الجامعــة التقنيــة الشماليــة
المهعد التقني كركوك
قسـم تقنيات ميكانيك القدرة
فرع التبريد والتكييف

REFRIGERATION SYSTEM

Refrigeration System

Soran Jalal Mohammed

Subject Lecturer

2023-2022

التبريد

التبريد يُعنى بالدرجة الأولى بالمادة والطاقة. المادة تتواجد في ثلاث عناصر، عنصر المادة الصلبة والسوائل والغازات. من الناحية الأخرى يعبر عن الطاقة بأنها القدرة على إنجاز عمل ما. وجميع عناصر المواد تتكون من جزئيات صغيرة تتأثر بالضغط ودرجة الحرارة والتي يمكن عن طريقيهما تحويل المادة من عنصر إلى آخر حسب ترابط جزئيات المادة وكمية الطاقة المبذولة على المادة نفسها.

درجة الغليان والضغط

يمكن تقسيم أحوال المادة إلى ثلاث أحوال هي:

- حالة الصلابة solids .
- حالة السيولة liquids .
- الحالة الغازية gases .

ويمكن القول بأن المواد الصلبة غير قابلة للانضغاط incompressible بينما السوائل (liquids) صعبة الانضغاط relatively incompressible أما الغازات فهي قابلة للانضغاط حيث تَتْبَعُ كثير منها القانون العام للغازات:.

$$pV = mRT$$

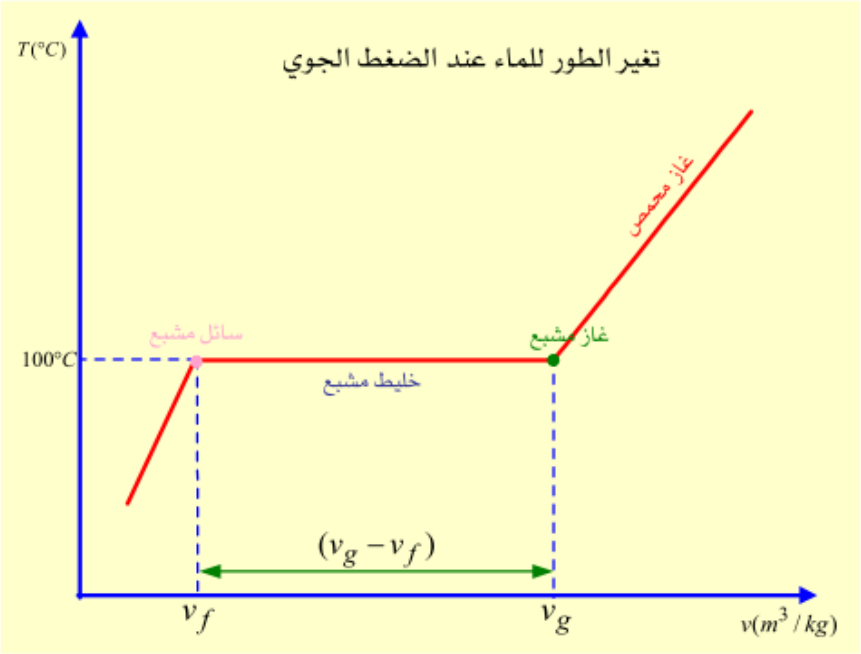
حيث إن:

ضغط الغاز	p = {Pa }
حجم الغاز	V={ m^3}
كتلة الغاز	m ={ kg }
درجة الحرارة المطلقة للغاز	T= {K }
ثابت الغاز	R={J/kg K}

والحالات الأكثر شيوعاً لتغير المادة من طور إلى آخر يمكن تلخيصها في الآتي:

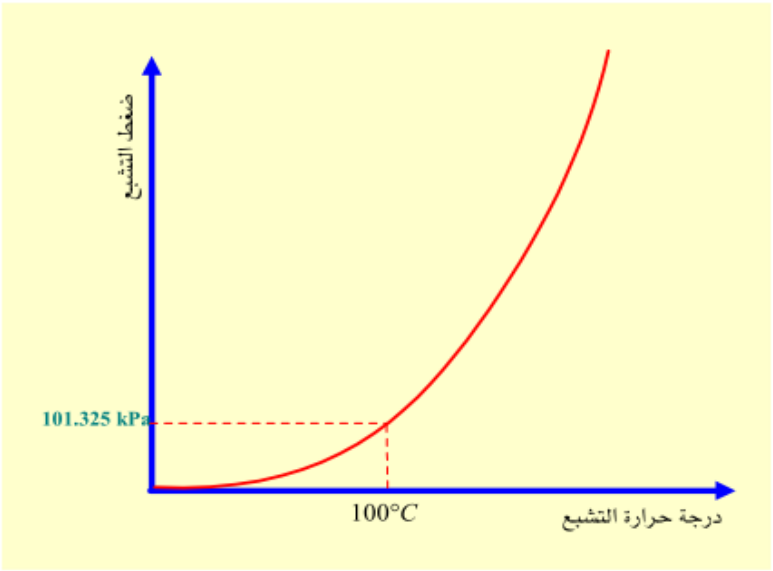
الطور	الاسم		مثال
حالة الصلابة – حالة السيولة	الانصهار	melting	تحول الثلج إلى ماء
حالة السيولة – الحالة الغازية	الغليان	boiling	تحول الماء إلى بخار ماء
الحالة الغازية – حالة السيولة	التكثيف	condensation	تحول بخار الماء إلى ماء
حالة السيولة – حالة الصلابة	التجمد	freezing	تحول الماء إلى ثلج

جدول (١ – ١): أحوال المادة



شكل (١ – ١): علاقة درجة الحرارة مع الحجم النوعي للماء

ويلاحظ في هذا الرسم إنه في حالة غليان الماء (تغير الطور) فإن درجة الحرارة تظل ثابتة وتعرف كمية الحرارة هذه بالحرارة الكامنة (latent heat) وهي الحرارة اللازمة لتغير كتلة مادة ما من طور إلى آخر دون زيادة في درجة الحرارة وهذه الحرارة لا يمكن قياسها عن طريق الثيرمومتر thermometer بينما يلاحظ التغير في الحجم النوعي مع زيادة درجة الحرارة. كما يلاحظ الزيادة في الحجم النوعي في كل الأحوال. غير ذلك فإن زيادة الضغط يصحبه زيادة في درجة الحرارة كما يلاحظ في الشكل التالي:



شكل (١ – ٢): علاقة ضغط التشبع مع حرارة التشبع للماء

هذا الشكل ينطبق على كثير من السوائل وخاصة وسائط التبريد عند مختلف درجات الحرارة.

مما سبق يمكن استخلاص الآتي:

- عند تغير الطور(الغليان مثلاً) تكون درجة الحرارة والضغط ثابتين بينما يتغير الحجم النوعي.
- تعرف الزيادة في درجة الحرارة عن درجة الغليان بالتحميص superheating ، فمثلاً إذا كانت درجة حرارة ماء عند الضغط الجوي هي $107°C$ فإن مقدار التحميص هو $107°C$حيث إن درجة غليان الماء عند الضغط الجوي هي $100°C$.
- يعرف التبريد الدوني *subcooling* بمقدار الانخفاض في درجة حرارة سائل ما عن درجة الغليان، فمثلاً إذا كانت درجة حرارة ماء عند الضغط الجوي هي $95°C$ فإن مقدار التبريد الدوني هو $5°C$حيث إن درجة غليان الماء عند الضغط الجوي هي $100°C$.

