية (ρ) وكالاتي:

$$R = \ell \times \rho / A$$

R	قيمة المقاومة	Ω
ℓ	طول الموصل	m
A	مساحة المقطع	mm^2
ρ	المقاومة النوعية للموصل	$\Omega.mm^2/m$

مثال 2

سلك من النحاس طوله ℓ يساوي (84 m) ومساحة مقطعه A تساوي ($1.5\ mm^2$)، احسب مقاومة السلك (R).

الجواب

باستخدام المقاومة النوعية (ρ):

$$R = \ell \times \rho / A = 84 \times 0.0178 / 1.5 = 0.9968 \cong 1\ \Omega$$

مثال 3

سلك مصنوع من النحاس على شكل ملف محول طوله (40 m) وقطره 0.5 mm وكانت المقاومة النوعية لمادته ($\frac{1}{56}$)، أحسب مقاومة السلك (R).

الجواب

مساحة مقطع السلك تساوي

$$A = \pi D^2 /4 = 3.14 \times (0.5)^2/4 = 0.196\ mm^2$$

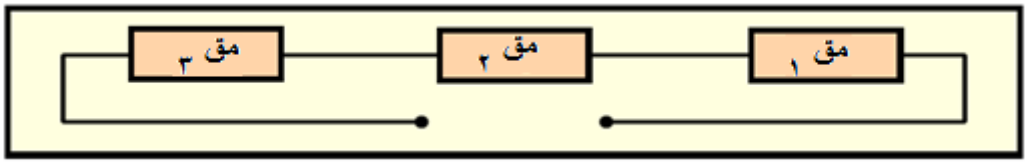
$$R = \ell \times \rho / A = 40 \times (1/56) / 0.196 = 3.6\ \Omega$$

11-8 الدوائر الكهربائية المتفرعة Branch Electric Circuit

توصل الأحمال والأجهزة والمقاومات في الدوائر الكهربائية، بعدة توصيلات مختلفة أما أن يكون توصيل توالٍ أو توصيل توازٍ أو توصيل مركب، وسوف يتم توضيح خصائص هذه التوصيلات وتوضيح ما يحصل لكل من التيار، الجهد والمقاومة خلال التوصيلات المختلفة وذلك للاستفادة منها في التطبيقات المختلفة.

11-8-1 توصيل المقاومات على التوالي Electric Conduction in Series

تتم عن طريق توصيل نهاية المقاومة الأولى ببداية المقاومة الثانية ونهاية المقاومة الثانية ببداية المقاومة الثالثة وهكذا، وكما هو مبين بالشكل (11- 10).



شكل 11-10 مقاومات كهربائية على التوالي

خواص توصيل المقاومات على التوالي:

نستنتج من الدائرة الكهربائية في الشكل (11-11) ما يأتي:

يكون التيار متساوياً في جميع أجزاء الدائرة الكهربائية أي أن:

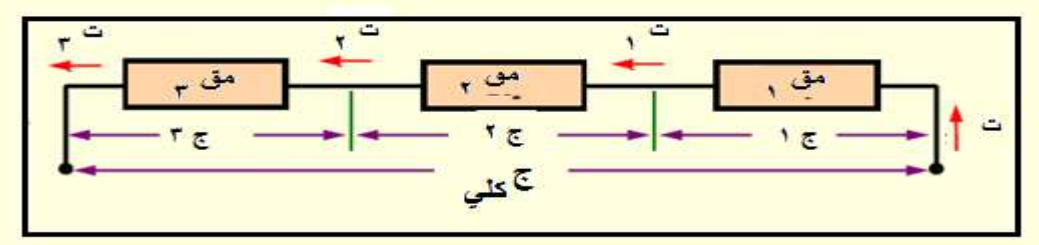
$$I = I_t = I_1 = I_2 = \ldots\ldots\ldots\ldots$$

يتجزأ فرق الجهد على عدد المقاومات الكهربائية، وعلى هذا الأساس فرق الجهد الكلي يساوي مجموع فروق الجهد على كل مقاومة في الدائرة

$$V_t = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots\ldots$$

المقاومة الكلية للدائرة تساوي مجموع المقاومات الكهربائية في الدائرة، أي أن:

$$R = R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots\ldots\ldots$$



شكل 11-11 خواص ربط المقاومات على التوالي

مثال 4

مقاومتان (R_1 = **4 Ω**، R_2 = **8 Ω**) موصلتان على التوالي إذا كان الجهد (V_t = **60 V**). احسب الآتي:

1- المقاومة الكلية 2- شدة التيار 3- الجهود الجزئية

الجواب

$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots$

$R_t = 4+8 = 12\ \Omega$

$I = V_t / R_t = 60/12 = 5\ A$

$V_1 = R_1 \times I = 4\times5 = 20\ V$

$V_2 = R_2 \times I = 8\times5 = 40\ V$

مثال 5

وصلت ثلاث مقاومات R_1 **10 Ω=**، R_2 **15 Ω=**، R_3 **20 Ω=** على التوالي إذا كان التيار المار في الدائرة (I= **5 A**). احسب الآتي:

1- المقاومة الكلية 2- الجهود الجزئية 3- الجهد الكلي

الجواب

$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots$

$R_t = 10 + 15 + 20 = 45\ \Omega$

$V_1 = R_1 \times I = 10 \times 5 = 50\ V$

$V_2 = R_2 \times I = 15 \times 5 = 75\ V$

$V_2 = R_3 \times I = 20 \times 5 = 100\ V$

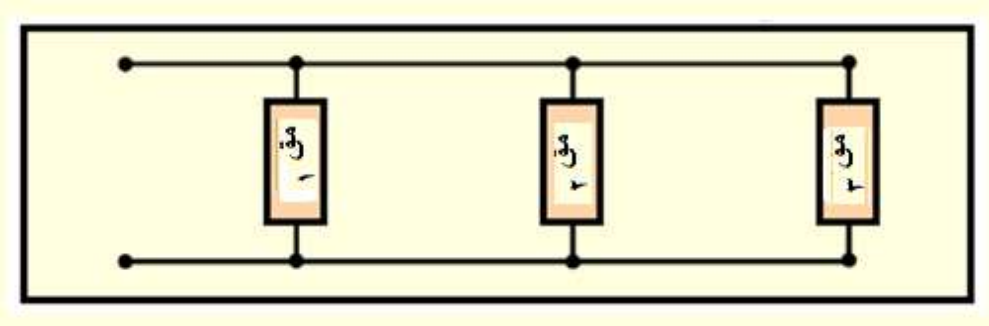
$V_t = R_t \times I = 45 \times 5 = 225\ V$

or

$V_t = V_1 + V_2 + V_3 = 50 + 75 + 100 = 225\ V$

2-8-11 توصيل المقاومات على التوازي Electric Conduction in Parallel

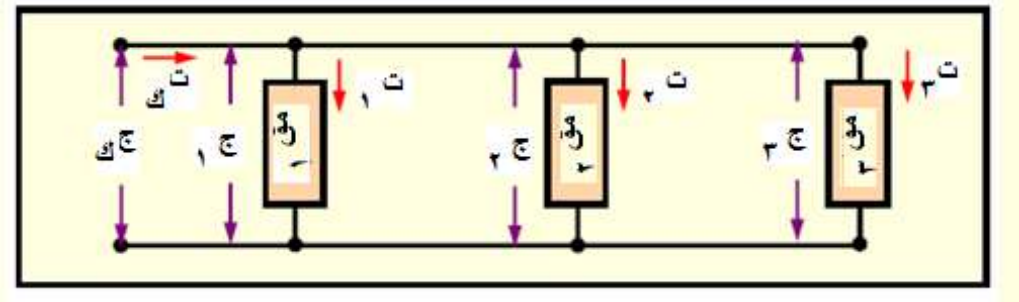
تتم عن طريق توصيل جميع بدايات المقاومات مع بعضها بعضاً وكذلك توصيل جميع نهاياتها مع بعضها بعضاً كما موضح بالشكل (11-12).



شكل 11-12 ربط المقاومات الكهربائية على التوازي

خواص توصيل المقاومات على التوازي

من الشكل (11-13) يمكن استنتاج خواص الربط على التوازي



شكل 11- 13 خواص الربط على التوازي

لذا نستنتج من الدائرة الكهربائية الآتي:

يتجزأ التيار الكلي على المقاومات وحسب قيمتها أي إن:

$$I = I_t = I_1 + I_2 + \ldots\ldots\ldots\ldots$$

بما أن الجهد متساو في دائرة التوازي فانه يمثل بالرمز (V) في جميع أجزاء الدائرة

$$V_t = V_1 = V_2 = V_3 = \ldots\ldots$$

مقلوب المقاومة الكلية (R_t) يساوي مجموع مقلوب المقاومات الموصلة على التوازي

1- مقاومات مختلفة مربوطة على التوازي

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

2- مقاومتان على التوازي

$$R_t = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

3- **مقاومات متساوية في القيمة على التوازي عددها (N)**

$$R = \frac{R}{\mathcal{N}}$$

مثال 6

مقاومتان (R_1 = **40 Ω**، R_2 = **10Ω**) مربوطتان على التوازي. إذا كان جهد المنبع (V = **240** V). احسب الاتي:

1- المقاومة الكلية 2- التيار في كلا المقاومتين 3- التيار الكلي

الجواب

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{40} + \frac{1}{10} = 0.025 + 0.1 = 0.125\ \Omega$$

$$R_t = \frac{1}{0.125} = 8\ \Omega$$

أو يمكن استخدام قانون المقاومتين

$$R_t = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{40 \times 10}{40 + 10} = \frac{400}{50} = 8\ \Omega$$

التيار:

فرق الجهد متساو على جميع المقاومات ويساوي 240 فولت إذاً:

$I_1 = V/R_1 = 240/40 = 6\ A$
$I_2 = V/R_2 = 240/10 = 24\ A$
$I_t = I_1 + I_2 = 6 + 24 = 30\ A$,or
$I_t = V/R_t = 240/8 = 30\ A$

مثال 7

ثلاث مقاومات (R_1=**4** Ω ، R_2= **8** Ω ، R_3 = **10** Ω) مربوطة على التوازي. إذا كان التيار المار بالمقاومة الأولى يساوي (**5** A). احسب الآتي:

1- المقاومة الكلية 2- التيار في جميع المقاومات 3- جهد المنبع

الجواب

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{10} = 0.25 + 0.125 + 0.1 = 0.475\ \Omega$$

$R_t = 1/0.475 = 2.1\ \Omega$

فرق الجهد متساوٍ على جميع المقاومات ويساوي:

$V = R_1 \times I_1 = 4 \times 5 = 20\ v$
$I_2 = V / R_2 = 20/8 = 2.5\ A$
$I_3 = V / R_3 = 20/10 = 2\ A$
$I_t = I_1 + I_2 + I_3 = 5 + 2.5 + 2 = 9.5\ A$
or

$$I_t = \frac{V}{R_t} = \frac{20}{2.1} = 9.52\ A$$

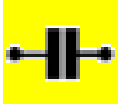
9-11 المتسعات Capacitors (C)

تُعد المتسعات من الأجزاء المهمة في صناعة الدوائر الإلكترونية الخاصة بأجهزة الإرسال أو الاستقبال أو أجهزة الراديو والكثير من الدوائر الكهربائية.

