الباب الثانى

دورات التبريد الانضغاطية البسيطة

Simple Vapor Compression Refrigeration Cycles

دورة التبريد الانضغاطية البسيطة

دورة التبريد بنظام التبريد الانضغاطى تتكون من أربعة أجزاء رئيسية وهى على التوالى ، مبخر ، ضاغط ، مكثف وجهاز تمدد (ناشر) كما بشكل (٢-١) ، وتعمل هذه الدورة عند ظروف التشبع لوسيط التبريد المشحونة به دائرة التبريد. وهى دورة نظرية يفترض فيها أن بخار وسيط التبريد يخرج من المبخر بخار جاف مشبع ويدخل إلى الضاغط عند درجة حرارة التشبع المقابلة لضغط المبخر. ووسيط التبريد المتكاثف يترك المكثف عند حالة التشبع وهو سائل مشبع عند درجة حرارة التشبع المقابلة لضغط المكثف. ثم يقوم الضاغط بسحب بخار وسيط التبريد وهو بخار جاف مشبع من المبخر وضغطة من ضغط المبخر إلى ضغط المكثف ويتم فى هذه الحالة إضافة شغل خارجى على بخار وسيط التبريد بثبوت الانتروبى. يخرج بخار وسيط التبريد من الضاغط وهو بخار محمص عند درجة حرارة عالية ويدخل إلى المكثف ويفقد حرارة التحميص ويتحول إلى بخار مشبع بثبوت الضغط ثم يفقد الحرارة الكامنة ليتحول إلى سائل مشبع بثبوت الضغط أيضا"، وتسمى الأنابيب الواصلة من الضاغط إلى المكثف بخط الطرد والأنابيب الواصلة من المبخر إلى الضاغط بخط السحب. ثم يخرج وسيط التبريد من المكثف سائل مشبع ويدخل إلى وسيلة التمدد (الناشر) وهى أنبوبة شعرية تستخدم لوحدات التبريد الصغيرة وصمام تمدد لوحدات التبريد الكبيرة. تعمل وسيلة التمدد على خفض ضغط ودرجة حرارة وسيط التبريد (إجراء خنق) بثبوت الانثالبيا ويخرج وسيط التبريد من وسيلة التمدد على شكل خليط من السائل والبخار (على هيئة رذاذ) بخار رطب. ويدخل هذا الرذاذ (البخار

الرطب) المبخر ويمتص كمية حرارة من المبخر (الحرارة الكامنة للتبخير) ويتحول إلى بخـــار جاف مشبع عند ثبوت الضغط ودرجة الحرارة ويخرج إلى خط السحب متجها" إلـــى الضـــاغط خلال خط السحب.

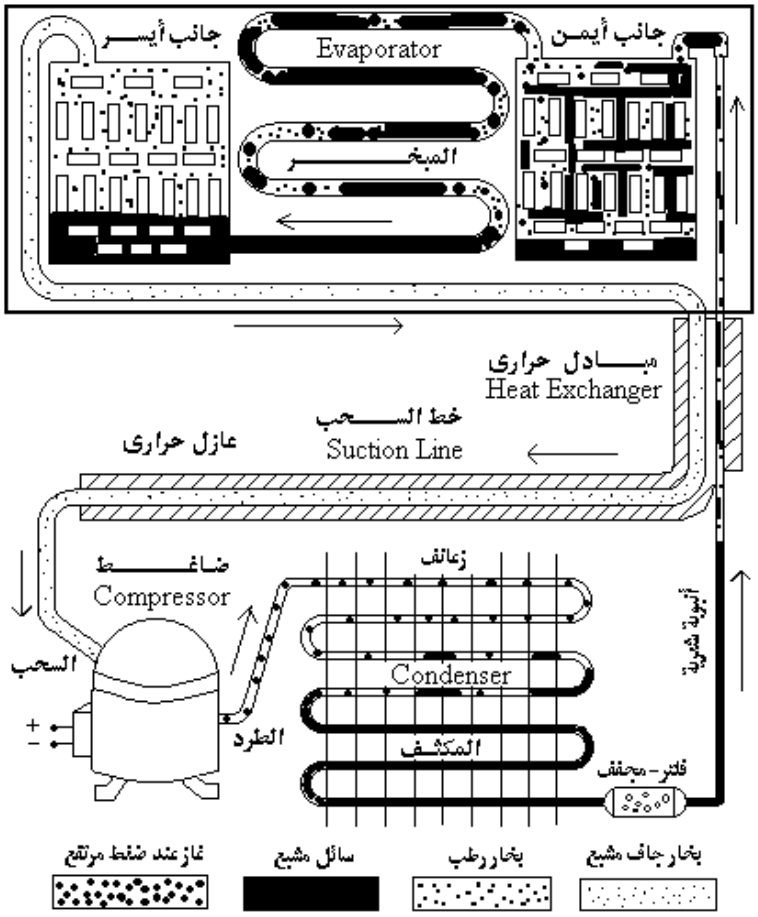


Fig. 2-1 Simple vapor compression refrigeration machine.

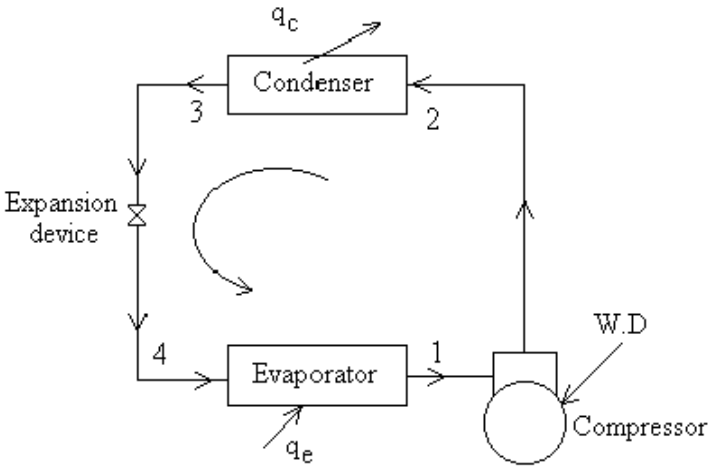


Fig. 2-2-a Flow diagram of simple vapor compression refrigeration cycle.

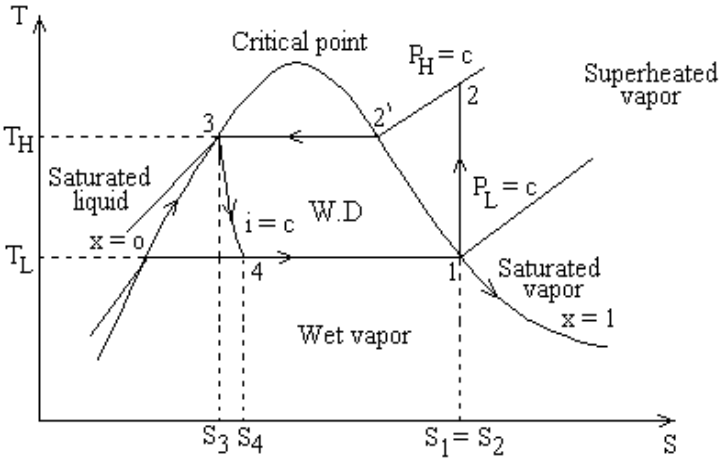


Fig. 2-2-b T-s diagram for simple vapor compression refrigeration cycle.

والعمليات الأساسية السابقة هى الأساس لكل دورة تبريد حقيقية" ذات إجراء انضـــغاط ميكانيكى لبخار وسيط التبريد بواسطة ضاغط، وتستخدم دورة التبريد البسيطة كمعيار تقارن به الدورات الفعلية لقياس مدى تحسن معامل الأداء عند ظروف التشغيل المختلفة ، ولـــذلك ســـوف نقوم بدراسة دورة التبريد الانضغاطية البســـيطة بالتفصـــيل ، وشـــكل (٢-٢) يبـــين المخطـــط التوضيحى لدورة التبريد الانضغاطية البسيطة وتمثيلها على منحنى الضغط – الانثالبيا النوعية (P - i) ، ومنحنى درجة الحرارة الانتروبى النوعية (T - s) لكى يسهل دراستها وعمل تحليل ثرموديناميكى واتزان حرارى عليها كما يلى.

تحليل ثرموديناميكى واتزان حرارى لدورة التبريد الانضغاطية البسيطة

تتكون الدورة البسيطة كما فى الشكل التوضيحى a - 2 - 2 وإجراءات الـــدورة علـــى منحنى (T-s)، (P-i) كما بشكل 2-2-b ، 2-2-c من العمليات الأربعة التالية:

انضغاط بواسطة ضاغط ميكانيكى مع ثبوت الانتروبى فى الإجراء 2-1، إجراء تكثيف وطـــرد حرارة بثبوت الضغط داخل مكثف فى الإجراء 3-2، ويتم طرد الحرارة من المكثف إلى وســـط خارجى هو ماء أو هواء ، ثم إجراء تمدد من ضغط المكثف إلى ضغط المبخر بثبوت الانثالبيـــا فى الإجراء 4-3 بواسطة ناشر (إجراء خنق داخل أنبوبة شعرية أو صمام تمدد) ، إجراء تبخير وامتصاص حرارة بثبوت الضغط فى الإجراء 1-- 4 داخل مبخر وتحويل وسيط التبريد من بخار رطب إلى بخار جاف مشبع وامتصاص الحرارة من فراغ المبخر ،كما هو فى شـــكل (٢ -٢). والتحليل الثرموديناميكى والاتزان الحرارى للإجراءات السابقة يخضع للمعادلة العامـــة للطاقـــة للسريان المستقر لأن:

١ – كتلة وسيط التبريد التى تمر فى وحدة الزمن ثابتة لإجراءات الدورة.

٢– حالة وسيط التبريد ثابتة ومستقرة مع الزمن فى أجزاء الدورة المختلفة.

٣ – انتقال الحرارة والشغل من أو إلى الإجراء ثابت مع الزمن فى أجزاء الدورة.

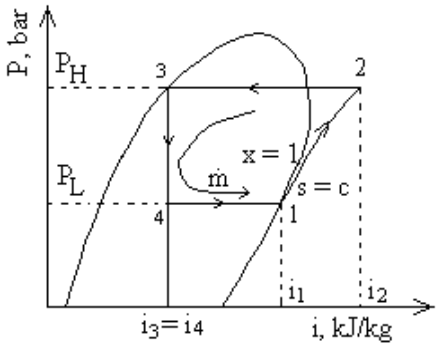


Fig. 2-2-c P-i diagram for simple vapor compression refrigeration cycle.

ولتوضيح معادلة الطاقة للسريان المستقر نجد أنه فى معظم التطبيقات الهندسية أن المائع أو الوسط العامل فى الدورة يدخل إلى النظام ويخرج منه بمعدل ثابت مع الزمن ، فعلى سبيل المثال فى السيارة يدخل خليط الهواء مع الوقود ويحترق ثم نحصل على طاقة حركية من السيارة ثم تخرج غازات العادم بعد هذه العملية وتظل السيارة تعمل فى استقرار. فإذا تأملنا فى هذه العملية وتصورنا أن محرك السيارة هو عبارة عن نظام مفتوح كما بالشكل التوضيحى (٢-٣)، وأن الوسط العامل يدخل من المدخل ١ بضغط وحجم نوعى ودرجة حرارة ثم يضاف إليه طاقة حرارية لحدوث احتراق أو تفاعل كيميائى لإنتاج شغل على شكل طاقة حركية ثم يخرج الوسط العامل بعد ذلك من المخرج ٢ بضغط وحجم نوعى ودرجة حرارة تختلف عن قيمها عند المدخل. فإذا تم تطبيق قانون بقاء الطاقة حيث أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث ، أى أن مجموع الطاقة الداخلة لأى نظام يجب أن تساوى مجموع الطاقة الخارجة من النظام. فعند المدخل نجد أن حاصل ضرب الضغط فى الحجم النوعى ، p_1v_1 ، للوسط العمل يسمى شغل الانسياب ، وأيضا" الطاقة الداخلية التى تعبر عن درجة حرارة الدخول للوسط العامل ، u_1 ، وطاقة الوضع نتيجة قوة جذب الأرض ونعبر عنها بالارتفاع ، gz_1 ، وطاقة الحركة للمائع عند الدخول والتى نعبر

عنها بنصف مربع السرعة ، $V^2/2$. والطاقات المختلفة للمائع عند المخرج ٢ هى نفس الطاقات عند المدخل ولكن تأخذ الرمز ٢، بجانب الطاقة الحرارية ، q، التى تدخل إلى النظام والشـــغل الخارج منه، w .