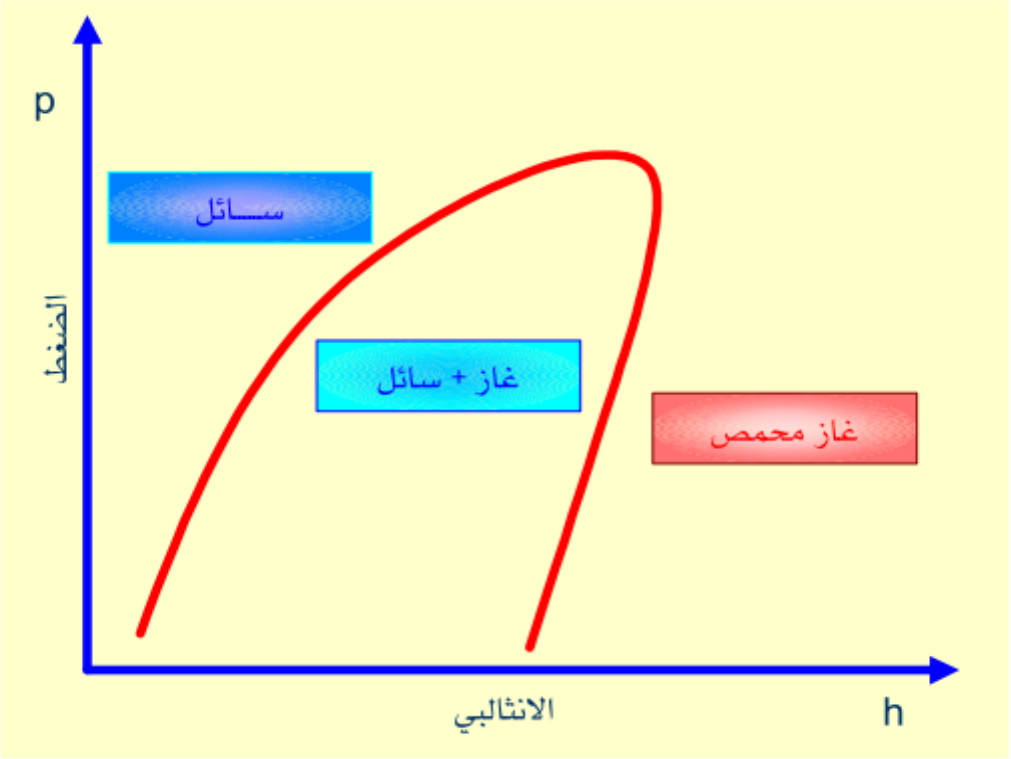
جداول و خرائط وسائط التبريد

لمعرفة أداء دورة التبريد الانضغاطية، يجدر التعرف على خرائط وجداول وسائط التبريد. والخرائط الشائعة الاستعمال عند تحليل أداء دورة التبريد الانضغاطية هي خرائط الضغط والانثالبي (p-h diagram) وخرائط درجة الحرارة - الإنتروبي (T-s diagrams) غير إن خرائط p-h أكثر استعمالاً من خرائط T-s وهذا المخطط مقسم إلى ثلاث مناطق مفصول بينها بخطي التشبع (سائل أو بخار) وهي:

ا – منطقة التبريد الدوني وهي تقع على الجانب الأيسر من المخطط وفي هذه المنطقة يكون وسيط التبريد في حالة سائل فقط ودرجة الحرارة تكون أقل من درجة حرارة التشبع بالنسبة لأي ضغط.

ب – منطقة التحميص وهي المنطقة التي تقع على الجانب الأيمن من المخطط. وفي هذه المنطقة يكون وسيط التبريد في حالة بخار فقط ودرجة الحرارة تكون أكبر من درجة حرارة التشبع بالنسبة لأي ضغط.

ج – المنطقة الوسطي حيث يكون وسيط التبريد في حالة تغير الطور (سائل + غاز). المسافة الأفقية بين خطي التشبع مقروءة على إحداثيات الإنثالبي عند أي ضغط تعرف بالحرارة النوعية للانصهار لوسيط التبريد(latent heat of vaporization) مع ملاحظات إن قيمة هذه الحرارة الكامنة تقل مع زيادة الضغط.



شكل (١ – ٣): مخطط الضغط مع طاقة الانثالبي

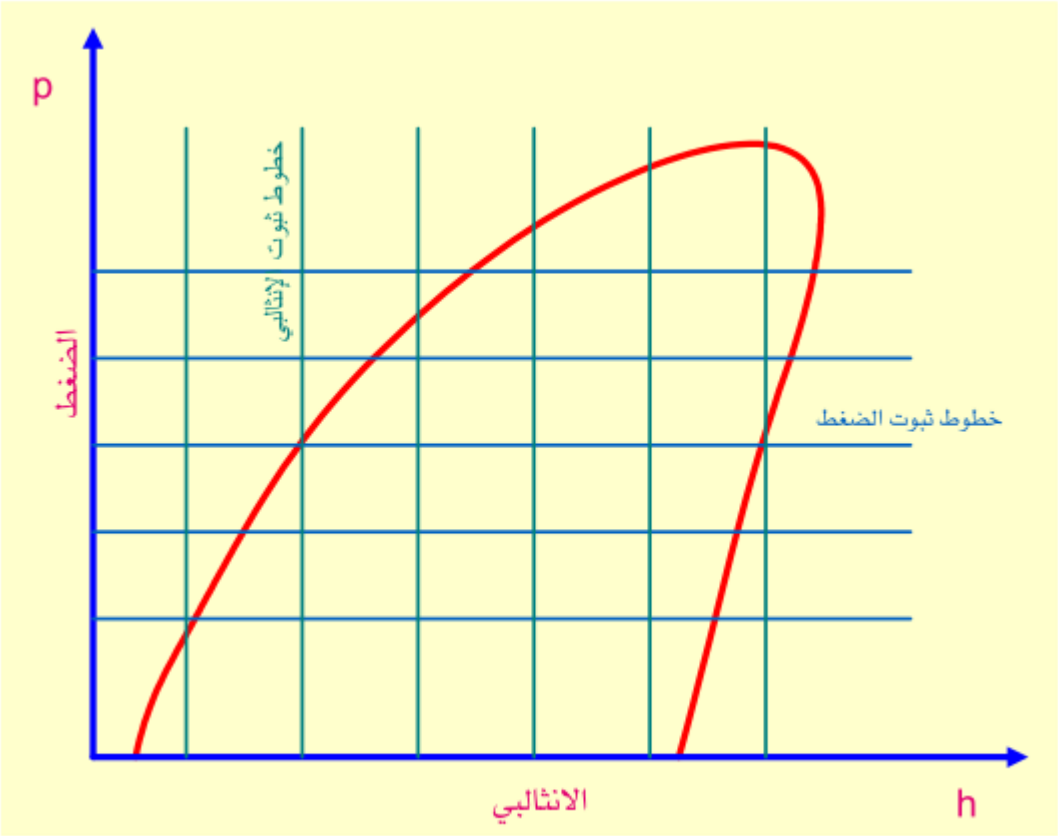
و مخطط $p-h$ يحتوي على ست خطوط وهي كالتالي:-

١ - خطوط ثبوت الضغط $(p=c)$:

وهي الإحداثيات الرأسية للمخطط $(\log p)$ بوحدات الضغط (bar).