1-9-11 وظيفة المتسعة Capacitor Function

هي عبارة عن عنصر تخزين وتكثيف للشحنات أي إن المتسعة تخزن الشحنات (الطاقة الكهربائية) لفترة زمنية قصيرة وتنطلق منه هذه الطاقة في أثناء التفريغ.

ملاحظة: في حالة تغذية المتسعة بجهد مستمر فأنه يمنع مرور التيار في الدائرة الكهربائية ويرمز للمتسعة في الدوائر الكهربائية بالرمز:



11-9-2 تركيب المتسعة Capacitor Consist

تتكون من لوحين أو موصلين من المعدن بينهما مادة عازلة، كما موضح في الشكل (11-14).

11-9-3 سعة المتسعة Capacitor Capacity

هي قابلية المتسعة على تخزين الشحنات، ويرمز لسعة المتسعة بالرمز (C). تقاس سعة المتسعة بوحدة تسمى الفاراد (F). علماً أن الفاراد مقدار كبير نسبياً، لذا عادة ما يستخدم كوحدة قياس لسعة المتسعة المايكرو فاراد (μF) وهذا هو الشائع عملياً بالتطبيقات المعروفة.

مايكرو فاراد = 10^{-6} فاراد μF	نانو فاراد = 10^{-9} فاراد nF	بيكو فاراد = 10^{-12} فاراد pF

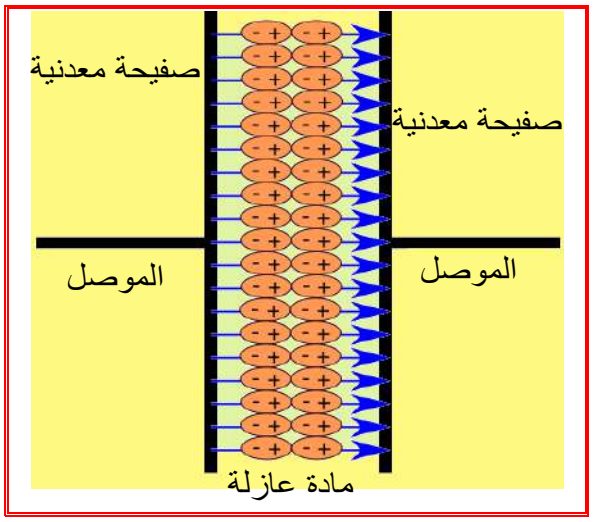
11-9-4 العوامل التي تعتمد عليها سعة المتسعة Factors Effect Capacitor Capacity

1- **مساحة الألواح**: كلما ازدادت مساحة الألواح ازدادت السعة أي تناسب طردي.

2- **عدد الألواح**: تحتوي بعض المتسعات على عدد من الألواح أو طبقات من الألواح، حيث كلما زاد عدد الألواح زادت السعة، أي التناسب طردي.

3- **المسافة بين الألواح**: كلما زادت المسافة بين الألواح قلت السعة أي التناسب عكسي.

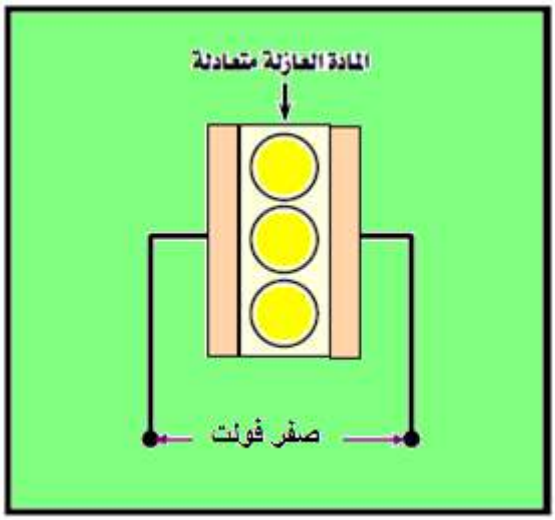
4- **نوع العازل بين الألواح**: يمكن تحديد مدى تأثير المادة العازلة على سعة المتسعة بثابت يسمى ثابت العازل النسبي لهذا المادة (ε).



شكل 11-14 مكونات المتسعة الكهربائية

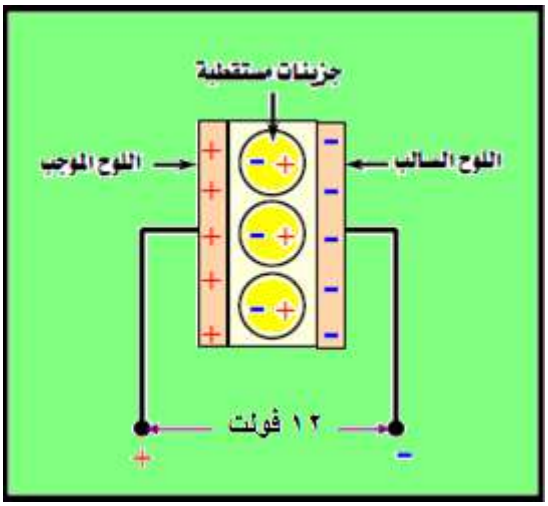
11-9-5 تأثير المادة العازلة على سعة المتسعة Insulator Effect on Capacitor Capacity

عند وجود مادة عازلة غير الهواء بين لوحي المتسعة تزيد من سعة المتسعة (كلما زادت عازلية المادة زادت سعة المتسعة) وتكون المادة العازلة متعادلة كهربائيا في الحالات العادية، كما هو موضّح بالشكل (11- 15).