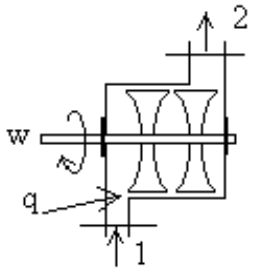


Fig. 2-3 Engineering system for steady flow energy.

The Steady Flow Energy Equation is Given for Unit Mass as Follow,

$$u_1 + p_1v_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 + q_{1-2} = u_2 + p_2v_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + w_{1-2}$$

$$where, \quad i = u + pv, we\ get$$

$$i_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 + q_{1-2} = i_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + w_{1-2}$$

$$q_{1-2} - w_{1-2} = (i_2 - i_1) + \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2}\right) + g(z_2 - z_1) \qquad (2\text{-}1)$$

والطرف الأيسر من المعادلة الأخيرة 1-2 يتكون من حدين، الأول هو كمية الحـــرارة المضافة إلى الإجراء q_{1-2} والثانى هو كمية الشغل الخارج من الإجراء w_{1-2}، والطرف الأيمن يتكون من ثلاثة حدود. الحد الأول هو التغير فى الطاقة الداخلية وشغل الانسياب للإجراء 2-1 (

الانثالبيا) ، الحد الثانى هو التغير فى طاقة الحركة بين المخرج والمدخل، الحد الثالث هو التغير فى طاقة الوضع.

إجراء التبخير وامتصاص الحرارة

الإجراء 1-4 هو إجراء لتبخير وسيط التبريد عند ثبوت درجة الحرارة والضغط أى هو إجراء Isothermal process or Isobaric process . وفى هذا الإجراء يدخل وسيط التبريد إلى المبخر بالحالة 4 وهى خليط من السائل والبخار الجاف المشبع ، والذى يقوم بالتبريد الفعلى هو كمية السائل التى فى الخليط حيث تمتص الحرارة الكامنة وتتبخر إلى بخار جاف مشبع عند الحالة 1. وجدير بالذكر أن الحرارة الكامنة اللازمة لتبخير وسيط التبريد تمتص من حيز أو فراغ المبخر سواء" كانت مأكولات ، مشروبات أو منتجات صناعية.

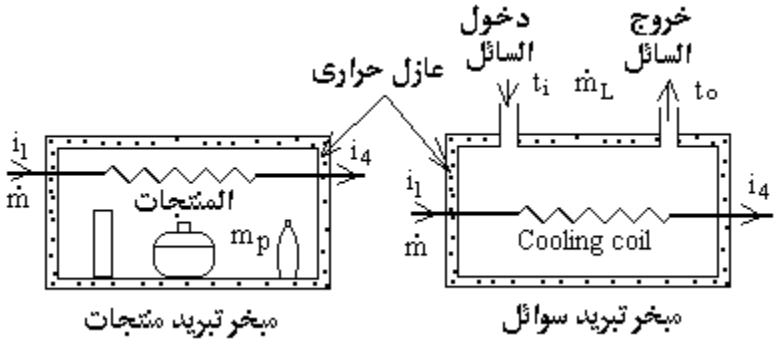


Fig. 2-4 Heat balance of various type of evaporators

والمبخرات المستخدمة فى صناعة التبريد بصفة عامة هى مبادلات حرارية وتتكون من حيز أو صندوق معزول بعازل حرارى (Thermal insulation) لتقليل الفقد الحرارى أو

تسرب الحرارة من الوسط الخارجى الأعلى فى درجة الحرارة إلى داخل المبخر الأقل فى درجة الحرارة، وتنقسم المبخرات إلى نوعين رئيسيين حسب غرض الاستخدام إما مبخرات تستخدم لحفظ أغذية ومنتجات صلبة أو مبخرات تستخدم لتبريد سوائل مثل الماء أو منتجات الألبان أو العصائر هو موضح فى شكل (٢-٤).

مبخرات الأغذية والمنتجات الصلبة

تعتمد نظرية عمل هذه المبخرات على انتقال الحرارة من الأغذية داخل المبخر إلى وسيط التبريد داخل ملف التبريد الخاص بالمبخر. وانتقال الحرارة داخل حيز المبخر يكون إما بالحمل الحر نتيجة فروق الكثافة ودرجة الحرارة للهواء داخل حيز المبخر أو بالحمل الجبرى عن طريق مروحة كهربية تستخدم لتقليب الهواء داخل حيز المبخر. وكمية الحرارة التى يكتسبها وسيط التبريد نتيجة مروره فى المبخر وتغير الانثالبيا النوعية له من حالة البخار الرطب عند الحالة 4 إلى بخار جاف مشبع عند الحالة 1 بمعدل ثابت لمرور وسيط التبريد $\dot{m}$ وتسمى Q_e وهى سعة المبخر وتحسب من تطبيق المعادلة العامة للطاقة للسريان المستقر (المعادلة 1-2)، وتهمل طاقة الوضع وطاقة الحركة فى المعادلة 1-2 نظرا" لأنه لا يوجد تغير فى الارتفاع بين مدخل المبخر ومخرجه وكذلك سرعة الدخول وسرعة الخروج. وانتقال الحرارة فى المبخر يتم بثبوت الضغط ولا يوجد شغل مبذول فى الإجراء كما يلى,

$$Q_e = \dot{m}(i_1 - i_4) \qquad 2\text{-}2$$

أما كمية الحرارة التى تفقدها الأغذية المحفوظة داخل حيز المبخر فى وحدة الزمن هى,

$$Q_p = \frac{m_p}{time}\left[C_{pa}(t_i - t_f) + L.T + C_{pb}(t_f - t_o)\right] \qquad 2\text{-}3$$

حيث أن:

Q_e : سعة المبخر بوحدة kW .

$\dot{m}$: معدل مرور وسيط التبريد فى المبخر بوحدة kg/s .

Q_p : كمية الحرارة التى تفقدها المنتجات داخل حيز المبخر بوحدة kW .

m_p : كتلة المنتجات داخل المبخر بوحدة kg .

$time$: زمن تبريد المنتجات بوحدة s .

C_{pa} : الحرارة النوعية للمنتجات فوق التجمد بوحدة $kJ/(kg.K)$.

C_{pb} : الحرارة النوعية للمنتجات تحت التجمد بوحدة $kJ/(kg.K)$.

$L.T$: الحرارة الكامنة للتجميد للمنتجات بوحدة kJ/kg.

t_i : درجة حرارة المنتجات عند بدء إجراء التبريد بوحدة ^oC.

t_o : درجة حرارة المنتجات عند نهاية إجراء التبريد بوحدة ^oC .

t_f : درجة حرارة التجميد للمنتجات بوحدة ^oC .

المعادلة 3-2 تتكون من ثلاثة حدود داخل القوس, الحد الأيسر يمثل الحرارة المحسوسة التى يجب أن تفقدها المنتجات قبل أن تتجمد ، الحد الأوسط يمثل الحرارة الكامنة لتجميد المنتجات. الحد الأيمن يمثل الحرارة المحسوسة التى تفقدها المنتجات حتى تصل إلى درجة حرارة الحفظ. ومن الملاحظ أن هذه المعادلة تطبق حسب نوع المنتج المراد حفظه. فمثلا" الخضراوات والفواكه والبيض تحفظ طازجة لا تمر بحالة التجميد ولذلك يستخدم الحد الأيسر فقط من المعادلة 3-2 (الحرارة المحسوسة فوق التجميد)، أما اللحوم والدواجن تحفظ مجمدة ولذلك تطبق المعادلة 3-2 بحدودها الثلاثة. وبصفة عامة عند تطبيق المعادلة 3-2 يراعى ظروف كل منتج وأسلوب وطريقة الحفظ الخاص به. فإذا فرضنا أن كل الحرارة التى يفقدها المنتج المحفوظ تنتقل مباشرة" إلى وسيط التبريد فإنه يمكن حساب معدل سريان وسيط التبريد كما يلى.

$$Q_e = Q_p$$

$$\dot{m} = \frac{Q_p}{i_1 - i_4} \qquad 2\text{-}4$$

ومن الممكن حساب سعة التبريد(*Refrigeration Capacity*) للمبخر بوحدة الطـــن تبريد ($T.R$) إذا علم كمية الحرارة المنتقلة إلى وسيط التبريد أو الحرارة المفقودة من المنتجات المراد حفظها.

$$R.C = \frac{\dot{m}(i_1 - i_4) + Q_{loss}}{3.5}$$

$$= \frac{Q_p + Q_{loss}}{3.5} \qquad 2\text{-}5$$

فى المعادلة السابقة 5-2 يجب إضافة المفاقيد الحرارية Q_{loss} إن وجـــدت إلـــى كميـــة حرارة المنتجات حتى يمكننا حساب معدل سريان وسيط التبريد فى المبخر بدقة.

مبخرات لتبريد السوائل ومنتجات الألبان

تعتمد نظرية عمل هذه المبخرات على انتقال الحرارة من السوائل المراد تبريدها إلـــى وسيط التبريد داخل ملف التبريد الخاص بالمبخر نتيجة تلامس السائل لسطح أنابيب ملف التبريد. فتنتقل الحرارة عبر معدن أنابيب ملف التبريد بالتوصيل إلى وسيط التبريد. ولتحسين كفاءة انتقال الحرارة بين السائل المراد تبريده ووسيط التبريد يجب أن يكون هناك موجهات داخـــل المبخـــر لتوجيه السائل حتى يكون السريان دوامى ، وأيضا" توجد زعانف مثبتة على أنابيب ملف التبريد أو سطح المبخر لزيادة كفاءة المبخر وكذلك لزيادة مساحة انتقال الحرارة بين السائل المطلـــوب

تبريده ووسيط التبريد داخل المبخر فيزيد معدل انتقال الحرارة. وكمية الحرارة المفقودة من السائل المطلوب تبريده نتيجة مروره فى المبخر كما يلى.

$$Q_L = \dot{m}_L C_{pl}\left(t_i - t_o\right) \qquad 2\text{-}6$$

حيث أن ،

Q_L : كمية الحرارة المفقودة من السائل بوحدة kW .

$\dot{m}_L$: معدل مرور السائل المطلوب تبريده فى المبخر بوحدة kg/s.

C_{pl} : الحرارة النوعية للسائل المطلوب تبريده بوحدة $kJ/(kg.K)$.

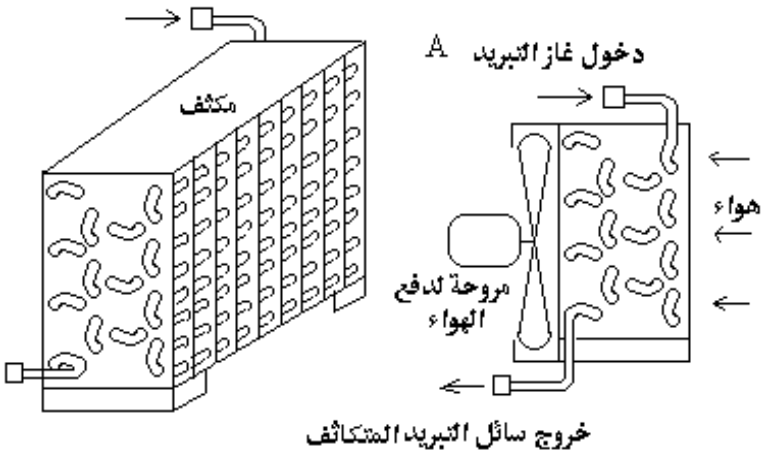
t_i : درجة حرارة السائل عند دخول المبخر بوحدة ^oC .

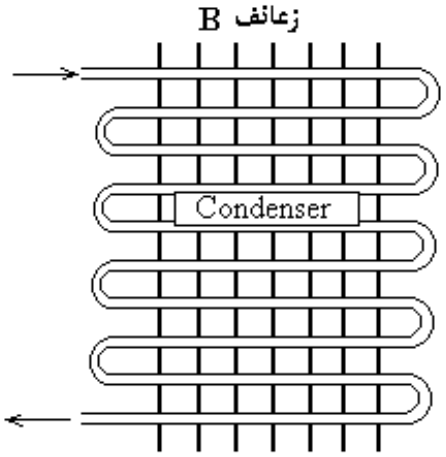
t_o : درجة حرارة السائل عند الخروج من المبخر بوحدة ^oC .