٢ - خطوط ثبوت طاقة الانثالبي $(h=c)$:

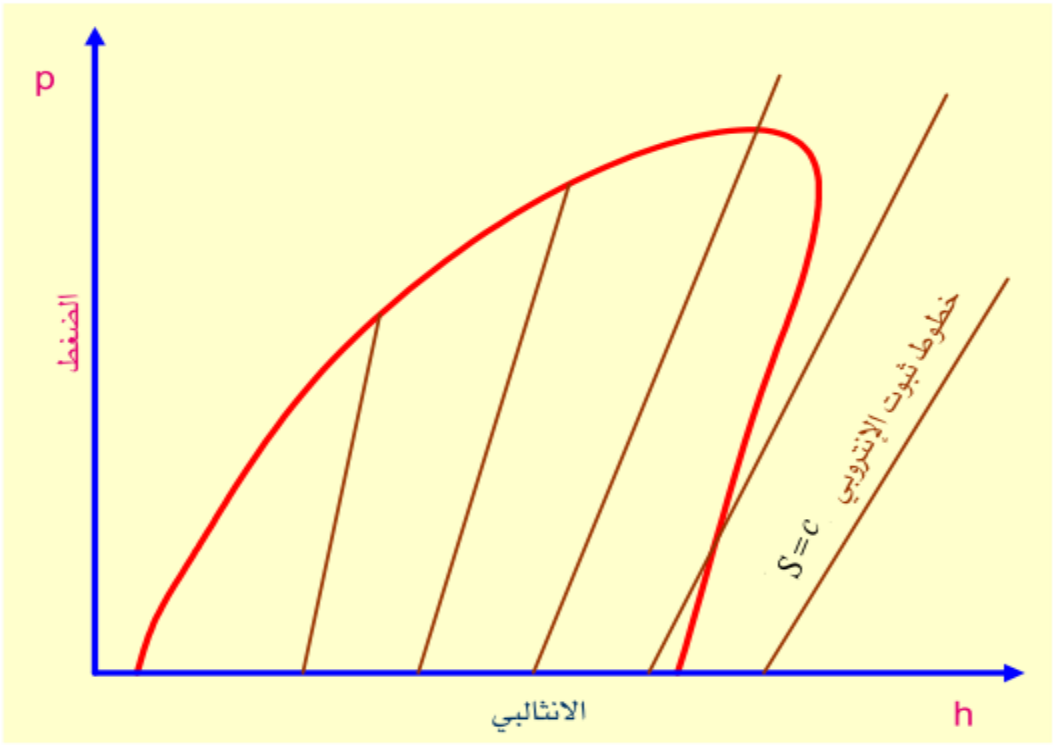
وهي الإحداثيات الأفقية للمخطط بوحدات الإنثالبي (kJ/kg).



شكل (١ – ٤): خطوط ثبوت الضغط وخطوط ثبوت طاقة الإنثالبي على مخطط p-h

٣ - خطوط ثبوت الانتروبي $(s = c)$ وهي بوحدة (kJ / kgK) :

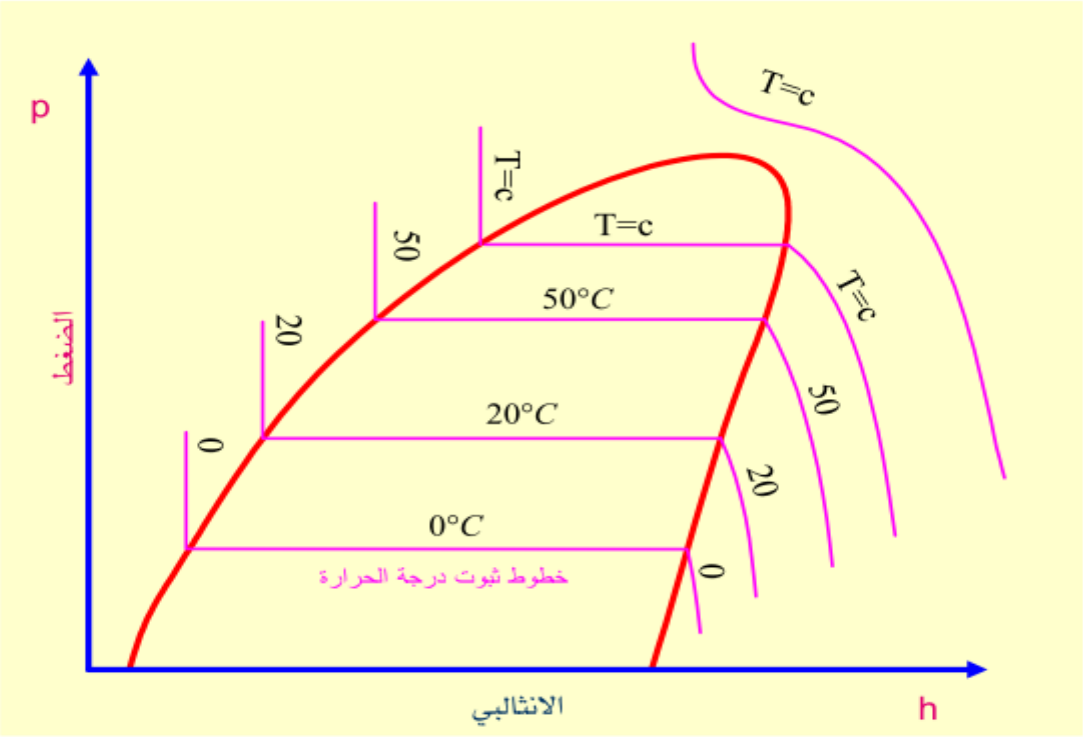
تكون هذه الخطوط قطرية *(diagonally)* مع ميل ناحية الاتجاه الرأسي.