شكل 11- 15 زيادة سعة المتسعة مع وجود مادة عازلة

أما إذا وضعت المادة العازلة بين لوحي المتسعة وربطت مع مصدر جهد مستمر فإنها تتأثر بالمجال الكهربائي الذي يوجد بين لوحي المتسعة ويحدث لها استقطاب وتصبح المادة العازلة عبارة عن جزيئات ثنائية الأقطاب، كما هو موضح بالشكل (11–16).



شكل 11- 16 الاستقطاب للمتسعة

11-9-6 أنواع المتسعات Types of Capacitors

تقسم المتسعات إلى قسمين:

1- **المتسعات الثابتة**

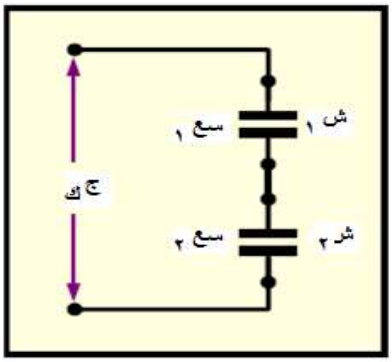
2- **المتسعات المتغيرة**

11-10 توصيل المتسعات Capacitors Connection

توصل المتسعات بعدة توصيلات مختلفة أهمها توصيل المتسعات على التوالي والتوازي، وسوف نتناول توضيح طريقة توصيلها وخصائصها.

1-10-11 توصيل المتسعات على التوالي Capacitors Connection in Series

طريقة التوصيل: يتم توصيل نهاية المتسعة الأولى مع بداية المتسعة الثانية ونهاية المتسعة الثانية مع بداية المتسعة الثالثة وهكذا، كما هو موضح بالشكل (11– 17).



شكل 11-17 توصيل المتسعات على التوالي

نستنتج من ربط المتسعات على التوالي ما يأتي:

تتساوى شحنة المتسعات في الدائرة أي أن:

$$Q_t = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \ldots\ldots\ldots\ldots$$

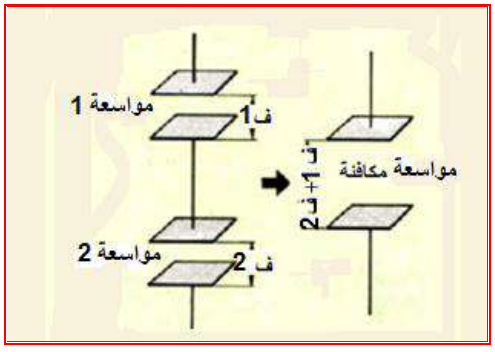
يتجزأ فرق الجهد على عدد المقاومات والمتسعات، وعلى هذا الأساس فأن فرق الجهد الكلي يساوي مجموع فروق الجهد على كل متسعة في الدائرة

$$V_t = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots\ldots\ldots\ldots$$

مقلوب السعة الكلية (C_t) يساوي مجموع مقلوب السعات النوعية

$$\frac{1}{C_t} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

ونستنتج أن قيمة السعة الكلية تكون أصغر من أي سعة مفردة في الدائرة. ويمكن التوصل إلى نفس النتيجة السابقة إذا ما اعتبرنا أن توصيل المتسعات على التوالي يزيد من المسافة الفاصلة بين الألواح وبذلك تقل السعة، كما هو موضح في الشكل (11– 18).

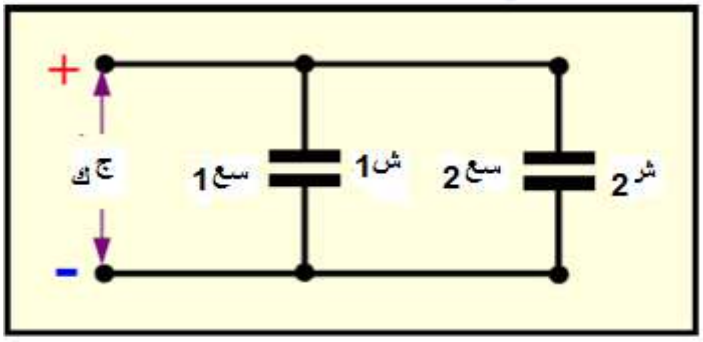


شكل 11– 18 توصيل المتسعات على التوالي يزيد من المسافة الفاصلة بين الألواح.

2-10-11 توصيل المتسعات على التوازي

Capacitors Connection in Parallel

وتتم عن طريق توصيل جميع بدايات المتسعات مع بعضها بعضاً وكذلك توصيل جميع النهايات مع بعضها بعضاً، كما هو موضح بالشكل (11-19).