إجراء التكثيف وطرد الحرارة

المكثفات المستخدمة فى تطبيقات التبريد هى مبادلات حرارية يستخدم الهواء أو الماء لتبريدها. يدخل البخار المحمص القادم من الضاغط عند درجة حرارة مرتفعة إلى المكثف فيفقد حرارة التحميص وتقل درجة حرارته إلى درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط التكثيف ويبدأ وسيط التبريد فى التكاثف ويفقد الحرارة الكامنة ويتحول إلى سائل مشبع عند مخرج المكثف. وسواء" أكان المكثف تبريد هواء أو ماء فإن الحرارة المفقودة من وسيط التبريد تساوى الحرارة المكتسبة لماء أو هواء المكثف. مكثفات تبريد الهواء يوجد منها نوعين، النوع الأول فهو مكثف تبريد هواء بالحمل الجبرى وفيه يتم دفع تيار من الهواء باستخدام مروحة يتم تشغيلها بمحرك كهربى وهذا الهواء هو الذى يحمل الحرارة المطرودة من المكثف ، النوع **A** ، أما النوع الثانى وهو مكثف تبريد هواء بالحمل الحر وفيها يدخل وسيط التبريد من أعلى المكثف ويفقد وسيط التبريد حرارته ويخرج سائل مشبع من أسفل المكثف، والحرارة المطرودة تنتقل إلى الهواء المحيط بالمكثف من خلال أنابيب المكثف والزعانف المثبتة عليها لزيادة سطح انتقال الحرارة

فيسخن هذا الهواء وتقل كثافته ويصعد إلى أعلى ويحل محله طبقة من الهواء درجة حرارتها أقل ولذلك أطلق على هذا الأسلوب من انتقال الحرارة بالحمل الحر ، النوع **B** ، أما مكثفات تبريد الماء فيتم دخول البخار المحمص لوسيط التبريد من أعلى فيتكاثف على الأنابيب التي بداخلها الماء ويخرج من أسفل المكثف ، النوع **C** ، كما هو موضح بشكل (٢-٥).





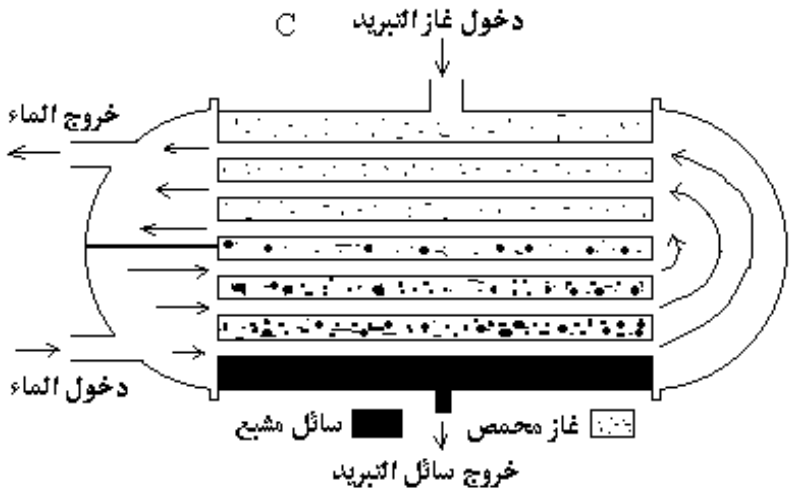


Fig. 2-5, A, B, C Various type of condensers for refrigeration cycles.

الاتزان الحرارى للمكثفات

فى كل أنواع المكثفات تبريد هواء أو تبريد ماء يدخل وسيط التبريد إلى المكثف بخـــار محمص ذو درجة حرارة مرتفعة وانثالبيا نوعية عند الحالة 2 ويخرج من المكثف سائل مشـــبع بانثالبيا نوعية عند الحالة 3 ومعدل مرور لوسيط التبريد هو $\dot{m}$ ، فإن كمية الحرارة المطرودة من المكثف عند ثبوت الضغط Q_c وهى سعة المكثف بوحدة kW وتحسب من تطبيق المعادلـــة العامة للطاقة للسريان المستقر (المعادلة 1-2). فتهمل طاقة الوضع وطاقة الحركة فى المعادلة 1-2 نظرا" لأنه لا يوجد تغير فى الارتفاع بين مدخل المكثف ومخرجه وكذلك ســـرعة الـــدخول وسرعة الخروج. انتقال الحرارة فى المكثف يتم بثبوت الضغط ولا يوجد شـــغل مبـــذول فـــى الإجراء كما يلى:

$$Q_c = \dot{m}(i_2 - i_3) \qquad 2\text{-}7$$

وإذا اعتبرنا أن كمية الحرارة المطرودة من وسيط التبريد تنتقل بكاملها إلى مائع تبريد المكثف هواء أو ماء (Coolant) . فإذا كان المكثف تبريد هواء بالحمل الحر كما هو في الثلاجات المنزلية فيتم استخدام معادلات انتقال الحرارة بالحمل الحر بواسطة رقم جراشوف (يجب الرجوع إلى كتب انتقال الحرارة وطرق حساب كمية الحرارة بالحمل الحر). أما إذا كان المكثف تبريد ماء أو هواء بالحمل الجبرى فإن كمية الحرارة المنتقلة إلى مائع تبريد المكثف تحسب كالآتى:

$$Q_f = \dot{m}_f C_{p_f} (t_i - t_o) \qquad 2\text{-}8$$

حيث ،

Q_f : كمية الحرارة المنتقلة إلى مائع تبريد المكثف بوحدة kW .

$\dot{m}_f$: معدل مرور مائع تبريد المكثف هواء أو ماء بوحدة kg/s .

C_{pf} : الحرارة النوعية لمائع تبريد المكثف بوحدة $kJ/(kg.K)$.

t_i, t_o : درجة حرارة دخول وخروج مائع تبريد للمكثف بوحدة ^oC .

ويجب لفت الانتباه هنا إلى أن درجة حرارة دخول مائع التبريد (هواء أو ماء) المستخدم لتبريد المكثف يجب أن تكون أقل من درجة حرارة التشبع لوسيط التبريد عند ضغط التكثيف بفارق من $5 \sim 10\ ^oC$ حتى يتم تكثيف وسيط التبريد بكفاءة" عالية، وهذه القيمة $\Delta t = 5 \sim 10\ ^oC$ تسمى فروق انتقال الحرارة.

إجراء التمدد

هو إجراء يتم بثبوت الانثالبيا عندما ينخفض ضغط سائل التبريد ويتمدد من الضغط المرتفع (ضغط المكثف) إلى الضغط المنخفض (ضغط المبخر). هذا التمدد يتم خلال أنبوبة

شعرية (Capillary tube) أو من خلال فوهة ضيقة (Expansion valve) وتنخفض درجة حرارة وسيط التبريد من درجة حرارة المكثف إلى درجة حرارة المبخر بواسطة ظاهرة الوميض (Flashing) وهى التبخير السريع لجزء صغير من السائل إلى بخار. الإجراء 4-3 هو تمدد بالخنق (Throttling) والذى لا تتغير فيه الانثالبيا النوعية لمائع التبريد عند بداية ونهاية الإجراء ويحدث بدون فقد حرارة خلال الأنابيب والصمامات وبدون أداء شغل. وبتطبيق المعادلة العامة للطاقة للسريان المستقر (المعادلة 1-2) مع إهمال طاقة الوضع وطاقة الحركة فى المعادلة 1-2 نظرا" لأنه لا يوجد تغير فى الارتفاع بين مدخل صمام التمدد ومخرجه وكذلك سرعة الدخول وسرعة الخروج. ولا يوجد انتقال الحرارة ولا يوجد شغل مبذول فى الإجراء كما يلى:

$$i_3 = i_4$$
$$\Delta s \neq 0 = s_4 - s_3 \qquad 2\text{-}9$$

وتستخدم الأنابيب الشعرية فى الثلاجات المنزلية ووحدات التبريد الصغيرة أما صمام التمدد فيستخدم فى وحدات التبريد الكبيرة كما بشكل (٢-٦). والأنابيب الشعرية هى أنابيب نحاسية بقطر من $d = 2 \sim 5\ mm$ وطول $L = 3 \sim 5\ m$ وضغط وسيط التبريد ينخفض نتيجة مروره فيها نتيجة المفاقيد الهيدروليكية. لأنه من المعروف عند مرور أى سائل فى أنبوب أو على سطح معدنى يحدث احتكاك بين جزيئات السائل والسطح المعدنى الخشن فينخفض الضغط. أما صمامات التمدد فيوجد منها ثلاثة أنواع. صمام التمدد اليدوى (Hand expansion valve) ، صمام التمدد الآلى(Automatic expansion valve) والنوع العالى الكفاءة والجودة وهو صمام التمدد الحرارى(Thermostatic expansion valve) .وتبنى نظرية عمل صمام التمدد اليدوى على مرور سائل وسيط التبريد خلال ضيق تدريجى فى فوهة ضيقة (Nozzle) فيحدث خنق أى هبوط فى الضغط بثبوت الانثالبيا. كما بشكل (٢-٦). ويمكن التحكم فى مستويات

الضغط المرتفع والمنخفض وكذلك معدل مرور وسيط التبريد بواسطة إبرة معدنية يمكــن بهــا زيادة أو نقصان مساحة الفوهة الضيقة يدويا".

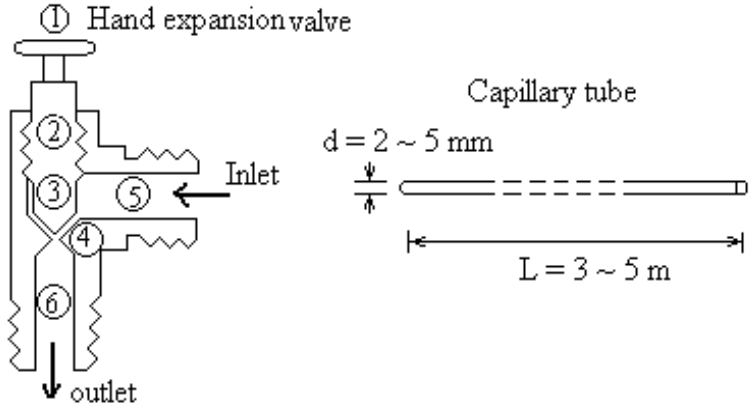


Fig. 2-6 Hand expansion valve and capillary tube.

وفى إجراء التمدد بثبوت الانثالبيا يخرج وسيط التبريد بعده خليط من السائل المشــبع والبخار المشبع عند ضغط ودرجة حرارة المبخر. والتغير فى الانتروبى خلال إجراء التمدد ينتج من انتقال الطاقة الحرارية بداخل وسيط التبريد نفسه بسبب الاحتكاك الداخلى بين جزيئات وسيط التبريد والأسطح المعدنية. وانتقال الطاقة الذى يحدث كلية" بداخل وسيط التبريد لا يــؤثر علــى الانثالبيا بل تتغير الانتروبى فقط.

أجراء الانضغاط

يخرج وسيط التبريد من المبخر بحالة بخار جاف مشبع ويدخل إلى الضاغط بهذه الحالة أى لا يحدث انتقال حرارة أو انخفاض فى الضغط خلال أنابيب السحب الواصلة بــين المبخــر والضاغط، وإجراء الانضغاط 2-1 يتم بثبوت الانتروبــى النوعيــة (Isentropic process).

والشغل المبذول يعادل التغير فى الانثالبيا كما هو مستنتج من معادلة الطاقة للسريان المستقر. فى المعادلة 1-2 تهمل طاقة الوضع وطاقة الحركة نظرا" لأنه لا يوجد تغير فى الارتفاع بين مدخل الضاغط ومخرجه وكذلك سرعة الدخول وسرعة الخروج يمكن إهمالها نظرا" لصغر قيمتها مقارنة بالتغير فى الانثالبيا، ولا يتم انتقال حرارة فى إجراء الانضغاط لأنه يتم بثبوت الانتروبى والشغل المبذول فى الإجراء يحسب كما يلى:

$$W.D = \dot{m}(i_2 - i_1) \qquad 2\text{-}10$$

ويخرج وسيط التبريد من الضاغط بخار محمص درجة حرارته أعلى بكثير من درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط المكثف. وإجراء الانضغاط فى الضاغط يتم ببذل شغل على وسيط التبريد ورفع ضغطه من ضغط المبخر إلى ضغط المكثف وهذا الإجراء أديباتيكى لا احتكاكى (Adiabatic and frictionless) مما يعنى أنه لا تنتقل الحرارة من الإجراء أو إليه. والشغل المبذول على وسيط التبريد يرفع الانثالبيا من بداية الإجراء بمقدار يساوى الطاقة الحرارية المكافئة للشغل الميكانيكى المبذول على وسيط التبريد.

وأنواع الضواغط المستخدمة فى التطبيقات المختلفة لأغراض التبريد هى، ضواغط ترددية (Reciprocating compressor)، ضواغط طارده مركزيه (Centrifugal compressor) وضواغط دوارة (Rotary compressor). ويقتصر استخدام الضواغط الدوارة على التطبيقات التى تحتاج قدرات صغيرة مثل ثلاجات التبريد والتجميد المستخدمة فى المنازل ، وفى بعض الاستعمالات التجارية الصغيرة. أما الضواغط الطاردة المركزية فتستخدم فى التطبيقات ذات الأحمال وسعة التبريد الصغيرة والكبيرة. وفى دراستنا هذه سوف نقوم فقط بشرح الضاغط الترددى وحساباته فى دورة التبريد لانتشار استخدامه على مدى واسع من القدرات الكهربية المطلوبة.