شكل (١ – ٥): خطوط ثبوت الإنتروبي (s = c)

٤ - خطوط ثبوت درجات الحرارة $(T = c)$:

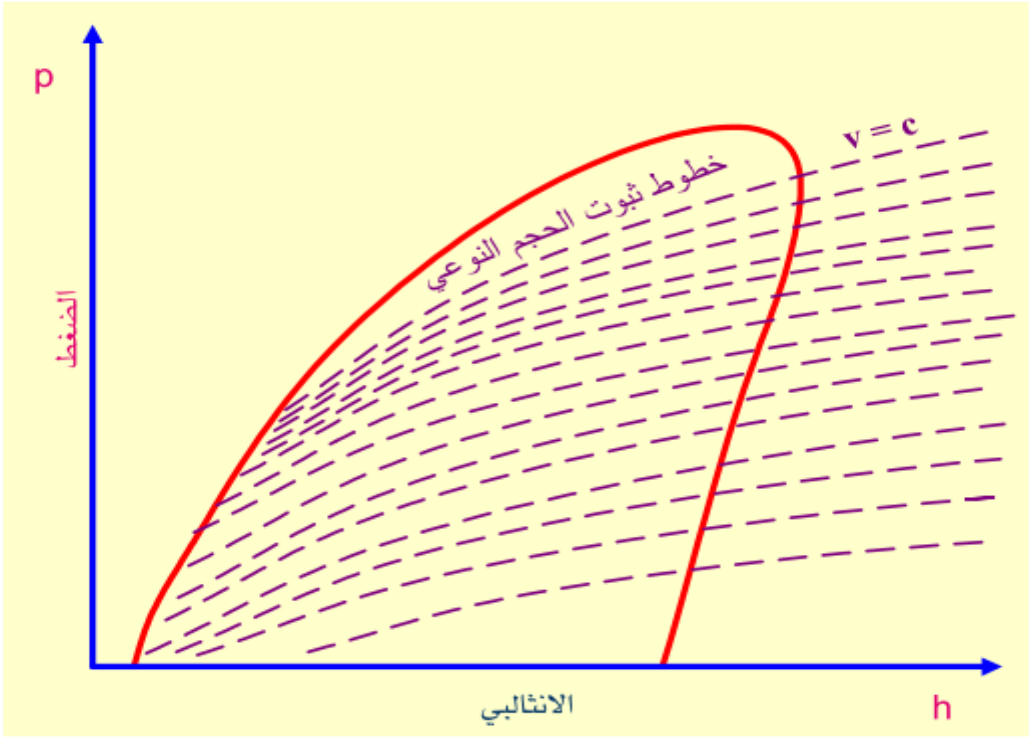
في منطقة التبريد الدوني تكون خطوط درجة الحرارة رأسية موازية لإحداثيات الضغط وتكون هذه الخطوط أفقية وموزاية لإحداثيات الإنثالبي في منطقة تغير الطور وفي منطقة التحميص تكون هذه الخطوط مائلة إلى أسفل المخطط وهي بوحدة $°C$.



شكل (١ – ٦): خطوط ثبوت درجة الحرارة

٥ - خطوط ثبوت الحجم النوعي $(v = c)$:

يكون منحنى ثبوت الحجم النوعي منطقة التحميص تقريبا أفقية مع زاوية ميل بسيطة تجاه الرأسي. وهي أما بوحدة m^3/kg أو بوحدة l/kg. خطوط ثبوت الحجم النوعي تزيد ناحية الأسفل.



شكل (١ – ٧): خطوط ثبوت الحجم النوعى

٦ - معامل الجفاف (x) *dryness fraction* :

يكون تغير الطور من سائل إلى بخار في المنطقة الوسطى من ناحية اليسار إلى اليمين. و يكون تغير الطور من بخار إلى سائل في المنطقة الوسطى من ناحية اليمين إلى اليسار. وتعرف نسبة كمية البخار لوسيط التبريد في هذه المنطقة منسوبا إلى الكتلة الكلية لوسيط التبريد بمعامل الجفاف (x) *dryness fraction* .

معامل الجفاف = كتلة بخار وسيط التبريد / الكتلة الكلية لوسيط التبريد

$$x = \frac{m_v}{m}$$

حيث :-

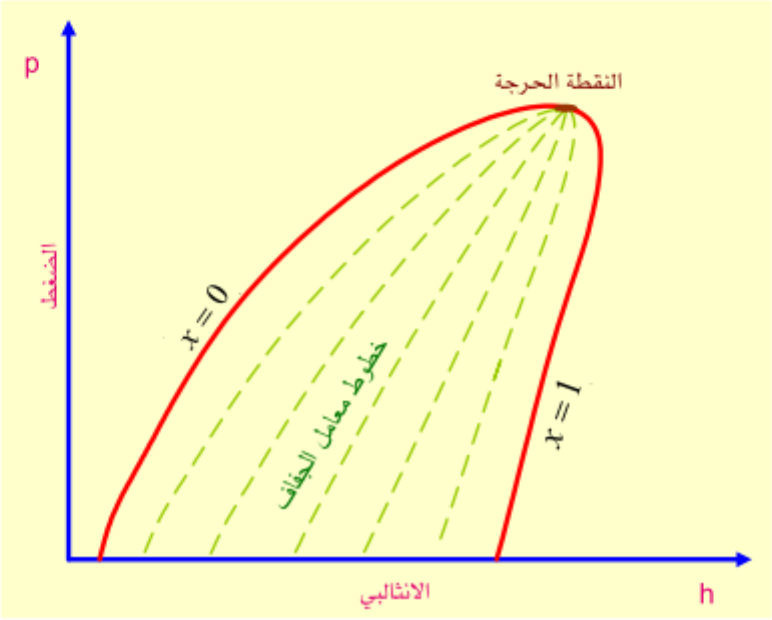
معامل الجفاف : x

كتلة بخار وسيط التبريد : m_v

كتلة وسيط التبريد : m

(ملحوظة $0 \le x \le 1$)

فمثلا عند خط تشبع السائل يكون $x = 0$ وعند خط التشبع لبخار وسيط التبريد يكون $x = 1$ وعندما يكون $x = 0.10$ يعني إن كمية بخار وسيط التبريد تكون 10% بالنسبة لكتلة وسيط التبريد ، وفي هذه الحالة تكون أقرب إلى خط التشبع للسائل وعندما يكون $x = 0.90$ يعني إن كمية بخار وسيط التبريد تكون 90% بالنسبة لكتلة وسيط التبريد وفي هذه الحالة تكون أقرب إلى خط التشبع للبخار.