شكل 11-19 توصيل المتسعات على التوازي

نستنتج من الدائرة الكهربائية ما يأتي:

الشحنة الكلية تساوي مجموع الشحنات الفرعية أي إن:

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots\ldots\ldots$$

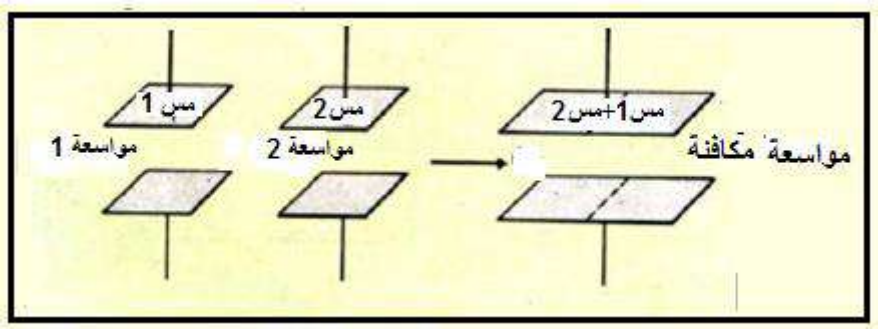
يكون الجهد متساوي على جميع المتسعات

$$V_t = V_1 = V_2 = V_3 = \ldots\ldots$$

السعة الكلية (C_t) تساوي مجموع السعات الفرعية

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots\ldots\ldots$$

نستنتج من توصيل المتسعات على التوازي أن قيمة السعة الكلية تزداد. ويمكن التوصل إلى هذه النتيجة إذا ما اعتبرنا أن توصيل المتسعات على التوازي يزيد من مساحة الألواح وبالتالي زيادة قابلية المتسعة من تخزين الشحنات (أي تزداد السعة)، كما هو موضح بالشكل (11-20).



شكل 11-20 توصيل المتسعات على التوازي يزيد من مساحة الألواح

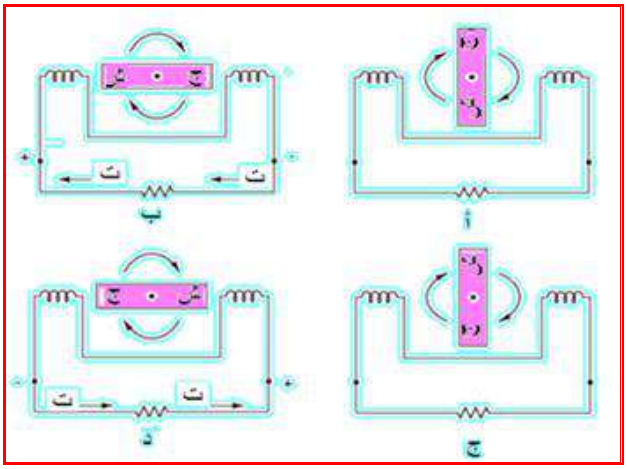
11-11 مبادئ التيار المتناوب Alternating Current Principles

التيار المتناوب هو الأكثر استعمالاً في كل مجالات التقنية الكهربائية، لهذا يجب فهم خصائصه جيداً، وسنحاول شرح هذه الخصائص في هذا الفصل بإيجاز.

1-11-11 تعريف التيار المتناوب Definition of Alternating Current

يكون التيار أو الجهد (متناوباً) إذا تغير اتجاهه وقيمته بصورة دورية منتظمة مع الزمن **Uniform** **Periodic** بحيث يمر في كل دورة بنفس التغييرات التي مر بها في الدورة السابقة.

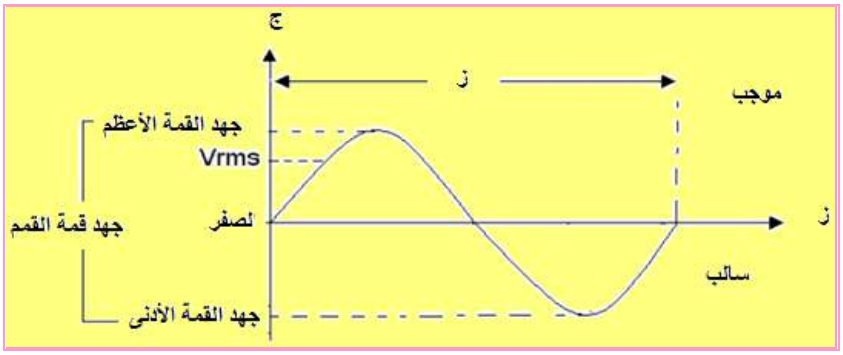
كيفية توليد التيار المتناوب : إذا وضع موصل كهربائي في مجال مغناطيسي متغير فإنه ينتج فيه قوة دافعة كهربائية محتثة حسب قانون فراداي، الشكل (11-21) يوضح مولد تيار متناوب يحتوي قطبين مغناطيسيين شمالي (**ش**) وجنوبي (**ج**) يدوران باتجاه عقرب الساعة، المجال المغناطيسي الذي يقطع موصلات الملفين سيولد قوة دافع كهربائية في هذه الموصلات، هذه القوة ستتسبب بمرور تيار إذا أغلقت دائرة الملفات عن طريق الحمل، ويكون اتجاه التيار متناوباً ويمر بالصفر في الشكلين (أ) و (**ج**) كما يمر بقيمته العظمى في الشكل (**ب**) ويمر بقيمته العظمى في الاتجاه المعاكس في الشكل (**د**).