معامل الأداء والكفاءة النسبية لدورة التبريد البسيطة

معامل الأداء (Coefficient of performance)هو المقياس الذى به نستطيع تقيـيم وحدات التبريد وكذلك المقارنة بين وحدات التبريد وأنظمتها المختلفة ، وهو النسبة بين المسـتفاد من وحدة التبريد إلى المبذول من شغل خارجى على الوحدة من الطاقة الكهربية.

$$C.O.P_R = \frac{Unit \quad refrigeration \quad capacity}{Net \quad power \quad input}$$

$$C.O.P_R = \frac{Q_e}{W.D} \qquad 2\text{-}11$$

وحيث أنه فى دورة التبريد البسيطة لا توجد أى مفاقيد حرارية فإن معامـل الأداء يعبـر عنـه بالآتى:

$$C.O.P_R = \frac{\dot{m}(i_1 - i_4)}{\dot{m}(i_2 - i_1)} = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1} \qquad 2\text{-}12$$

وهذه المعادلة 12-2 صحيحة فقط إذا كان معدل مرور وسيط التبريد فى المبخر هو نفسه الـذى يمر فى الضاغط. أما إذا كان معدل مرور وسيط التبريد مختلف فيجب حساب معامل الأداء عن طريق سعة التبريد للمبخر وكذلك القدرة المستهلكة فى الضاغط كما يلى:

$$C.O.P_R = \frac{R.C}{power} \qquad 2\text{-}13$$

وسعة المبخر(R.C)فى المعادلة 13-2 هى كل الأحمال الحرارية على المبخر بما فيها المفاقيد الحرارية ومعاملات الأمان إن وجدت ، والقدرة المستهلكة(Power) فى الضاغط تساوى الشغل (W.D) المحسوب فى الدورة عن طريق خرائط التبريد وفى هذه الحالة تسمى القدرة النظرية (Indicate power).

ومن المعروف أن جميع أنواع الضواغط الشائعة الاستخدام فى أنظمة التبريد المختلفة تدار بواسطة محرك كهربى. ولذلك يجب أن تكون القدرة المستخدمة فى حساب معامل الأداء لدورة التبريد فى المعادلة 13-2 هى القدرة الداخلة إلى المحرك الكهربى. ومن المسلم به أنه توجد كفاءة كهربية للمحرك الكهربى وكفاءة ميكانيكية للضاغط. فإن القدرة المستخدمة لحساب معامل الأداء تكون هى القدرة الحقيقية (Brake power) وتحسب كما يلى:

$$Power = \frac{W.D}{\eta_{total}} \qquad 2\text{-}14$$

where,

$$\eta_{total} = \eta_{motor} \cdot \eta_{T} \cdot \eta_{m} \qquad 2\text{-}15$$

η_{total} : الكفاءة الكلية لوحدة الضاغط.

η_{motor} : كفاءة المحرك الكهربى.

η_{T} : كفاءة التوصيل بين المحرك الكهربى والضاغط إذا كانت سيور أو وصلة صلبة أو جنازير.

η_{m} : الكفاءة الميكانيكية للضاغط.

والكفاءة النسبية (Relative efficiency, η_R) لدورة التبريد هى النسبة بين معامـــل الأداء لدورة التبريد إلى معامل الأداء لدورة كارنوت التى تعمل عند نفس الظروف من الضغوط ودرجات الحرارة بشرط أن درجة الحرارة المستخدمة فى حساب معامل الأداء لدورة كارنوت هى درجات حرارة التشبع عند ضغط المبخر وضغط المكثف.

$$\eta_R = \frac{C.O.P_R}{C.O.P_{car}} \qquad 2\text{-}16$$

مقارنة بين دورة كارنوت النظرية ودورة التبريد الانضغاطية البسيطة

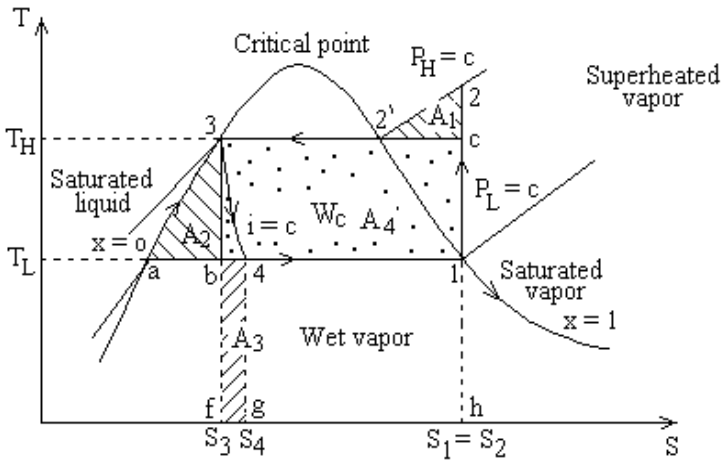


Fig. 2-7 Comparison between carnot cycle and simple compression refrigeration cycle.

عند مقارنة دورة كارنوت النظرية الانعكاسية ودورة التبريد الانضغاطية البسيطة على منحنى T-S لمعرفة الفروق الجوهرية بينهما على شكل (٢-٧)، نجد أن النقطة 1وهى بداية شوط الانضغاط وتقع على خط التشبع للوسط العامل (بخار جاف مشبع) والنقطة 3 وهى بداية التمدد تقع على خط السائل المشبع وهاتين النقطتين تشترك فيهما دورة كارنوت والدورة الانضغاطية البسيطة للتبريد. ولكن الاختلاف يظهر بوضوح فى ثلاث مناطق كما هو موضح بالشكل (٢-٧) كالآتى:

١. المساحة A_1 وهى المساحة المحددة بالرموز c-2-2\ وهى تمثل الشغل الاضافى المطلوب للدورة البسيطة عن دورة كارنوت فى إجراء الانضغاط فى منطقة البخار المحمص.
٢. المساحة A_2 وهى المساحة المحددة بالرموز a-b-3 وهى تمثل الشغل الاضافى المطلوب للدورة البسيطة لأنه لا يوجد شغل مستفاد من إجراء التمدد لأنه إجراء خنق بثبوت الانثالبيا.
٣. المساحة A_3 وهى المساحة المحددة بالرموز b-4-g-f وهى تمثل مفاقيد حرارية تتسبب فى زيادة الانتروبى أثناء إجراء الخنق وتقلل من تأثير التبريد الفعال للمبخر (الحرارة الممتصة) فى الدورة البسيطة.

أولا": دورة كارنوت النظرية الانعكاسية

الشغل المحصور داخل المساحة A_4 وهى المساحة المحددة بالرموز b-1-c-3 تمثل الشغل الصافى المطلوب لدورة كارنوت W_c. أما المساحة المحددة بالرموز b-1-h-f تمثل التبريد الفعال (الحرارة الممتصة) Q_c .

$$W_c = (T_3 - T_1).(S_1 - S_3) = (T_H - T_L). \Delta S$$

$$Q_c = T_1 (S_1 - S_3) = T_L . \Delta S$$

$$C.O.P_{car} = \frac{Q_c}{W_c}$$

ثانيا": الدورة الانضغاطية البسيطة للتبريد

الشغل المحصور داخل المساحة المحددة بالرموز 4-3-2\-2-1-4 تمثل الشغل المطلوب لشوط الانضغاط W، أما المساحة المحددة بالرموز 4-1-h-g-4 تمثل التبريد الفعال (الحـــرارة الممتصة) Q_e.

Work don in compression process.

$$W = i_2 - i_1 = (i_2 - i_a) - (i_1 - i_a)$$

$$W = W_c + A_1 + A_2$$

Cooling effect.

$$Q_e = i_1 - i_4$$

$$Q_e = Q_c - A_3$$

Excess work of compression.

$$A_1 = (i_2 - i_{2\backslash}) - T_3 (s_1 - s_{2\backslash})$$

Excess work of compression caused by throttling.

$$A_2 = i_3 - i_b = (i_3 - i_a) - (i_b - i_a)$$

Loss in refrigerating effect.

$$A_3 = i_4 - i_b = i_3 - i_b = A_2,$$

where: $i_3 = i_4$

$$C.O.P = \frac{Q_e}{W}$$

$$\eta_R = \frac{C.O.P}{C.O.P_{car}} = \frac{Q_e}{W} \times \frac{W_c}{Q_c} = \frac{Q_c - A_3}{W_c + A_1 + A_2} \times \frac{W_c}{Q_c}$$

$$\eta_R = \frac{1 - \frac{A_3}{Q_c}}{1 + \frac{A_1 + A_2}{W_c}}$$

من التحليل السابق نستطيع أن نلخص الفروق الجوهرية بين دورة كارنوت الانعكاسية النظرية ودورة التبريد الانضغاطية البسيطة كالآتى:

١. إجراء التمدد فى دورة كارنوت يتم بثبوت الانتروبى أما فى الـدورة البسـيطة يـتم بثبوت الانثالبيا.

٢. إجراء امتصاص وطرد الحرارة فى دورة كارنوت يتم بثبوت درجة الحـرارة أمـا فى الدورة البسيطة يتم بثبوت الضغط ودرجة الحرارة فى منطقة البخار الرطب، أمـا خارج هذه المنطقة فيتم بثبوت الضغط فقط.

٣. الشغل المطلوب لدورة كارنوت أقل من الشغل المطلوب للدورة البسيطة.

٤. كمية الحرارة الممتصة فى دورة كارنوت أكبر من كمية الحـرارة الممتصـة فـى الدورة البسيطة.

٥. معامل الأداء لدورة كارنوت أكبر من معامل الأداء للدورة البسـيطة نظـرا" لكبـر الحرارة الممتصة وصغر الشغل المطلوب عنه فى الدورة البسيطة ، ويجب الانتباه أيضا" أن معامل الأداء لدورة كارنوت للتبريد هو أكبر من معامل الأداء لآى ثلاجة تعمل عنـد نفس مستويات درجات الحرارة لأجراء التكثيف وإجراء التبخير.

<u>مثال ٢-١</u>

دورة تبريد انضغاطية بسيطة ضغط التكثيف هو $15\ bar$ وضغط التبخيـر هـو $1.5\ bar$ تعمل عند ظروف التشبع لوسيط التبريد أمونيا ، NH_3. ودورة كارنوت النظريـة تعمـل عند نفس الظروف. أحسب الآتى:

١- شغل دورة كارنوت. ٢- الحرارة الممتصة فى دورة كارنوت.

٣- الشغل الزائد المطلوب لشوط الانضغاط وإجراء الخنق.

٤- المفاقيد الحرارية نتيجة إجراء الخنق. ٥- الكفاءة النسبية.

Data: $P_c = 15$ *bar* $P_e = 1.5$ *bar*

$T_c = 315$ *K* $T_e = 249$ *K*

Required: *1- Carnot cycle work compression,* W_c

2- Carnot cycle refrigeration effect, Q_c

3- Excess work of compression and expansion, A_1 , A_2

4- Loss in refrigerating effect, A_3

5- Refrigerating efficiency, η_R

Solution:

From P-i chart of R-12, as shown in Fig. 2-7

$i_1 = 493$ *kJ/kg* $s_1 = s_2 = 10.67$ *kJ/(kg. K)*

$i_2 = 825$ " $s_{2\backslash} = 9.86$ "

$i_3 = i_4 = -590$ " $s_b = s_3 = 6.25$ "

$i_a = -875$ " $s_a = 5.2$ "

Calculation of W_c and Q_c :

$W_c = A_4 = (T_3 - T_1).(s_1 - s_3)$

$= (315 - 249).(10.67 - 6.25) = 291.72$ *kJ/kg*

$Q_c = T_1(s_1 - s_3)$

$= 249\ (10.67 - 6.25) = 1100.58 \quad kJ/kg$

Calculation of dryness fraction of point b:

$s_b = s_a + x(s_1 - s_a)$

$x = (s_b - s_a) / (s_1 - s_a) = (6.25 - 5.2)/(10.67 - 5.2) = 19.196\ \%$

$i_b = i_a + x(i_1 - i_a) = -875+0.19196(493-(-875))$

$i_b = -612.4 \quad kJ/kg$

Calculation of excess work and loss in cooling effect:

$A_1 = (i_2 - i_{2\backslash}) - T_3(s_2 - s_{2\backslash}) = (825 - 575) - 315(10.67 - 9.86)$