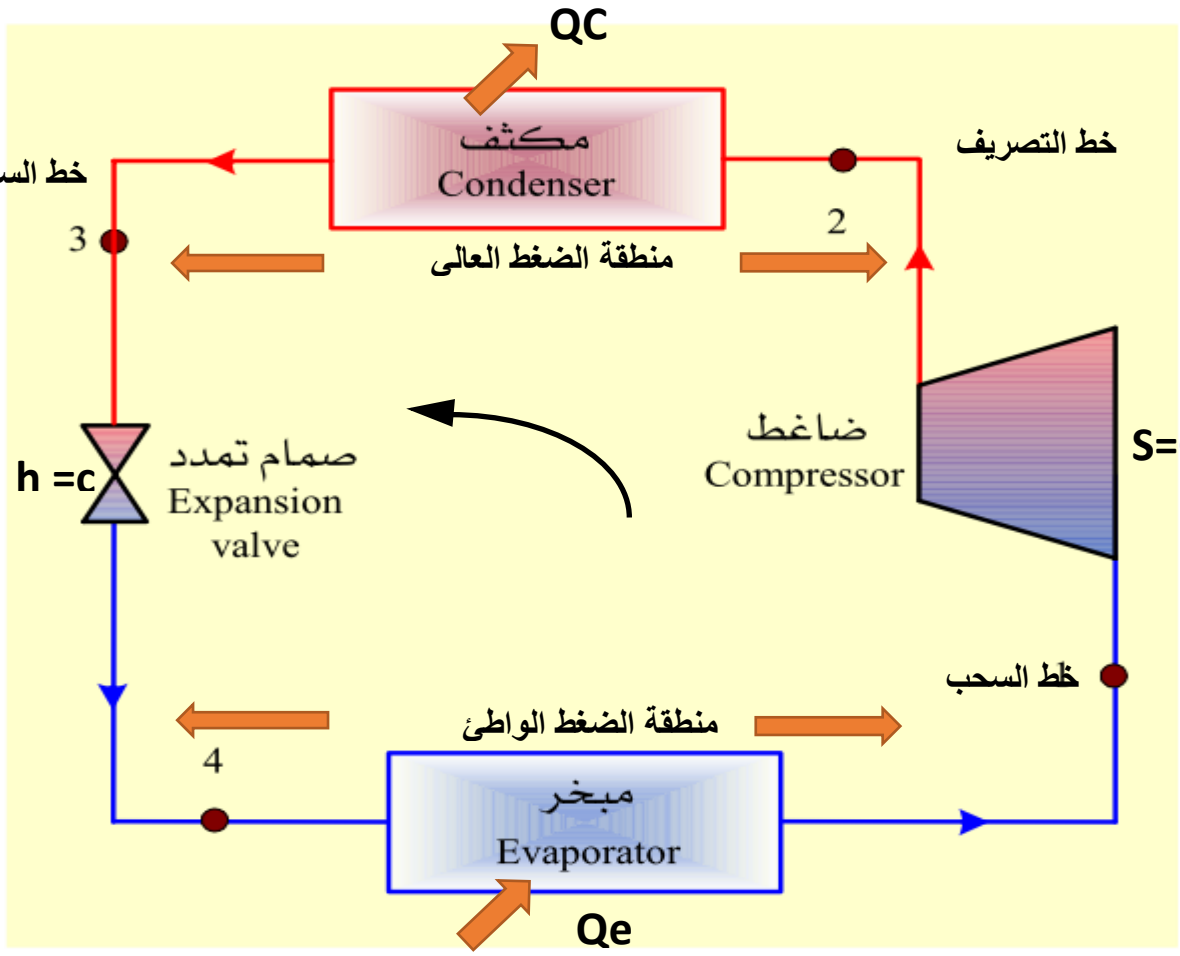
شكل (١ – ٨): خطوط معامل الجفاف

دورة البخار الانضغاطية

التبريد عملية تخفيض درجة حرارة مادة او جسم والمحافظة عليها اقل من درجة حرارة المحيط . وللحصول على التثليج يجب ازالة الحرارة من المادة او الجسم المطلوب تثليجه ونقلها الى مادة اخرى وتتم هذه العملية بوساطة عامل التثليج يسمى مائع التثليج Refrigerant

مكونات دائرة التبريد الميكانيكية

يمكن تمثيل المكونات الميكانيكية لدورة التبريد بالشكل التالي:



شكل (١) : مخطط الانسياب (flow diagram) لدورة التبريد

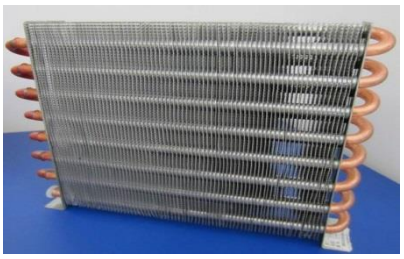
وهذه المكونات هي:

أ. الضاغط **(compressor):**

وظيفته زيادة ضغط وسيط التبريد من الضغط المنخفض إلى الضغط الأعلى. وتوجد هنالك عدة أنواع من الضواغط المستعملة في دوائر التبريد نذكر منها الضواغط الترددية، الدورانية، الحلزونية وضواغط الطرد المركزي.... إلخ.

المكثف (Condenser) :

وهو عبارة عن مبادل حراري الغرض منه التخلص من كمية الحرارة الزائدة إلى الجو المحيط به (درجة حرارة المكثف أكبر من درجة حرارة الوسط المحيط $T_{cond} > T_{env}$). وغالبا ما يتم تبريد المكثف بالهواء (طبيعي أو جبري) أو بالماء.



مكثف

صمام التمدد(expansion valve)

توجد أنواع مختلفة من أدوات التمدد ، وهي ذات وظائف متشابهة ، اذ تعمل على تخفيض الضغط في منظومات التثليج من الضغط العالي في المكثف الى الضغط الواطئ في المبخر، للحصول على درجة الحرارة الواطئة المطلوبة في المبخر والمناظرة للضغط الواطئ. وكذلك تعمل على تنظيم معدل أنسياب مائع التثليج الى المبخر بحيث يتكافأ مع معدل

التبخير.

-أ- **(اشكال صمامات التمدد أ- ب)** **-ب-**

المبخر(evaporator):المبخر في منظومة

التثليج عبارة عن مبادل حراري heat exchanger ينتقل الحرارة من المادة المبردة او المثلجة الى مائع التبريد المغلي وبما ان الغرض من منظومة التثليج هو ازالة حرارة من الماء او الهواء او بعض المواد الاخرى فان هذا التخلص من الحرارة يتم بواسطة المبخر.

دورة انضغاط البخار البسيطة Simple Vapor Compression Cycle (VCC)

دورة انضغاط البخار البسيطة تعرف أحيانا بدورة رانكين .Rankine Cycle أو الدورة النظرية للتبريد والعمليات الأساسية لدورة البخار الانضغاطية البسيطة يمكن تلخيصها في الأتي:

العملية 2 → 1 عملية ثبوت الإنتروبي Process 1-2: Isentropic Compression (S=c)

_عند دخول وسيط التبريد إلى الضاغط يكون في حالة بخار (x=1) وبعدها يتم ضغط وسيط التبريد في عملية أدياباتية عكسية (ثبوت الانتروبي) حيث يزداد الضغط من ضغط السحب عند النقطة (1) إلى ضغط الطرد (النقطة2). وعليه يتم بذل شغل للضاغط. وباستخدام القانون الأول للديناميكا بين النقطتين (1) و (2) نجد أن:

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

حيث:

شغل الانضغاط $W_c = \{kW\}$

الانثالبي عند النقطة (1) $h_1 = \{kJ/kg\}$

الانثالبي عند النقطة (2) $h_2 = \{kJ/kg\}$

وذلك بفرض الآتي:

- التغير في طاقة الوضع والحركة صغير جدا ويمكن إهماله

العملية 3 → 2 عملية فقدان الحرارة بالمكثف (مع ثبوت الضغط) Process 2-3 Heat Rejection to hot region (@ P=c)

عند سريان وسيط التبريد في المكثف من (2) إلى (3) يتم فقدان الحرارة إلى الجو المحيط الذي في درجة حرارة أقل من درجة حرارة المكثف.وسيط التبريد يدخل المكثف في حالة تحميص حيث يبرد تبريداً محسوسا مع ثبوت الضغط إلى درجة التشبع بعدها تكون عملية التبريد في المكثف تبريدً كامناً حتى يصل وسيط التبريد إلى النقطة (3) عندها يكون وسيط التبريد سائلاً مشبعاً.