شكل 11-21 مولد تيار متناوب يحتوي قطبين مغناطيسيين

2-11-11 المفاهيم الأساسية والتعريفات الخاصة بالتيار المتناوب Fundamental Concept and Definitions of Alternating Current

يبين الشكل (11-22) موجة التيار المتناوب ويمكن تعريف المفاهيم الآتية:



شكل 11-22 موجة التيار المتناوب

1. الزمن الدوري (**t**): هو الزمن اللازم لإتمام دورة كاملة ويقاس بالثانية.
2. **التردد** (f): هو عدد الدورات في الثانية الواحدة وتقاس بوحدة الهيرتز (**Hz**) ويرمز له بالرمز (***f***) ويحسب التردد من المعادلة الآتية:

$$f = \frac{1}{t}$$

إذ إن:

f	التردد	Hz
t	الزمن	s

3. **القيمة العظمى**: وهي أقصى قيمة موجبة يصل إليها التيار وتسمى أيضاً جهد القمة الأعظم (V_h).
4. **القيمة الصغرى**: وهي أقصى قيمة سالبة يصل إليها التيار وتسمى أيضاً جهد القمة الأدنى (V_L).
5. **جهد قمة القمم** (V_m):

وهو عبارة عن المسافة بين القمة الموجبة إلى القمة السالبة ويساوي:

$$V_m = 2 \times V_h = 2 \times V_L$$

6. **القيمة الفاعلة للجهد Effective Value (Vrms)**

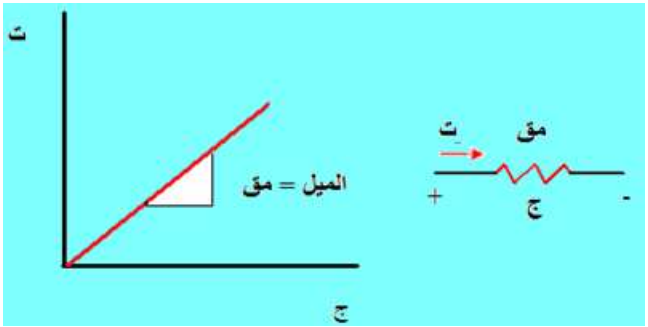
وهي قيمة الجهد الذي يمكن قراءته من جهاز الافوميتر ومختصر الحروف r.m.s. تعني جذر متوسط التربيع Root Mean Square، وتحسب القيمة الفعالة للجهد بدلالة القيمة العظمى وتساوي:

القيمة الفاعلة للجهد = القيمة العظمى / 1.4142

$$V_{rms} = V_m / 1.4142$$

12-11 قانون أوم Ohm's Law

أثبت العالم الألماني جورج سايمون أوم سنة 1826 إن التيار الكهربائي يتناسب طردياً مع الجهد المسلط على الدائرة، وإن العلاقة بين التيار والجهد في الدائرة الكهربائية هي علاقة خطية، كذلك فإن التيار يتناسب عكسياً مع المقاومة الكلية للدائرة، كما هو موضح بالشكل (11-23)، وسمي ذلك بقانون أوم (**Ohm's Law**) الذي ينص على أن **التيار المار عبر المقاومة يتناسب مباشرة مع الجهد المسلط على المقاومة، ويتناسب عكسياً مع قيمة المقاومة**.



شكل 11-23 العلاقة بين التيار والجهد في الدائرة الكهربائية

1-2-11 قانون أوم (صيغة التيار) Ohm's Law (Current Statement)

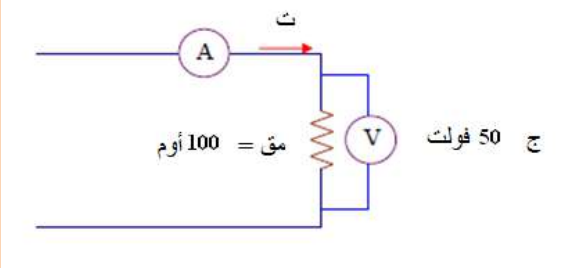
تمثل علاقة التيار ببساطة كما استنتجها أوم بالصورة الرياضية الآتية:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} \quad ، \quad I = \frac{V_t}{R_t}$$

R_1	المقاومة الجزئية	Ω
V_1	هبوط الجهد على المقاومة الجزئية	V
I_1	التيار الجزئي للمقاومة الجزئية	A
R_t	المقاومة الكلية	Ω
V_t	فرق الجهد الكلي	V
I_t	التيار الكلي	A

مثال 8

عند قياس قيمة هبوط الجهد على مقاومة قيمتها (100 Ω)، وجد أن قيمة الجهد تساوي (50 V)، ماهي قيمة التيار المار في المقاومة؟

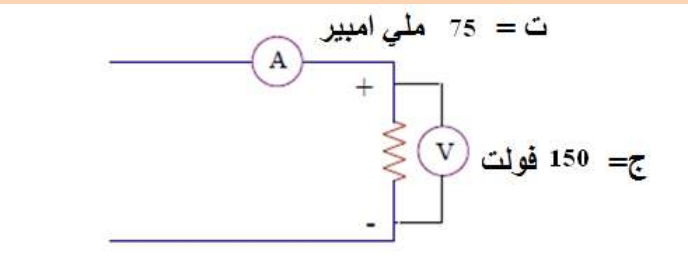


الجواب

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = 0.5 \text{ A}$$

مثال 9

قيمة هبوط الجهد على مقاومة (150 V)، وعند قياس التيار وجد أن قيمته تساوي (75 mA)، ماهي قيمة المقاومة؟



الجواب

$$R_1 = \frac{V_1}{I_1}$$

$$R_1 = \frac{150}{75\times10^{-3}} = 2 \times 10^3\ \Omega = 2\ k\Omega$$

مثال 10

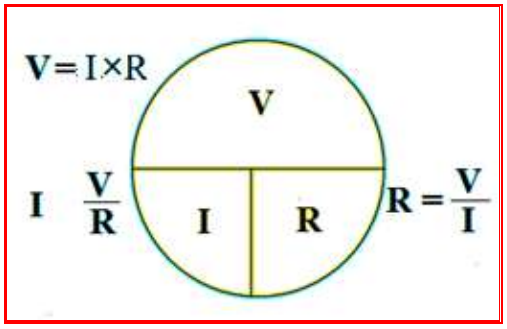
ما قيمة جهد المصدر في دائرة كهربائية، إذا كانت مقاومة الحمل تساوي (500 Ω) والتيار الناتج من المصدر (0.1 A).