$A_1 = 5.15 \quad kJ/kg$

$A_2 = i_3 - i_b = -590 - (-612.4) = 22.4 \quad kJ/kg$

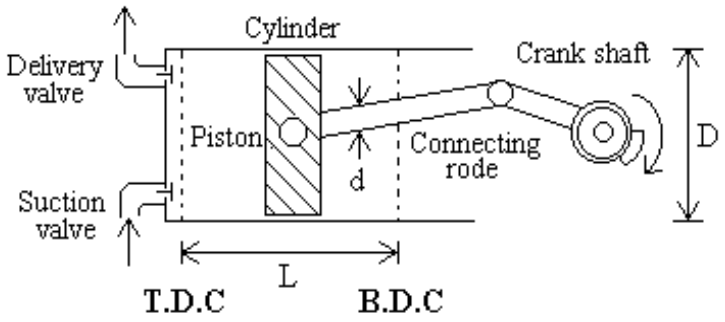
$A_3 = A_2 = 22.4 \quad kJ/kg$

Relative efficiency or Refrigerating efficiency :

$$\eta_R = \frac{1-\frac{A_3}{Q_c}}{1+\frac{A_1+A_2}{W_c}} = \frac{1-\frac{22.4}{1100.58}}{1+\frac{5.15+22.4}{291.72}} = 89.51 \quad \%$$

الكفاءة الحجمية للضاغط الترددى

يتركب الضاغط الترددى من أسطوانة(Cylinder) يتحرك بداخلها مكبس (Piston) يتصل هذا المكبس بذراع توصيل (Connecting rod) وعمود المرفق أو عمود الإدارة (Crank shaft)، والأسطوانة بها صمام سحب (Suction valve) وصمام طرد(Delivery valve) ويتحرك المكبس داخل الأسطوانة من النقطة الميتة العليا (Top dead center) إلى النقطة الميتة السفلى (Bottom dead center) بمسافة تسمى طول المشوار (Stroke)، ويوجد حجم يسمى حجم الخلوص (Clearance volume) أعلى الأسطوانة عند النقطة الميتة العليا حتى لا يصطدم المكبس برأس الأسطوانة وصمامات السحب والطرد كما هو موضح فى شكل (٢-٨).



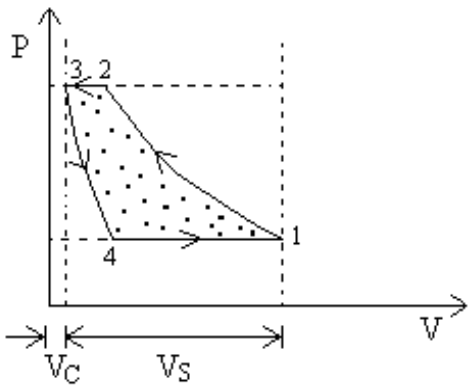


Fig. 2-8 Diagram of reciprocating compressor and indicator card for P-V.

يبدأ المكبس الحركة من النقطة الميتة السفلى عند حجم وضغط السحب للنقطة 1، وصمام السحب والطرد مغلقين أثناء شوط الانضغاط، كلما يتحرك المكبس فى اتجاه النقطة الميتة العليا يزداد ضغط الشحنة ويقل الحجم وهذا إجراء انضغاط بثبوت الانتروبى 2- 1 ، لأنه يفترض فى هذا الإجراء عدم انتقال حرارة من أو إلى الشحنة داخل الأسطوانة (Adiabatic process) وكذلك عدم وجود احتكاك (Frictionless)، فعندما يصل المكبس إلى النقطة 2 نهاية شوط الانضغاط يكون الضغط هو ضغط الطرد فيفتح صمام الطرد لخروج الشحنة من الضاغط حتى النقطة 3 التى عندها النقطة الميتة العليا ، والإجراء 3-2 إجراء ثبوت ضغط وهو إجراء خروج الشحنة من الضاغط، وعند النقطة 3 يقفل صمام الطرد ومازال صمام السحب مغلق والمكبس يغير اتجاهه إلى أسفل فى اتجاه النقطة الميتة السفلى والحجم عند النقطة 3 يسمى حجم الخلوص حتى لا يصطدم المكبس بالصمامات وغطاء الأسطوانة. ثم تبدأ الشحنة المتبقية فى حجم الخلوص فى التمدد إلى النقطة 4 بإجراء ثبوت الانتروبى، وعندما يقل الضغط داخل الأسطوانة أثناء حركة المكبس فى اتجاه النقطة الميتة السفلى إلى ضغط السحب ،

يحدث هذا عند النقطة 4 فيفتح صمام السحب وتدخل الشحنة الجديدة ويظل صمام السحب مفتوحا" حتى النقطة 1. والإجراء 1-4 هو إجراء ثبوت ضغط ، وحجم الشحنة الجديدة التى دخلت إلى الضاغط هو الفرق بين حجم الشحنة عند النقطة 1 وحجم الشحنة عند النقطة 4، ونلاحظ مما سبق أن المكبس يقوم بسحب الشحنة وطردها (الشوط الفعال) فى كل لفة من لفات عمود المرفق.

فى الإجراء 1-4 نجد أن الحجم الفعلى لشحنة السحب أقل من حجم شوط السحب والنسبة بينهما هى الكفاءة الحجمية للضاغط.

Volumetric efficiency, η_v:

$$\eta_v = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_3}$$

Where,

Piston swept volume = $V_1 - V_3$,

Clearance volume = V_3

Volume of fresh charge = $V_1 - V_4$

Clearance factor = C

Where,

$$C = \frac{V_3}{V_1 - V_3}$$

$$\eta_v = \frac{V_1 - V_4 + V_3 - V_3}{V_1 - V_3} = \frac{(V_1 - V_3) + (V_3 - V_4)}{V_1 - V_3} = 1 + \frac{V_3 - V_4}{V_1 - V_3}$$
$$= 1 + \frac{V_3}{V_1 - V_3}\left(1 - \frac{V_4}{V_3}\right) = 1 + C\left(1 - \frac{V_4}{V_3}\right)$$

The process 3-4 is isentropic expansion, $s=c$ and $PV^k=c$. The relation of P-V as follow,

$$P_3 V_3^k = P_4 V_4^k$$
$$\frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{1}{k}}$$

النقطة 3 عندها يتم طرد وخروج الشحنة من الضاغط ولذلك يمكن الإشارة إلى الضغط والحجم عندها بالرمز d, delivery . والنقطة 4 هى دخول الشحنة الجديدة إلى الضاغط ويمكن الإشارة إليها بالرمز s, suction. وبناء" على ذلك يمكن كتابة علاقة الكفاءة الحجمية للضـــاغط بدلالة حجم وضغط الشحنة عند بداية السحب ونهاية الطرد.

$$\eta_v = 1 + C - C\left(\frac{V_s}{V_d}\right) = 1 + C - C\left(\frac{P_d}{P_s}\right)^{\frac{1}{k}} \qquad 2\text{-}17$$

فمن العلاقة السابقة نلاحظ أن الكفاءة الحجمية للضاغط الترددى تتأثر بحجم الخلــوص وكذلك نسبة الانضغاط r ، حيث أن نسبة الانضغاط هى النسبة بين ضـــغط الطــرد وضـــغط

السحب ، والعلاقة عكسية بين الكفاءة الحجمية فى الطرف الأيسر ونسبة الانضغاط ونسبة الخلوص فى الطرف الأيمن، فكلما تزيد نسبة الخلوص C أو نسبة الانضغاط r تنخفض الكفاءة الحجمية للضاغط والعكس صحيح. وإذا كان إجراء الانضغاط 2 - 1 لا يتم بثبوت الانتروبى فدليل الإجراء k يستبدل بالدليل n فى العلاقة 17-2.

ويمكن حساب الكفاءة الحجمية للضاغط عن طريق أبعاد الضاغط وكذلك معدل مرور حجم شحنة وسيط التبريد فى الضاغط، فحجم شوط الانضغاط أو الحجم المزاح أمام المكبس يمكن حسابه لضاغط أحادى الوجه أو ثنائى الوجه كما يلى:

Piston displacement volume, P.D for single acting compressor as follow,

$$P.D = \frac{\pi}{4} D^2 L.Z.N \qquad 2\text{-}18$$

Piston displacement volume, P.D for double acting compressor as follow,

$$P.D = \left[\frac{\pi}{4} \left(D^2 - d^2 \right) + \frac{\pi}{4} D^2 \right] L.Z.N$$

$$P.D = \frac{\pi}{4} \left(2D^2 - d^2 \right) L.Z.N \qquad 2\text{-}19$$

The volume of vapor refrigerant enter and deliver from the compressor can be estimate as follow,

$$\dot{V} = \dot{m}.v_s$$

The volumetric efficiency of compressor can be estimate as follow,

$$\eta_v = \frac{\dot{m}.v_s}{P.D} \qquad 2\text{-}20$$

حيث أن :

D : قطر أسطوانة الضاغط. d : قطر ذراع التوصيل.

L : طول مشوار السحب. Z : عدد أسطوانات الضاغط.

N : عدد لفات الضاغط فى الدقيقة.

كفاءة إجراء الإنضغاط

Isentropic , Adiabatic or Compression Efficiency

إجراء شوط الانضغاط 1-2 يتم بثبوت الانتروبـــى $s = c$ ، $PV^k = c$ (Isentropic process)، ونظرا" لوجود الاحتكاك وانتقال الحرارة فى إجراء الانضغاط الفعلى فـــإن شـــحنة الانضغاط تخرج من الضاغط بدرجة حرارة وانثالبيا مختلفة عن الإجراء بثبوت الانتروبى. كما هو موضح بشكل (٢-٩).

Isentropic process 1-2, $\boldsymbol{s = c}$

Irreversibl adiabatic process $1\text{-}2^{\backslash}$

Polytropic process $1\text{-}2^{\backslash}$ $\boldsymbol{n > k}$

Polytropic process $1\text{-}2^{\backslash\backslash}$ $\boldsymbol{n < k}$

ويوجد ثلاثة أنواع من إجراءات الانضغاط كما بشكل (٢-٩)كما يلى:

١ – إجراء انضغاط بثبوت الإنتروبى, $s = c$ Isentropic process 1-2,

فى هذا الإجراء لا يوجد احتكاك ولا يتم انتقال حرارة من وإلى الإجراء ، والإجراء انعكاسى.

Process 1-2, Isentropic or reversible adiabatic process $\boldsymbol{s} = \boldsymbol{c}$,
no heat transfer, no friction, $Pv^k = c$

٢ – إجراء أديباتيكى غير انعكاسى

Irreversible adiabatic process 1-2$^{\backslash}$

فى هذا الإجراء لا يوجد انتقال حرارة من أو إلى الإجراء ولكن يوجد احتكاك والحرارة المتولدة تتسبب فى زيادة الانتروبى للإجراء وكذلك الإنثالبيا ودليل الإجراء $\boldsymbol{n}$ أكبر من $\boldsymbol{k}$.

Process 1-2$^{\backslash}$, Irreversible adiabatic process (Polytropic $\boldsymbol{n}>\boldsymbol{k}$),
no heat transfer, but increasing of entropy.

٣ – إجراء انضغاط غير أديباتيكى وغير انعكاسى

Polytropic process, 1-2$^{\backslash\backslash}$

فى هذا الإجراء جزء من الشغل المبذول على الإجراء يتحول إلى حرارة ويخرج عبر أســطوانة الضاغط إلى الوسط الخارجى ودليل الإجراء n أقل من k .

Process 1-2$^{\backslash\backslash}$, Polytropic process $n<k$. Part of work done is transferred from compressor cylinder to surrounding.

$$Pv^n = c$$

وكفاءة الانضغاط هى النسبة بين شغل الانضغاط عند ثبوت الانتروبى وشغل الانضغاط فى الإجراء الأديباتيكى الغير انعكاسى $n > k$.

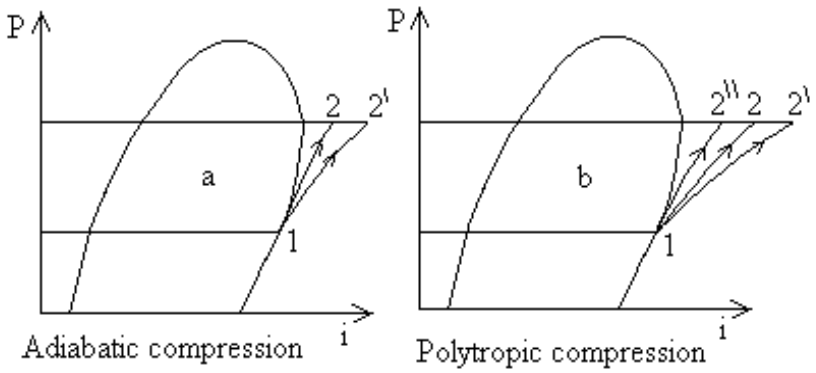


Fig. 2-9 various types of compression process.