تكون كمية الحرارة المفقودة من المكثف (Q_c) هي:

$$Q_c = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

الحرارة المفقودة خلال المكثف $Q_c = \{kW\}$

الانثالبي عند النقطة (3) $h_3 = \{kJ/kg\}$

الانثالبي عند النقطة (2) $h_2 = \{kJ/kg\}$

العملية 4 → 3 عملية الخنق خلال صمام التمدد (مع ثبوت الإنثالبي) @ Process 3-4 Throttling Process (h=c)

عملية الخنق التي تتم خلال صمام التمدد تؤدي إلى خفض ضغط المكثف إلى الضغط المنخفض للمبخر عند (4). في العملية 4 → 3 كلا من درجة الحرارة والضغط يتم خفضهما. وباعتبار عملية الخنق هذه عملية أدياتية وبدون بذل أي شغل، يمكن باستعمال القانون الأول للديناميكا الحرارية التوصل إلى التالي:

$$h_4 = h_3$$

العملية 1 → 4 عملية اكتساب الحرارة بالمبخر (مع ثبوت الضغط) Process 3-4 Heat addition at cold region (@ P=c)

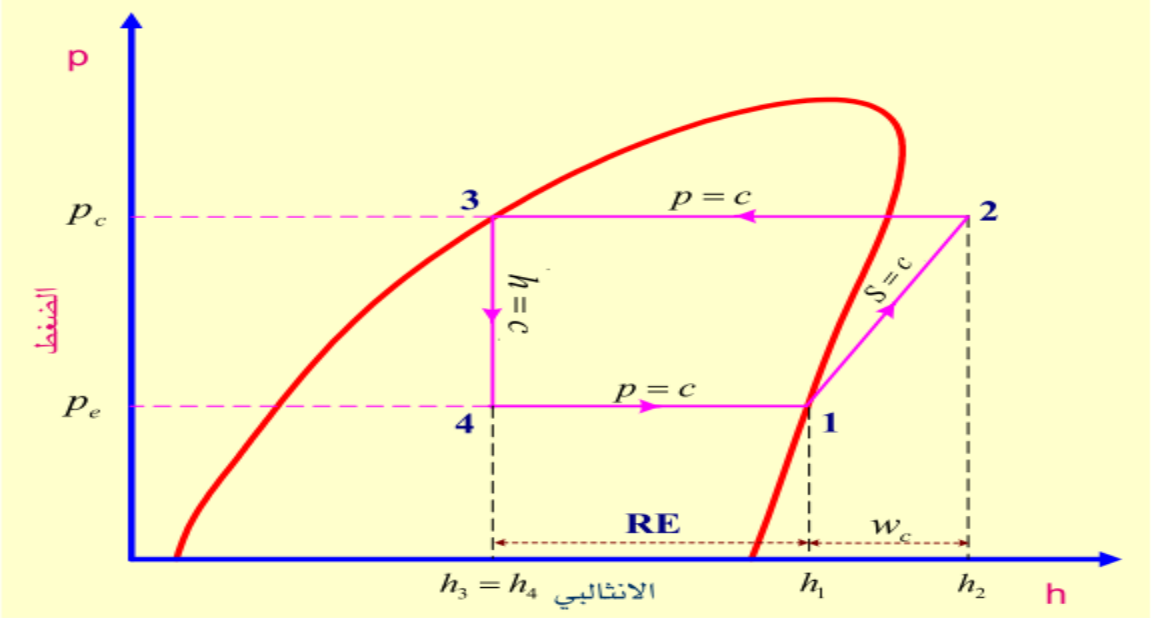
العملية الأخيرة 1 → 4 لعملية الانضغاط بالبخار تكون في المبخر، حيث تكون درجة حرارة المبخر أقل من درجة حرارة الحيز المحيط كي يتسنى انتقال الحرارة من الحيز المحيط إلى المبخر. ويدخل وسيط التبريد المبخر كوسيط تبريد مكون من بخار وسائل (نسبة كمية السائل غالباً ما تكون أقل من البخار) وتكون عملية اكتساب الحرارة هذه عملية كامنة حتى يكون وسيط التبريد بخاراً مشبعاً (النقطة 1). كما في المكثف تكون هذه العملية عند ثبوت الضغط، تكون كمية الحرارة المكتسبة بالنسبة للمبخر (يمكن تعريفها لاحقاً بحمل المبخر) هي:

$$Q_e = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

الحرارة المفقودة خلال المبخر $Q_e = \{kW\}$

الانثالبي عند النقطة (1) $h_1 = \{kJ/kg\}$

الانثالبي عند النقطة (٤) $h_4 = \{kJ/kg\}$



شكل (١ — ١٤): مخطط الحالة (state diagram) لدورة التبريد البسيطة

ملخص العمليات الثيرموديناميكية :

العملية Process	المكون Component	العلاقة الأساسية Key Relation	استنتاج القانون الأول 1st Law Analysis
1-2	الضاغط compressor	$S_2 = S_1$	$W_c = \dot{m}(h_2 - h_1)$
2-3	المكثف Condenser	$p_3 = p_2$	$Q_c = \dot{m}(h_2 - h_3)$
3-4	صمام التمدد expansion valve	$h_4 = h_3$	$h_4 = h_3$
4-1	المبخر evaporator	$p_4 = p_1$	$Q_e = \dot{m}(h_1 - h_4)$

جدول (١ – ٣): ملخص عمليات دورة التبريد البسيطة

والجدول الت إلى يلخص حالات النقاط الأربع في الدائرة المثالية

النقطة	x	الطور
1	1	بخار مشبع
2	_	بخار محمص
3	0	سائل مشبع
4	$0 \le x \le 1$	خليط من البخار والسائل

جدول (١ – ٤): حالة كل من نقاط دورة التبريد البسيطة

أداء دورة التبريد الانضغاطية البسيطة Performance of VCC

أ - التأثير التبريدي Refrigeration effect (RE)

تعرف كمية الحرارة التي يمتصها كل كيلوجرام واحد من وسيط التبريد في المبخر من الوسط المحيط به من بعد دخوله المبخر حتى خروجه بخاراً مشبعاً.وهي تمثل فرق الإنثالبي بين النقطتين (4)و(1) في حالة دورة التبريد البسيطة كما في حمل المبخر وهي:

$$RE = h_2 - h_1$$

ب ـ شغل الانضغاط Input Work (W_c)

كما سبق لاحقا فإن وظيفة الضاغط هي العمل على سريان وسيط التبريد في دورة التبريد إضافة إلى رفع ضغط دورة التبريد من ضغط السحب إلى ضغط الطرد. ويحسب شغل الانضغاط بإيجاد فرق الإنثالبي بين مخرج ومدخل وسيط التبريد إلى الضاغط مضروباً في معدل سريان وسيط التبريد في الدورة.

$$W_c = \dot{m}\Delta h$$

وللدورة الموضحة سابقاً يكون شغل الإنضغاط(W_c) هو:

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

ج ـ حمل المبخر (Qe) Evaporator load

يعبر حمل المبخر عن معدل الطاقة التي سوف يزيله المبخر من الحيز المبرد أو المنتج المبرد(kW) وهذا يعتمد على حمل التبريد (cooling load) للحيز(أو المنتج) المبرد.