الجواب

$$V = I_t \times R_t$$

$$V = 0.1 \times 500 = 50\ V$$

ويمكن تمثيل قانون أوم بالشكل (11-24).



شكل 11-24 تمثيل قانون أوم لجميع الحالات أعلاه

11-13 القدرة الكهربائية Electric Power

تستهلك الأجهزة الكهربائية في أثناء تشغيلها قدرة كهربائية وتحولها إلى قدرة نافعة (مثل قدرة تسخين أو قدرة ميكانيكية أو قدرة ضوئية....) وتزداد القدرة (**P**) بزيادة كل من شدة التيار (**I**) والجهد (**U**). وتُعد القدرة الكهربائية من أهم العناصر في الكهرباء. ونلاحظ على أي جهاز كهربائي أنه يكتب عليه القدرة التي يستهلكها.

ويرمز للقدرة الكهربائية بالرمز **P**

والقدرة الكهربائية في دوائر التيار المستمر تساوي حاصل ضرب فرق الجهد والتيار.

و تحسب القدرة الكهربائية من المعادلات أدناه:

$$P = V \times I = I^2 \times R = \frac{V^2}{R}$$

P	القدرة	W
V	فرق الجهد	V
I	التيار	A
R_t	المقاومة الكلية	Ω

الواط (W) هو القدرة الكهربائية المستهلكة في المقاومة عندما يمر تيار مقداره أمبير واحد عند فرق جهد مقداره فولت واحد.

الواط كباقي الوحدات له مضاعفات وأجزاء أصغر من الواط وكما يأتي:

الكيلو واط kW = 1000 واط	الواط = 1000 ملي واط mW	الكيلو واط = 10^6 ملي واط

وتقاس القدرة أيضاً بوحدات القدرة الحصانية حسب النظام البريطاني للوحدات وتستخدم لقياس قدرة محركات المكائن إضافة إلى المحركات الكهربائية. و يرمز لها (**hp**).

والعلاقة بين القدرة بالحصان والقدرة بالواط:

1 hp = 745.7 W ~ 746 W

1-13-11 قياس القدرة الكهربائية Electric Power Measurement

تقاس القدرة الكهربائية بطريقتين:

أ- الطريقة المباشرة لقياس القدرة Direct Method

حيث يستعمل جهاز قياس القدرة الكهربائية ويسمى الواطميتر (**Wattmeter**) وهو جهاز كهروديناميكي، ويتركب من ملفين ملف مقاومة قليلة وذي مساحة مقطع كبير وعدد لفاته قليلة ويوصل على التوالي مع الحمل ويكون ثابتاً، وملف متحرك آخر للجهد مقاومته كبيرة وذو مساحة مقطع صغيرة وعدد لفاته كثيرة ويوصل على التوازي مع الحمل ويركب على محور ارتكاز ويكون المؤشر مثبتاً به.

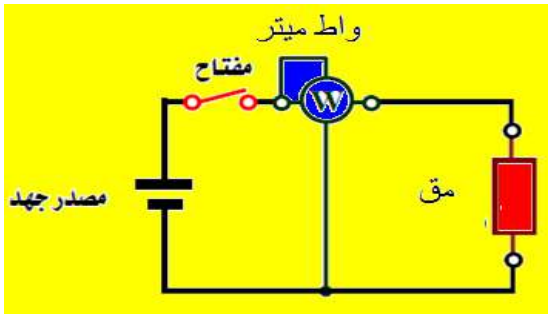
ويعتمد انحراف مؤشر جهاز قياس القدرة على قيمة كل من التيار المار في الحمل والجهد بين طرفيه، والشكل (11-25) يوضح طريقة توصيل الواطميتر لقياس القدرة الكهربائية.

ب- الطريقة غير المباشرة لقياس القدرة Indirect Method

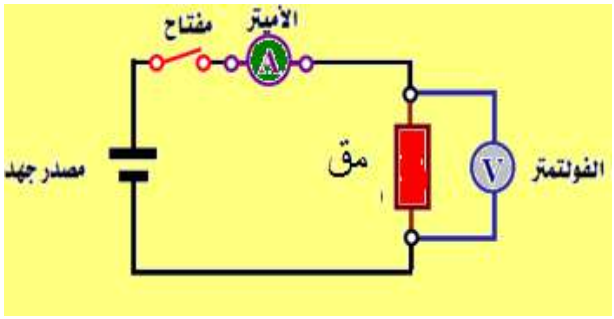
ويستعمل لهذا الغرض جهاز قياس فرق الجهد (الأوفوميتر) وجهاز قياس شدة التيار (الأميتر)، ويتم قياس التيار المار في الدائرة وفرق الجهد المسلط على الدائرة ومنها يمكن حساب القدرة عن طريق ضرب فرق الجهد في التيار المقاس.

$$P = V \times I$$

ويبين الشكل (11–26) الطريقة غير المباشرة لقياس القدرة.