Isentropic or Adiabatic Compression Efficiency, η_c:

$$\eta_c = \frac{W.D_{1-2}}{W.D_{1-2'}}$$

$$\eta_c = \frac{i_2 - i_1}{i_{2'} - i_1} \qquad 2\text{-}21$$

شغل الانضغاط فى الإجراء الأديباتيكى غير الانعكاسى،

Irreversible adiabatic process 1-2'

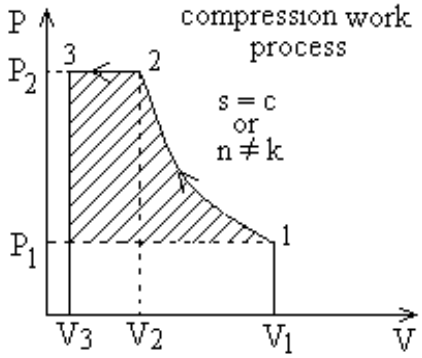
الضاغط الترددى يعتبر آلة ميكانيكية تعمل عند حالة الاستقرار، وكما هو موضح بالشكل (٢-١٠) على مبين الضغط والحجم لإجراء الانضغاط للضاغط الترددى ، فإن الشغل المبذول على الشحنة يحسب من المعادلة الآتية:

$$W.D_{1-2} = -\int_1^2 PdV \qquad 2\text{-}22$$

Table 2-1 Isentropic exponent for common refrigerants at 1 bar

وسيط التبريد	R-11	R-12	R-22	R-113	R-114	NH_3
درجة حرارة التشبع ^oC	30	10	30	71.11	43.33	21.11
K	1.11	1.13	1.16	1.08	1.09	1.31

يبدأ إجراء الانضغاط فى الضاغط الترددى عند النقطة 1 (النقطـــة الميتـــة الســـفلى) ويتحرك المكبس فى اتجاه النقطة الميتة العليا. يتم ضغط الشحنة حتى النقطة 2 ثـــم يفـــتح صمام الطرد لتخرج الشحنة عند p_2 ومازال المكبس يبذل شغل على الشحنة حتى النقطة الميتة العليا النقطة 3. ونلاحظ أن الشغل الصافى المبذول على الشحنة هو المســـاحة المظللـــة وهـــى



تساوى:

Fig. 2-10 Shaft work done of compression process.

$$W.D = -W_{1-2} + p_2V_2 - p_1V_1$$

الطرف الأيمن من المعادلة السابقة يتكون من ثلاثة حدود. الحد W_{1-2} هو شغل الانضغاط فـــى الإجراء 2-1سواء" كان الإجراء بثبوت الانتروبى $n = k$ أو أديباتيكى غير انعكاســـى $n > k$. الحد p_2V_2 هو شغل مبذول على الشحنة لدفعها خارج أسطوانة الضاغط. أما الحـــد p_1V_1 هـــو طاقة انسياب تدخل مع الشحنة أثناء شوط السحب.

$$W.D = -\frac{P_1V_1 - P_2V_2}{n-1} + p_2V_2 - p_1V_1$$

$$= \frac{n}{n-1}\left(p_2V_2 - p_1V_1\right)$$

$$= \frac{n}{n-1}\, p_1V_1\left(\frac{p_2V_2}{p_1V_1} - 1\right)$$

$$For \quad pV^n = c, \quad p_2V_2^n = p_1V_1^n$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n, \quad \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$W.D = \frac{n}{n-1}\, p_1V_1\left(\frac{p_2}{p_1}\left(\frac{p_2}{p1}\right)^{-\frac{1}{n}} - 1\right)$$

$$= \frac{n}{n-1}\, p_1V_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

وبالدلالة على ***s*** بدلا" من 1وهى تعبر عن الشحنة عند إجراء شوط السحب ، ***d*** بدلا" من 2 عند إجراء الطرد والتعبير بالحجم النوعى للشحنة عند السحب فى المعادلة السابقة. فيكــون الشــغل المبذول كالآتى:

$$W.D = \frac{n}{n-1}\dot{m}\, p_s v_s \left[\left(\frac{p_d}{p_s} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \qquad 2\text{-}23$$

والمعادلة 2-23 هى المعادلة التى نستطيع بها أن نحسب قيمة شغل إجراء الانضـــغاط المطلوب لرفع ضغط وسيط التبريد من ضغط السحب إلى ضغط الطرد. والعلاقة بـــين الحجـــم والضغط أثناء شوط الانضغاط تتوقف على ما إذا كان الانضغاط يتم بثبوت الانتروبى ، ($s =$ $c, Pv^k = c$)أو الانتروبى غير ثابتة ($Pv^n = c$)، وتسمى k أو n دليل الإجراء وقيمة k تحدد من الجدول (٢-١).

مثال ٢-٢

دائرة تبريد انضغاطية بسيطة مشحونة بوسيط تبريد فريـــون ١٢. ضـــغط المبخـــر $1.2bar$ وضغط المكثف $10\ bar$. أحسب لكل واحد $T.R$ الآتى:

١- معدل مرور وسيط التبريد فى المبخر فى الدقيقة. ٢- قدرة الضاغط.

٣- الإزاحة الحجمية لأسطوانة الضاغط إذا كانت نسبة الخلوص $5\ \%$.

٤- معامل الأداء والكفاءة النسبية.

Data: $R\text{-}12,\ P_e = 1.2\ bar = 1.2\times10^5 = 0.12\ Mpa$

$P_c = 10\ bar\ = 10\times10^5\ = 1\ Mpa$

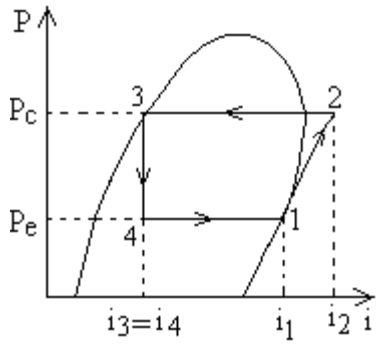
$C = 5\ \%$

$R.C = 1\ T.R = 1\times3.5 = 3.5\ kW$

Required: *1- $\dot{m}$, kg/min* *2- Power, kW*

3- P. D, m^3/min *4- C.O.P and η_R*

Solution:



From P - i chart of R - 12

$i_1 = 560$ *kJ/kg* $\rho_1 = 7$ *kg/m*^{3}, $v_1 = v_s = 0.143$ *m*^{3}*/kg*

$i_2 = 600$ *kJ/kg* $T_e = 245$ *K*

$i_3 = i_4 = 460$ *kJ/kg* $T_c = 320$ *K*

Mass flow rate and power calculation:

$$R.C = \dot{m} \times (i_1 - i_4)$$

$$3.5 = \dot{m} \times (560 - 460)$$

$$\dot{m} = \frac{3.5}{100} = 0.035 \quad kg/s$$

$$\dot{m} = 0.035 \times 60 = 2.1 \quad kg/\min$$

$$W.D = \dot{m} \times (i_2 - i_1) = 0.035 \times (600 - 560) = 1.4 \quad kW$$

$$Power/T.R = 1.4 \quad kW/T.R$$

Compressor piston displacement calculation:

$$\eta_V = 1 + C - C \times \left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{1}{k}} = 1 + 0.05 - 0.05 \times \left(\frac{10}{1.2} \right)^{\frac{1}{1.13}}$$

$$\eta_V = 0.7235 = 72.35\%$$

$$P.D = \frac{\dot{m} \times v_s}{\eta_v} = \frac{2.1 \times 0.143}{0.7235} = 0.41465 \quad m^3/\min$$

Coefficient of performance:

$$C.O.P = \frac{R.C}{Power} = \frac{\dot{m} \times (i_1 - i_4)}{\dot{m} \times (i_2 - i_1)} = \frac{560 - 460}{600 - 560} = 2.5$$

$$C.O.P_{car} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{245}{320 - 245} = 3.27$$

$$\eta_R = \frac{C.O.P}{C.O.P_{car}} = \frac{2.5}{3.27} = 76.45\%$$

مثال ٢-٣

وحدة تكييف هواء تستخدم فريون (*R-22*) لتكييف غرفة مكتب درجة حرارتها $25\ ^oC$ فى فصل الصيف، فإذا علم أن درجة حرارة المبخر هى $17\ ^oC$ والمكثف $47\ ^oC$. الضاغط ترددى أحادى الوجه، عدد الأسطوانات *2* وكفاءته الحجمية *0.9* وعدد لفاته *900 rpm* ، *L/D=1.25*. إذا كان الضاغط يستهلك قدرة *3 kW* وكفاءته الميكانيكية *0.9* أوجد الآتى:

١- معدل مرور وسيط التبريد فى الدقيقة.
٢- سعة التبريد للوحدة بالطن تبريد.
٣- أبعاد أسطوانة الضاغط .
٤- الحمل الحرارى للمكثف.
٥- معامل الأداء والكفاءة النسبية.

Data: *R-22,* $T_e = 17+273 = 290\ K$ $T_c = 47+273 = 320\ K$

Power = 3 kW, Z = 2, N = 900 rpm, $\eta_v = 0.9$*, L/D = 1.25*

Required:
1- Refrigerant mass flow rate by *kg/min.*
2- Refrigeration capacity, *T.R.*
3- Cylinder dimensions, *L*, *D.*
4- Thermal load of condenser, Q_c.
5- Coefficient of performance, *C.O.P*.

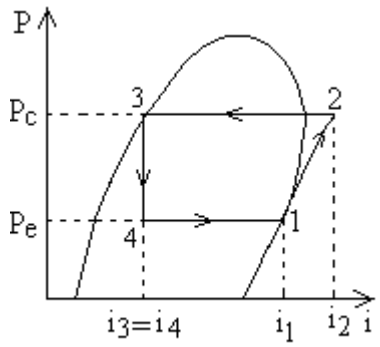
Solution:

From P - i chart of R – 22

i_1 = 628 *kJ/kg* ρ_1 = 33 *kg/m*^{3}, v_1=v_s = 0.0303 *m*^{3}*/kg*

i_2 = 650 *kJ/kg*

i_3 = i_4 = 436 *kJ/kg*



<u>Calculation of refrigeration capacity:</u>

$$Power = \frac{W.D}{\eta_m}$$

$$W.D = 3 \times 0.9 = 2.7 \quad kW$$

$$W.D = \dot{m} \times (i_2 - i_1), \qquad 2.7 = \dot{m} \times (650 - 628)$$

$$\dot{m} = 0.122727 \quad kg/s = 0.122727 \times 60 = 7.36364 \quad kg/min$$

$$Q_e = \dot{m} \times (i_1 - i_4) = 0.122727 \times (628 - 436) = 23.5636 \quad kW$$

$$R.C = \frac{23.5636}{3.5} = 6.7325 \quad T.R$$

Calculation of compressor cylinder dimensions:

$$P.D = \frac{\dot{m} \times v_S}{\eta_V} = \frac{\dot{m}}{\rho_S \times \eta_V} = \frac{7.36364}{33 \times 0.9} = 0.24793 \quad m^3/\min$$

$$P.D = \frac{\pi}{4} D^2 L.Z.N, \qquad 0.24793 = \frac{\pi}{4} D^2 \times 1.25 \times D \times 2 \times 900$$

$$D = 51.96 \quad mm, \qquad L = 64.95 \quad mm$$

Calculation of condenser heat load and coefficient of performance:

$$Q_c = \dot{m} \times (i_2 - i_3) = 0.122727 \times (650 - 436) = 26.2636 \quad kW$$

$$C.O.P = \frac{R.C}{Power} = \frac{23.5636}{3} = 7.8545$$

$$C.O.P_{car} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{290}{320 - 290} = 9.6667$$

$$\eta_R = \frac{C.O.P}{C.O.P_{car}} = \frac{7.5845}{9.6667} = 81.25\%$$

مثال ٢ – ٤

وحدة تبريد انضغاطية بسيطة مشحونة بوسط تبريد NH_3. تستخدم هذه الوحدة فى مصنع ثلج ينتج *150 ton* من الثلج فى اليوم من ماء درجة حرارته $25\ ^oC$ والثلج يخرج عند $-15\ ^oC$ بعد زمن تبريد قدره *18 hr* ، الحرارة النوعية للماء *4.18 kJ/(kg. K)* وللثلج *2.1 kJ/(kg. K)* والحرارة الكامنة لتجميد الماء *335 kJ/kg*، يستخدم محلول ملحى *Brine* كوسيط انتقال حرارة بين حوض صناعة الثلج ومبخر وحدة التبريد، درجة حرارة المحلول الملحى أقل *8* ^oC من درجة حرارة الثلج ودرجة حرارة المبخر أقل $5\ ^oC$ من درجة حرارة المحلول الملحى ، ودرجة حرارة التكثيف $47\ ^oC$ والمكثف تبريد ماء وتدخل المياه إلى المكثف بدرجة حرارة *25* ^oC وتخرج $33\ ^oC$، الضاغط ترددى أحادى الوجه والانضغاط يتم بثبوت الانتروبى ، وعدد أسطوانات الضاغط 6 بنسبة خلوص *5 %* وعدد لفات *600 rpm* وكفاءة ميكانيكية *85 %* ، والنسبة بين طول الشوط وقطر المكبس *1.25*، المفاقيد الحرارية فى حوض صناعة الثلج والأنابيب الموصلة إلى المبخر تقدر بمعامل أمان يعادل *10 %* من حمل التبريد فى حوض الثلج. أحسب الآتى:

١– سعة التبريد للمبخر، *T.R*. ٢– قدرة الضاغط، *kW* ،

وأبعاد الأسطوانة، *mm*. ٣ – الحمل الحرارى للمكثف، *kW*.