وقبل عصر التبريد الميكانيكي كان يستخدم الثلج باتساع كوسيط تبريد وعليه كان من الطبيعي إن تقارن سعة التبريد للثلاجات الميكانيكية بمكافئ انصهار الثلج. فحين ينصهر طن واحد من الثلج؛ فإنه سوف يمتص (وحدة حرارة بريطانية) 288000 BTU، فإذا تم انصهار هذا الثلج في يوم واحد (24 hours) فإن معدل امتصاص الحرارة يكون 12000 BTU/h وهذا ما يعبر عنه بطن التبريد:

(Ton of Refrigeration, T.R.)

وحمل المبخر(Q_e) في الدائرة المثالية يمكن التعبير عنه:

$$Q_e = \dot{m}(h_2 - h_4)$$

د ـ معامل الأداء لدورة التبريد البسيطة (COP)

معامل الأداء لدورة التبريد(Coefficient of Performance, COP) هو تعبير يقصد به كفاءة الدورة ويكتب كنسبة من الطاقة التي يمتصها المبخر منسوبا إلى الطاقة اللازمة للضاغط:

$$COP = \frac{Q_e}{Wc} = \frac{RE}{w_c} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

هـ ـ معدل سريان وسيط التبريد ($\dot{m}$)

يمكن تعيين معدل السريان ($\dot{m}$) لمادة وسيط التبريد في دورة التبريد من المعادلة التالية:

$$\dot{m} = \frac{Q_e}{RE}$$

حيث إن:

حمل المبخر $Q_e =$

التأثير التبريدي $RE =$

حجم الإزاحة للضاغط:

من المعادلة السابقة ($\dot{m} = \frac{Q_e}{RE}$)، يمكن تحديد معدل السريان الحجمي لوسيط التبريد ($\dot{V}$) الذي يسحبه الضاغط بعد معرفة الحجم النوعي لوسيط التبريد (v_1) عند مدخل الضاغط حيث:

$$\dot{V} = \dot{m}v_1$$

إذا كان ضاغط دورة التبريد من النوع الترددي (reciprocating) وله كفاءة حجمية η_v (وهي غالبا ما تكون بين 65% و 85%) عليه يكون حجم الإزاحة ($\dot{V}_s$) لوسيط التبريد(في مدة زمنية واحدة) يعادل:

$$\dot{V}_s = \frac{\dot{V}}{\eta_v} = \frac{\dot{m}v_1}{\eta_v}$$

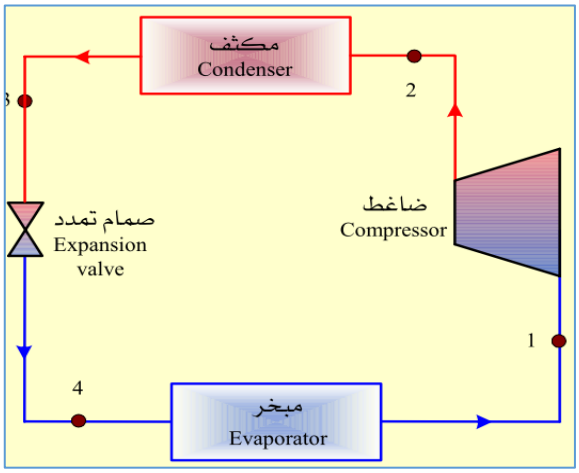
مثال ١

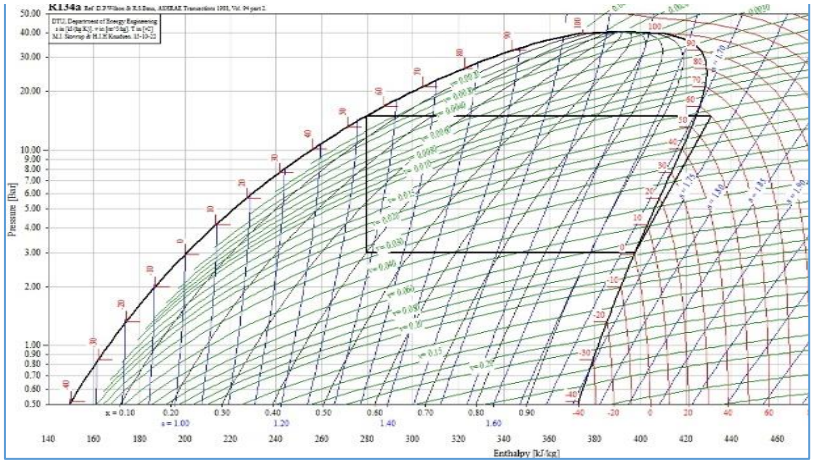
وحدة التبريد انضغاطية تعمل بمائع تبريد R-134a ضغط التكثيف فيها (15)bar،بينما ضغط التبخير bar (3) فإذا علمت ان مائع التبريد يدخل الى الضاغط في حالة بخار مشبع **فاوجد:**

١- رسم دورة على مخطط (p-h)
٢-التاثير التبريدي
٣-شغل الضاغط
٤-الحرارة المطروحة في المكثف
٥- معامل اداء الدورة C.O.P
٦- نسبة كسر الجفاف
٧- درجة حرارة مائع تبريد عند دخول ضاغط
٨- درجة حرارة مائع تبريد عند خروجه من المكثف

الحل//

١- رسم الدورة الميكانيكية مع تمثيلها على المخطط لايجاد (h1,h2,h3,h4)





- **h1= 398 kj|kg** - **h2=431 kj|kg** **h3=h4=280 kj|kg**

2-Qe =h1-h4

Qe= 398-280= 118 kj|kg

3- Wc=h2-h1

Wc = 431-398= 33 kj|kg

4- Qc= h2-h3

Qc = 431-280= 151 kj|kg

5- C.O.P= Qe/Wc

C.O.P = (h1-h4)/(h2-h1)