شكل 11-25 تركيب الواطميتر في الدائرة الكهربائية لقياس القدرة



شكل 11-26 قياس القدرة عن طريق قياس التيار وفرق الجهد

مثال 11

دائرة كهربائية فرق الجهد المسلط عليها يساوي (220 V) وتحتوي الدائرة على مقاومة مقدارها (5 Ω)، احسب قدرة الجهاز بوحدات kW.

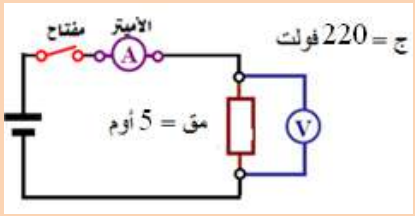
الجواب

$P = V^2 / R$

$P = (220)^2 / 5 = 9680$ W

ويمكن حل السؤال بطريقة أخرى، عن طريق استخراج قيمة التيار في الدائرة وكما يأتي:

$$I = V / R$$



$I = 220 / 5 = 44$ A

ثم نستخرج القدرة من المعادلة الآتية:

$P = I^2 \times R = (44)^2 \times 5 = 9680$ W

أو من المعادلة التالية:

$P = V \times I = 220 \times 44 = 9680$ W

$P = 9680 / 1000 = 9.68$ kW

مثال 12

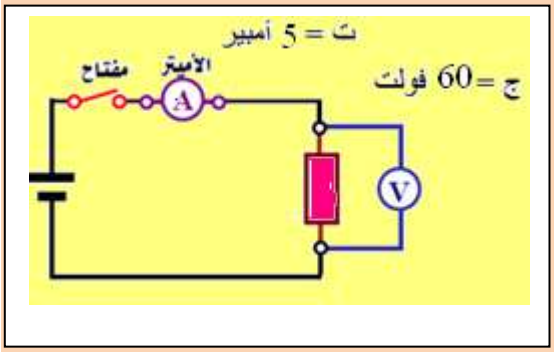
عند قياس فرق الجهد على محرك كهربائي وجد بأنه يساوي (60 V)، وعند قياس التيار وجد أنه يسحب تياراً مقداره (5 A)، جد قدرة المحرك بوحدات kW.

الجواب

يمكن حل السؤال مباشرة باستخدام القانون التالي:

$$P = V \times I = 60 \times 5 = 300 \text{ W}$$

أو عن طريق استخراج قيمة المقاومة



$$R = V / I$$

$$R = 60 / 5 = 12\ \Omega$$

ثم نستخرج القدرة من المعادلة الآتية:

$$P = I^2 \times R$$

$$P = 5^2 \times 12 = 300 \text{ W}$$

أو باستخدام القانون الآتي:

$$P = V^2 / R$$

$$P = \frac{60^2}{12} = \frac{3600}{12} = 300 \text{ W}$$

$$P = 300 / 1000 = 0.3 \text{ kW}$$

أسئلة الفصل الحادي عشر

س1) اشرح بصورة مختصرة التركيب الذري للمادة.

س2) وضّح كيفية الحصول على الشحنات الموجبة والسالبة.

س3) عدد أنواع التيارات الكهربائية اعتماداً على شكل المصدر.

س4) ما المقصود بالجهد الكهربائي؟

س5) عدد مصادر الطاقة الكهربائية.

س6) وصلت ثلاث مقاومات Ω (5 ، 25 ، 40) على التوالي، احسب المقاومة الكلية. ج / 70 Ω

س7) وصلت مقاومتان على التوالي، فإذا كان فرق الجهد على R_1 يساوي 90 V ، وفرق الجهد على R_2 يساوي 30 V ، احسب فرق الجهد الكلي. ج/ 120 V

س8) وصلت مقاومتان على التوازي R_1 تساوي 9 Ω ، R_2 تساوي 18 Ω ، احسب المقاومة الكلية. ج/ 6 Ω

س9) وصلت مقاومتان على التوازي، فإذا كان التيار الذي يمر بالمقاومة الأولى يساوي 5 A، في حين أن التيار الذي يمر بالمقاومة الثانية يساوي 7 A. احسب التيار الفعلي للدائرة. ج/ 12 A

س10) مقاومتان R_1 تساوي 6Ω، R_2 تساوي 3 Ω، موصلتان على التوازي، فإذا كان فرق الجهد الكلي يساوي 24 V، احسب 1- المقاومة الكلية، 2- التيار الكلي 3- التيار المار بكل مقاومة. ج/ 2 Ω ، 12 A، 4 A، 8 A

س11) مقاومتان، R_1 تساوي 12Ω، R_2 تساوي 24Ω، موصلتان على التوالي، فإذا كان التيار الكلي يساوي 6 A، احسب 1- المقاومة الكلية، 2- الجهد الكلي 3- الجهد الجزئي.
ج/ 36 Ω، 216 V ، 72 V ، 144 V

س12) ما هي العلاقة التي تربط بين التيار والجهد الكهربائي التي أثبتها العالم أوم؟ وضّحها مع الرسم.

س13) كيف يمكن تمثيل قانون أوم؟

س14) ربطت مقاومتان Ω (**5** ، **20**) على التوازي، ثم ربطت المجموعة مع مقاومتين على التوالي مقدارهما Ω (**12**، **8**) ، ووصلت المقاومات مع مصدر ضغط (**12 V**)، احسب ما يأتي: 1. المقاومة المكافئة 2. التيار الكلي 3. هبوط فرق الجهد على كل مقاومة

س15) مسخن (هيتر) كهربائي مقاومته (**20 Ω**)، وفرق الجهد المسلط عليه يبلغ (**220 V**)، احسب مقدار قدرة المسخن.