٤ – كمية المياه للمكثف، m^3/min. ٥ – معامل الأداء ونسبة الكفاءة.

Data: NH_3, $m_{ice} = 150$ *ton*, $t_{ice} = -15\ ^oC$, $C_{pw} = 4.18$ *kJ/kg*

$C_{pice} = 2.1$ *kJ/kg*, $L.H = 335$ *kJ/kg*, $t_{brine} = -23\ ^oC$

$t_e = -28\ ^oC$, $t_c = 47\ ^oC$, $\Delta t_w = 8\ ^oC$

$Z = 6$, $C = 5\ \%$, $L/D = 1.25$

$N = 600$ *rpm*, $\eta_m = 85\%$, *time* = 18 *hr*

Safty factor = 10 %

Required: 1- Refrigeration capacity, *T.R.*

2- Compressor power, *kW*.

3- Cylinder dimension, *L*, *D*, *mm*.

4- Condenser capacity, *kW*, and water flow, m^3/min.

5- *C.O.P* and $\eta_{R..}$

Solution:

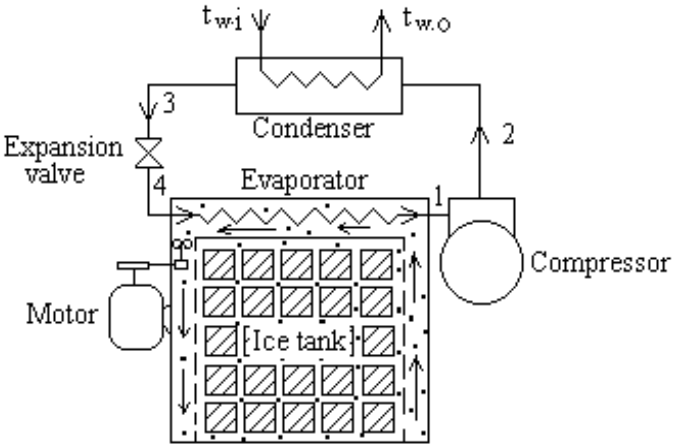
From P - i chart of ammonia NH_3,

$i_1 = 500$ *kJ/kg* $\rho_1 = \rho_S = 1.25$ *kg/m*^{3}

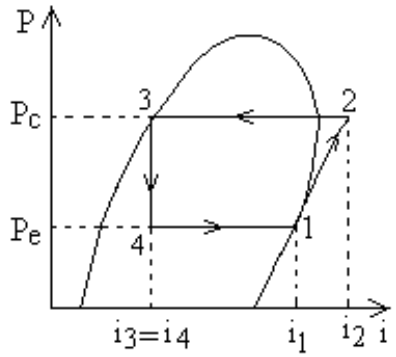
$i_2 = 885$ *kJ/kg* $p_2 = p_d = 19$ *bar*

$i_3 = i_4 = -536\ kJ/kg$ $p_1 = p_s = 1.44\ bar$

Flow diagram



P – i diagram



Cooling load calculation:

$$Cooling\ Load = \frac{m_{ice}}{time}\left[C_{p_w}(t_{w.i} - t_f) + L.H + C_{p_{ice}}(t_f - t_{ice})\right]$$

$$= \frac{150\times10^3}{18\times60\times60}\left[4.18(25-0) + 335 + 2.1(0-(-15))\right]$$

$$= 1090.277778 \quad kW$$

$$Actual\ Cooling\ \ Load = 1.1 \times Cooling\ \ Load$$

$$= 1.1\times1090.277778 = 1199.31 \quad kW$$

$$R.C = \frac{Actual\ \ Cooling\ \ Load}{3.5} = \frac{1199.305556}{3.5} = 342.66 \quad T.R$$

Compressor Power Calculation:

$$\dot{m} = \frac{Actual \quad Cooling \quad Load}{i_1 - i_4} = \frac{1199.305556}{500 - (-536)}$$

$$\dot{m} = 1.15763 \qquad kg/s = 69.45785 \qquad kg/\min$$

$$W.D = \dot{m} \times (i_2 - i_1) = 1.15763 \times (885 - 500) = 445.687 \qquad kW$$

$$Power = \frac{W.D}{\eta_m} = \frac{445.687}{0.85} = 524.338 \qquad kW$$

Compressor Cylinder Dimensions:

$$\eta_v = 1 + C - C\left(\frac{P_d}{P_s}\right)^{\frac{1}{k}} = 1 + 0.05 - 0.05 \times \left(\frac{19}{1.44}\right)^{\frac{1}{1.31}} = 69.17\%$$

$$P.D = \frac{\dot{m}}{\rho_S \times \eta_V} = \frac{69.45785}{1.25 \times 0.6917} = 80.331346 \qquad m^3/min$$

$$P.D = \frac{\pi}{4} D^2 L.Z.N$$

$$80.331346 = \frac{\pi}{4} \times 1.25 \times D^3 \times 6 \times 600$$

$$D = 283.2658 \qquad mm \qquad\qquad L = 354.082 \qquad mm$$

Condenser Cooling Water Calculations:

$$Q_c = \dot{m} \times (i_2 - i_3) = 1.15763 \times (885 - (-536)) = 1644.99223 \quad kW$$

$$Q_c = \dot{m}_w \times C_{p_w} (t_{w.o} - t_{w.i})$$

$$\dot{m}_w = \frac{1644.99223}{4.18 \times 8} = 49.19235 \quad (kg/s) = 2951.541 \quad kg/\min$$

$$\dot{m}_w \approx 2.952 \quad m^3/\min$$

Coefficient of Performance:

$$C.O.P = \frac{R.C}{Power} = \frac{1199.305556}{524.338} = 2.287$$

$$C.O.P_{car} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{245}{320 - 245} = 3.267$$

$$\eta_R = \frac{C.O.P}{C.O.P_{car}} = \frac{2.287}{3.267} = 70.01\%$$

مثال ٢ – ٥

دورة تبريد انضغاطية فى مصنع ثلج تستخدم الأمونيا NH_3 كوسيط تبريد بسعة تبريد $300\ T.R$ ، وسيط التبريد يخرج من المبخر بخار جاف مشبع بدرجة حرارة $-15\ ^oC$ ، والمكثف تبريد مياه ويخرج وسيط التبريد منه سائل مشبع بدرجة حرارة $40\ ^oC$ ، الضاغط أحادى الوجه وكفاءته الحجمية $90\ \%$ وعدد الأسطوانات $Z = 4$ ويدور بعدد لفات $N = 600\ rpm$ والنسبة بين طول المشوار وقطر المكبس $L/D = 1.25$. الكفاءة الميكانيكية للضاغط $85\ \%$ وإجراء الانضغاط يتم بثبوت الانتروبى. مياه تبريد المكثف تدخل بدرجة حرارة $25\ ^oC$ وتخرج بدرجة حرارة $33\ ^oC$ والحرارة النوعية للمياه $4.18\ kJ/(kg.\ K)$، أرسم بيان تخطيطى للدورة التبريد ووضحها على منحنى P-i ثم أحسب الآتى:

١- معدل مرور وسيط التبريد فى الدقيقة. ٢- القدرة الكهربية المطلوبة للضاغط.
٣- أبعاد أسطوانة الضاغط . ٤- معدل مرور المياه فى المكثف فى الدقيقة.
٥- معامل الأداء والكفاءة النسبية.

ثم ماذا يحدث لو أن:

١- إجراء الانضغاط له كفاءة انضغاط *% 90.*
٢- إجراء الانضغاط غير أديباتيكى وغير انعكاسى، $n = 1.37$.

Data: NH_3, $R.C = 300\ T.R$

$T_e = -15+273=258\ K$

$T_c = 40+273 = 313\ K$

single acting compressor, $\eta_v = 90\ \%$

$Z = 4$, $N = 600\ rpm$

$L/D=1.25$, $\eta_m = 85\ \%$

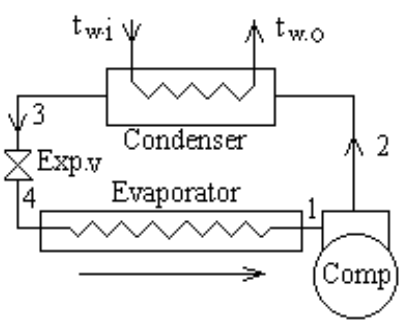
$t_{w.i} = 25\ ^oC$, $t_{w.o} = 33\ ^oC$, $C_{pw} = 4.18\ kJ/(kg.\ K)$

Required: *1-* $\dot{m}$ *, kg/min* *2- Power, kW*

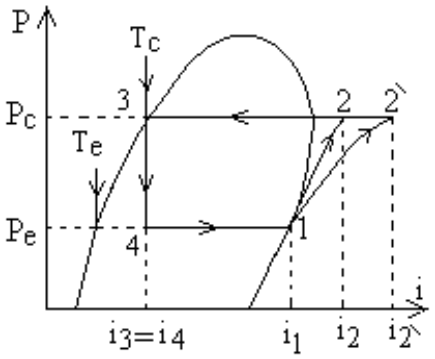
3- L, D , mm *4-* $\dot{m}_w$ *,* m^3/min

5- C.O.P and η_R.

Solution:



Flow diagram



P-i diagram

From P - i chart of ammonia NH_3,

$i_1 = 500$ *kJ/kg* $\quad \rho_1 = 1.75$ *kg/m*^{3}, $v_1=v_s = 0.571$ *m*^{3}*/kg*

$i_2 = 775$ *kJ/kg* $\quad p_1=p_s = 2.25$ bar

$i_3 = i_4 = -572$ *kJ/kg* $\quad p_2 = p_d = 17$ *bar*

1- The compression process is isentropic, s = c

Refrigeration capacity, R.C

$$R.C = \dot{m} \times (i_1 - i_4)$$

$$\dot{m} = \frac{R.C}{i_1 - i_4}$$

$$= \frac{300 \times 3.5}{500 - (-572)} = \frac{1050}{1072} = 0.9795 \quad kg/s$$

$$\dot{m} = 58.769 \quad kg/\min$$

Compressor power and cylinder dimensions:

$$W.D = \dot{m} \times (i_2 - i_1) = 0.9795 \times (775 - 500) = 269.363 \quad kW$$

$$Power = \frac{W.D}{\eta_m} = \frac{269.363}{0.85} = 316.897 \quad kW$$

$$\eta_v = \frac{\dot{m} \times v_s}{P.D}, \qquad P.D = \frac{\dot{m} \times v_s}{\eta_v} = \frac{58.769 \times 0.57143}{0.9}$$

$$P.D = 37.3137 \quad m^3/\min$$

$$P.D = \frac{\pi}{4} D^2 L.Z.N$$

$$P.D = \frac{\pi}{4} 1.25 D^3 Z.N = \frac{\pi}{4} \times 1.25 \times D^3 \times 4 \times 600$$

$$37.3137 = 2356.194 \times D^3$$

$$D = 251.123 \quad mm, \quad L = 313.903 \quad mm$$

Heat balance of condenser:

$$Q_c = \dot{m} \times (i_2 - i_3) = 0.9795 \times (775 - (-572))$$
$$Q_c = 1319.387 \quad kW$$
$$Q_c = \dot{m}_w \times C_{p_w} (t_{w.o} - t_{w.i})$$
$$1319.3865 = \dot{m}_w \times 4.18 \times (33 - 25)$$
$$\dot{m}_w = 39.455 \quad kg/s$$
$$\dot{m}_w = 2367.32 \quad kg/\min$$
$$\dot{Q}_w = 2.367 \quad m^3/\min$$

Coefficient of performance, C.O.P:

$$C.O.P = \frac{R.C}{Power} = \frac{300 \times 3.5}{316.897} = 3.313$$
$$C.O.P_{car} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{258}{313 - 258} = 4.691$$
$$\eta_R = \frac{C.O.P}{C.O.P_{car}} = \frac{3.313}{4.691} = 70.63\%$$

2- The compression process is adiabatic with compression efficiency:

فى حالة وجود كفاءة انضغاط للضاغط فإن الإنثالبيا فى نهاية شوط الانضـــغاط تكـــون أكبر من حالة الانضغاط بثبوت الانتروبى. وعليه سوف يتم التغير فى قدرة الضـــاغط وكـــذلك الحمل الحرارى للمكثف وكمية المياه اللازمة لتبريده.