118/33= 3.57

6-X4= 0.4

7-T1=0.6 °C

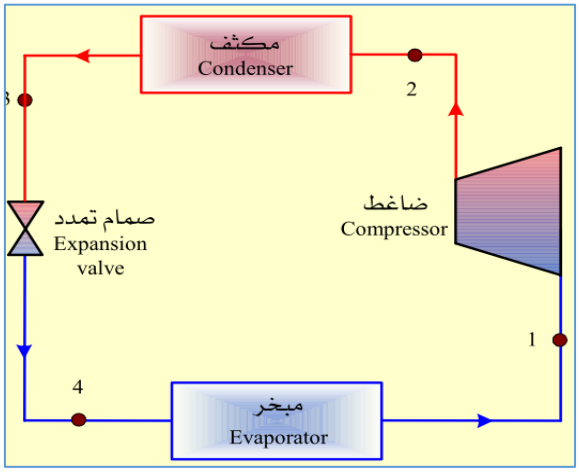
مثال ٢

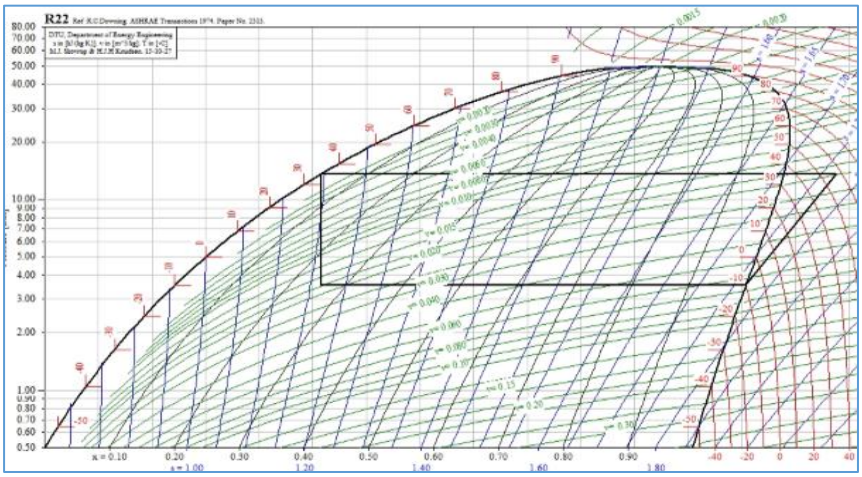
دورة انضغاط البخار النظرية تعطي (45 kw) من التثليج،تستخدم مائع التثليج R-22 عند درجة حرارة تكثيف(35°C)ودرجة حرارة تبخر(-10°C).احسب

١- رسم دورة على مخطط (P-h)
٢- حاصل التثليج بوحدات Kj|kg
٣- كتلة مائع التثليج
٤- قدرة الضاغط KW
٥-الحرارة المطروحة في المكثف KW
٦- نسبة كسر الجفاف
7- C.O.P
٨- معدل جريان الحجمي
٩- درجة حرارة مائع تبريد عند دخول ضاغط
١٠- درجة حرارة مائع تبريد عند خروجه من المكثف

الحل//

١- رسم الدورة الميكانيكية مع تمثيلها على المخطط لايجاد (h1,h2,h3,h4)





- h1=401 kj|kg - h2=435 kj|kg - h3=h4=243 kj|kg
Qe=45 kw

2-Qe= h1-h4 ⟶ 401-243=158 kj|kg

3-Qe=m (h1-h4) ⟶ m=Qe|h1-h4) ⟶ m=158|45=0.284 kg\s

4- Wc =m (h2-h1) ⟶ 0.284(435-401) =9.6 kw

5- Qc =m (h2-h3) ⟶ 0.284(435-243) =54.5 kw

6-X4=0.27

7-C.O.P=Qe|wc ⟶ C.O.P=45|9.6 =4.6

8-ϑ=0.065 m|kg ⟶ V=m x ϑ ⟶ 0.284 x 0.065=0.0184 m|s

9-T1= -10°C

10-T3= 35°C

مثال٣

وحدة التبريد انضغاطية تعمل بمائع تبريد R-134a تنتج (40 kw)من التثليج ضغط التكثيف فيها (10) bar،بينما ضغط التبخير (2) bar فإذا علمت ان مائع التبريد يحمص بمقدار (5°C) قبل دخوله الضاغط.

فاحسب :-

١-رسم دورة على مخطط (p-h)
٢-التاثير التبريدي
٣- معدل التدفق الكتلي لمائع التبريد
٤-شغل الضاغط بوحدات kw
٥-الحرارة المطروحة في المكثف بوحدات kw
٦- معامل اداء الدورة C.O.P
٧- نسبة كسر الجفاف
٨- درجة حرارة مائع تبريد عند دخول ضاغط
٩- درجة حرارة مائع تبريد عند خروجه من المكثف

الحل// ايجاد T_1'

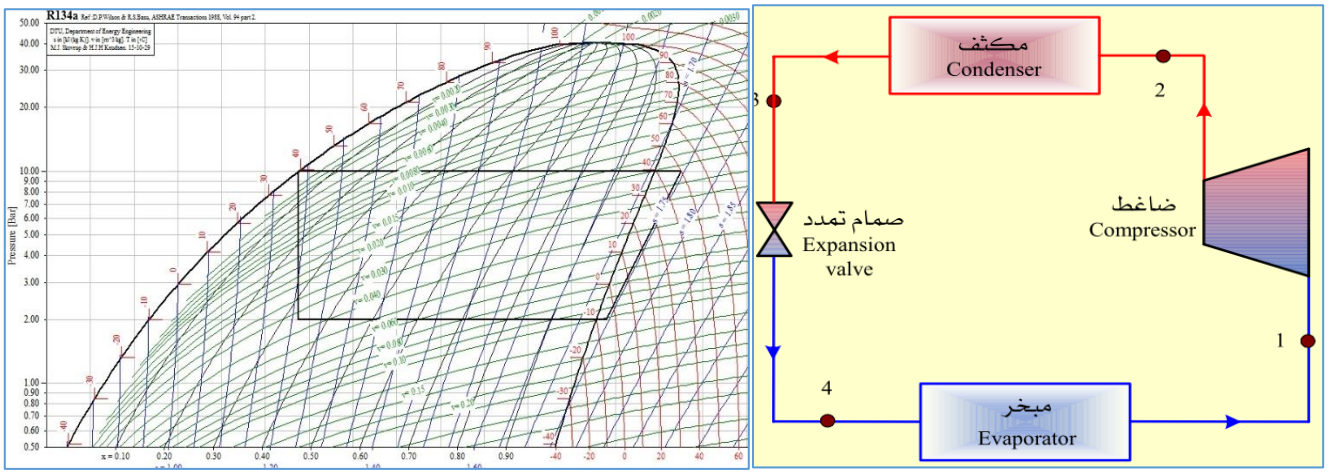
$$T_1' = T_e + T_{SUPER\ HEAT}$$

T_e = -10 °C , $T_{super\ heat}$ = 5 °C

$T_1' = -10 + 5 = -5°C$

Qe= 40 kw

١-رسم الدورة الميكانيكية مع تمثيلها على المخطط لايجاد (h1,h2,h3,h4)



$h_1' = 396$ kj|kg , $h_2' = 430$ kj|kg , h3=h4= 255 kj|kg

2- Qe = h_1' - h4 ⟶ 396 – 255= 141 kj|kg.

3- Qe = m(h_1' - h4) ⟶ 40= m(396 – 255) m=40|141=0.283 kg|s

4-W_{comp}=m(h_2' - h_1') ⟶ 0.283(430 – 396)=9.622 kw

5- Qc=m(h_2' - h_3) ⟶ 0.283(430 – 255)=49.5 kw

6- C.O.P=Qe/W_{comp}. ⟶ C.O.P= 40/9.622= 4.157

7- X4=0.33

8- T1'= -5°C

9- T3= 39°C