Compressor power calculation:

$$\eta_c = \frac{i_2 - i_1}{i_{2'} - i_1}, \qquad 0.9 = \frac{775 - 500}{i_{2'} - 500},$$

$$i_{2'} = 805.56 \qquad kJ/kg$$

$$W.D = \dot{m} \times (i_{2'} - i_1) = 0.9795 \times (805.56 - 500)$$

$$= 299.292 \qquad kW$$

$$Power = \frac{W.D}{\eta_m} = \frac{299.292}{0.85} = 352.108 \qquad kW$$

Condenser cooling water calculation:

$$Q_c = \dot{m} \times (i_{2'} - i_3) = 0.9795 \times (805.56 - (-572))$$
$$= 1349.32 \quad kW$$
$$Q_c = \dot{m}_w \times C_{p_w} (t_{w.o} - t_{w.i})$$
$$\dot{m}_w = \frac{1349.32}{4.18 \times 8} = 40.35 \quad kg/s$$
$$\dot{m}_w = 2421.028 \quad kg/\min$$
$$\dot{Q}_w = 2.421 \quad m^3/\min$$

Coefficient of performance calculation:

$$C.O.P = \frac{R.C}{Power} = \frac{300 \times 3.5}{352.108} = 2.982$$
$$\eta_R = \frac{C.O.P}{C.O.P_{car}} = \frac{2.982}{4.691} = 63.57\%$$

3- The compression process is polytropic with index n = 1.37

فى هذا الإجراء نجد أن العلاقة بين الحجم والضغط مرفوعة للأس n وهو أكبر من k ولذلك يجب حساب شغل الإجراء من القانون الآتى:

$$W.D = \frac{n}{n-1} \dot{m} P_s v_s \left[\left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$W.D = \frac{1.37}{1.37-1} \times 0.9795 \times 2.25 \times 10^2 \times 0.57143 \times \left[\left(\frac{17}{2.25} \right)^{\frac{1.37-1}{1.37}} - 1 \right]$$

$$W.D = 338.824 \qquad kW$$

$$Power = \frac{W.D}{\eta_m} = \frac{338.824}{0.85} = 398.617 \qquad kW$$

يجب تحديد النقطة $2'$ وهى نهاية إجراء الانضغاط كالآتى:

١- نحسب الحجم النوعى عند نهاية الإجراء ثم نحدد قيمة الكثافة وهى مقلوب الحجم النوعى.

٢- بمعلومية الكثافة والضغط فى نهاية شوط الانضغاط نستطيع توقيع النقطة $2'$ ثـم نحدد قيمة الانثالبيا $i_{2'}$ من على خريطة الأمونيا كما يلى:

Determination of point 2':

$$P_1 v_1^n = P_{2'} v_{2'}^n , \qquad v_{2'} = v_1 \left(\frac{P_1}{P_{2'}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$v_{2'} = 0.57143 \times \left(\frac{2.25}{17} \right)^{\frac{1}{1.37}}$$

$$v_{2'} = 0.13058 \quad m^3 / kg$$

$$\rho_{2'} = \frac{1}{v_{2'}} = 7.658 \quad kg / m^3$$

$$at\ P_{2'} ,\ \rho_{2'} \quad we\ can \quad locate \quad 2'$$

$$i_{2'} = 885 \quad kJ / kg$$

Condenser cooling water calculation:

$$Q_c = \dot{m} \times (i_{2'} - i_3) = 0.9795 \times (885 - (-572))$$

$$= 1427.132 \quad kW$$

$$Q_c = \dot{m}_w \times C_{p_w} (t_{w.o} - t_{w.i})$$

$$\dot{m}_w = \frac{1427.132}{4.18 \times 8} = 42.6774 \quad kg / s$$

$$\dot{m}_w = 2560.643 \quad kg / \min$$

$$\dot{Q}_w = 2.561 \quad m^3 / \min$$

Coefficient of performance calculation:

$$C.O.P = \frac{R.C}{Power} = \frac{300 \times 3.5}{398.617} = 2.634$$

$$\eta_R = \frac{C.O.P}{C.O.P_{car}} = \frac{2.634}{4.691} = 56.15\%$$

أسئلة على الباب الثانى

١- ثلاجة منزلية مشحونة بمركب تبريد فريون ١٢ تعمل تبعا" لدورة التبريد البسيطة. ضغط المبخر والمكثف على التوالى هو *1.6, 11 bar* أوجد لكل واحد طن تبريد :

١- معدل مرور وسيط التبريد فى الدقيقة.

٢- الإزاحة الحجمية للضاغط إذا علمت أن الكفاءة الحجمية للضاغط *% 100.*

٣- قدرة الضاغط بوحدة *kW* . ٤- معامل الأداء للثلاجة والكفاءة النسبية.

٢- وحدة تبريد تعمل بالأمونيا بسعة *12 T.R*، درجة حرارة المبخر *$12\ ^oC$-* والمكثف *$35\ ^oC$* ، الضاغط أحادى الوجه ويتركب من أسطوانتين، النسبة بين طول المشوار وقطر المكبس هى *L/D = 1.5* وعدد لفات الضاغط فى الدقيقة هو *900 r.p.m* ، الكفاءة الحجمية للضاغط هى *75%* والكفاءة الميكانيكة *90%* ، أوجد الآتى إذا علمت أن كفاءة الانضغاط *% 85* :

١- القدرة المطلوبة للضاغط. ٢- الحمل الحرارى على المكثف.

٣- أبعاد أسطوانة الضاغط. ٤- معامل الأداء والكفاءة النسبية.

٣- وحدة تبريد تعمل بالأمونيا وضغط المكثف *bar 13*. الضاغط ذو أسطوانة واحدة طول المشوار *115 mm* وقطر المكبس *100 mm* ويدور بسرعة *600 rpm* ونسبة الخلوص *4%* ،

وسيط التبريد يخرج من المبخر غاز جاف مشبع، ويخرج من المكثف سائل مشبع، ضغط المبخر يتغير من *1.3, 3, 4.5, 6 bar*، أرسم الآتى مع ضغط المبخر:

١- معدل وسيط التبريد ٢- قدرة الضاغط ٣- سعة المبخر.

٤- نظام تبريد يعمل فى وحدة تكييف هواء. وسيط التبريد هو فريون ١٢ ويخرج من المبخر والمكثف عند ظروف التشبع. درجة حرارة المبخر $-4\ ^oC$ درجة حرارة المكثف $40\ ^oC$ ، المكثف تبريد مياه بمعدل مرور للمياه $1.35\ m^3/hr$، درجة حرارة دخول وخروج المياه من المكثف هى $25, 36\ ^oC$ ، قدرة محرك الضاغط هى $5\ kW$ والكفاءة الحجمية للضاغط $80\ \%$ ، الضاغط أحادى الوجه ، النسبة بين طول المشوار وقطر المكبس هى *1.2* وعدد لفات الضاغط *650 rpm* ، أحسب الآتى:

١- سعة المبخر بوحدة *T.R*. ٢- شغل الضاغط بوحدة *kW* .

٣- الكفاءة الميكانيكية للضاغط. ٤- أبعاد الضاغط.

٥- معامل الأداء والكفاءة النسبية.

٥- وحدة تبريد بسيطة تستخدم فى تثليج حليب من درجة حرارة $25\ ^oC$ إلى درجة حرارة $8\ ^oC$ ودرجة حرارة ملف التبريد $-5\ ^oC$ وضغط المكثف *13 bar* ، وسيط التبريد هو *R-12* ومعدل تثليج الحليب *25 lit/min* ، الحرارة النوعية للحليب *2.81 kJ/(kg. K)* والكثافة *860* kg/m^3، ضاغط ثنائى الوجه بعدد لفات *900 rpm* ونسبة خلوص *3%* وكفاءة ميكانيكية *75 %* وكفاءة نقل *95 %* ، أحسب الآتى:

١- سعة المبخر بوحدة *T.R* إذا كان به *5 %* مفاقيد حرارية من قيمة حمل التبريد.

٢ - معدل مرور وسيط التبريد فى الدقيقة.

٣ - قدرة الضاغط وأبعاد الأسطوانة إذا كانت النسبة بين طول المشوار وقطر المكبس *L/D=1.15*، $d = D/8$.

٤- الحمل الحرارى للمكثف وكمية الماء المستخدمة فى تبريده إذا كانت مياه التبريد ترتفع درجة حرارتها بمقدار $8\ ^oC$.

٦- نظام تبريد ذو دورة تبريد انضغاطية بسيطة مشحونة بوسيط تبريد NH_3 . وحدة الانضغاط ترددية بها ست أسطوانات وقطر الأسطوانة $95\ mm$ وطول الشـــوط $76\ mm$ بســـرعة $950\ rpm$. الكفاءة الحجمية للضاغط $75\ \%$ والميكانيكية $85\ \%$. درجة حرارة التكثيـــف $35\ ^oC$ ودرجة حرارة التبخير $-20\ ^oC$ ، أحسب الآتى:

١- سعة المبخر بوحدة $T.R$.

٢- قدرة الضاغط إذا كانت كفاءة إجراء الانضغاط $90\ \%$.

٣- الحمل الحرارى على المكثف.

٤- معامل الأداء لنظام التبريد والكفاءة النسبية.

٧- وحدة تكييف هواء ذو ضاغط ترددى بسرعة $750\ rpm$ وكفاءة ميكانيكيـــة $80\ \%$ ونســـبة خلوص $5\ \%$، وسيط التبريد فريون 22 ، سعة التبريد للوحدة $13\ T.R$ عند درجة حرارة تبخير $2\ ^oC$ ودرجة حرارة تكثيف 30^oC، أحسب ما يلى:

١- قدرة الضاغط . ٢- أبعاد الأسطوانة إذا كانت $L/D = 1$.

ثم أحسب سعة المبخر وقدرة الضاغط إذا تغيرت درجة حرارة التبخير إلى $5\ ^oC$ والتكثيف إلى $35\ ^oC$.

٨- غرفة تجميد تستخدم وسيط تبريد $R\text{-}12$ ، درجة حرارة التبخير $-20\ ^oC$ ودرجة حـــرارة تكثيف $38\ ^oC$ ، المكثف يبرد بالماء بمعدل$170\ lit/min$ ويدخل المكثف بدرجة حرارة $22\ ^oC$ ويخرج بدرجة حرارة $30\ ^oC$ ، الضاغط ترددى به 4 أسطوانات أحادية الوجه وعدد لفاته $900\ rpm$ ، أحسب الآتى:

١- سعة المبخر $T.R$

٢- القدرة المطلوبة لدفع الضاغط بكفاءة ميكانيكية $80\ \%$.

٣- أبعاد الضاغط إذا كانت نسبة الخلوص $4\ \%$، $L/D = 1.2$.

٤- معامل الأداء والكفاءة النسبية.

٩- وحدة تبريد بسيطة مشحونة بوسيط تبريد $R\text{-}12$ تستخدم لتجميد $10\ ton$ من الماء عند $24\ ^oC$ لإنتاج ثلج عند $11\text{-}\ ^oC$ فى اليوم، فإذا كانت درجة حرارة التبخير $18\text{-}\ ^oC$ ودرجة حرارة التكثيف $25\ ^oC$ ، فإذا علمت أن الحرارة النوعية للماء $4.18\ kJ/(kg.\ K)$ وللثلج نصف قيمة الماء، الحرارة الكامنة للتجمد $350\ kJ/kg$ ، أحسب الآتى :

١- حمل التبريد بوحدة $T.R$ مع اعتبار $10\ \%$ معامل أمان.

٢- القدرة المطلوبة للضاغط إذا كانت الكفاءة الميكانيكية $85\ \%$ والكفاءة الكهربية $90\ \%$.

٣- الحمل الحرارى للمكثف.

٤- معامل الأداء والكفاءة النسبية.

١٠- وحدة مبرد مياه تنتج مياه مثلجة بمعدل $250\ lit/hr$ عند درجة حرارة $10\ ^oC$ من مياه عند درجة حرارة $30\ ^oC$، إذا كانت المفاقيد الحرارية للوحدة تعادل $15\ \%$ من حمل التبريد. إذا علمت أن فروق درجات الحرارة لانتقال الحرارة هى $\Delta t = 5 \sim 8\ ^oC$ ، أقترح دورة تبريد بسيطة تستخدم وسيط تبريد $R\text{-}12$ ثم أحسب الآتى:

١- سعة المبخر بوحدة T.R.

٢- قدرة الضاغط.

٣- معامل الأداء للوحدة.