

استرجاع الحرارة الضائعة من المنشآت الحرارية باستخدام دارة التبريد الامتصاصية

محمد عمر بارودي

مهندس ميكانيك - قسم هندسة الميكانيك العام - جامعة دمشق.

الملخص

تشكل الضياعات الحرارية في العمليات الصناعية مع غازات الاحتراق نسبة كبيرة من الطاقة الضائعة والتي لا يمكن استرجاعها بالطرق التقليدية لانخفاض السوية الطاقية فيها حيث تتراوح درجات الحرارة فيها بين $250^{\circ}\text{C} - 70$. قمنا في هذا البحث بحساب دارة تبريد امتصاصية تستفيد من الحرارة الضائعة مع غازات الاحتراق لتغطية حمل التكييف لمنشأة حرارية، حيث تم التصميم بحالتين الأولى الانطلاق بالحساب من حمل التكييف المطلوب للمنشأة، أما الحالة الثانية الانطلاق بالحساب من الطاقة الحرارية الممكن استرجاعها من غازات الاحتراق، حيث يساهم استخدام دارة التبريد الامتصاصية لتغطية حمل التكييف للمنشأة بزيادة فعاليتها من ناحية تقليل الانبعاثات الغازية وتقليل الأحمال الكهربائية لأغراض تكييف الهواء. تبين من خلال الدراسة أنه لمنشأة باستطاعة تبريدية 100 kW يمكن استرجاع حرارة من غازات الاحتراق وتوفير ما يقارب ثلاثين مليون ليرة سنوياً فيما لو أردنا توليد هذه الطاقة بالطرق التقليدية وبالتالي تخفيض انبعاثات غازات CO2 بما يقارب 32 طن سنوياً، كما تمت دراسة تأثير شروط العمل من درجة حرارة الوسط الخارجي وحمل المنشأة وتدفق الغازات ودرجة حرارة خروجها ودرجاتي حرارة التكاثر والتبخير لمحلول الأمونيا - ماء على كل من مقدار الانبعاثات الغازية وحمل المولد وحمل المكثف وحمل المبخر واستطاعة المضخة وذلك من أجل تحديد كافة البارامترات المؤثرة على عمل نظام استرجاع الحرارة وبالتالي تحديد شروط العمل المثلى.

تاريخ الإيداع: 2022/8/16

تاريخ القبول: 2023/1/17



حقوق النشر: جامعة دمشق - سورية،

يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب

الترخيص CC BY-NC-SA 04

الكلمات المفتاحية: دارة تبريد امتصاصية، استرجاع حرارة، تكييف الهواء.

Recovery of Waste Heat from Thermal Installations Using an Absorption Cooling Cycle

Mhd.Omar albarodi

Mechanical Engineer, Department of General Mechanics, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Damascus University.

ABSTRACT

Heat losses in industrial processes with combustion gases constitute a large proportion of wasted energy, which cannot be recovered by traditional methods of low energy level, where temperatures range between 70-250 °C. In this research, Calculating an absorption refrigeration circuit that takes advantage of the waste heat with the combustion gases to cover the air-conditioning load, as the design was designed in two cases, the first of which is to start by calculating from the air-conditioning load required for a facility, and in the second case to start by calculating the heat energy that can be recovered from the combustion gases, where the use of the absorption refrigeration circuit is positively reflected Thermal installations in terms of increasing the efficiency of the boilers - reducing gas emissions - reducing electrical loads for air conditioning purposes. It was found through the study that for a facility with a cooling capacity of 100 kW, it is possible to recover heat from the combustion gases and save about thirty million pounds annually if we wanted to generate this energy from a steam power plant and thus reduce CO₂ emissions by approximately 32 tons annually. The possibility of using this energy was studied To cover part of the cooling load of the facility, which is equal to 100kW through the absorption cooling circuit working on ammonia-water solution, the effect of working conditions from the temperature of the external medium, the load of the facility, the flow of gases, the exit temperature, and the condensation and evaporation temperatures of the ammonia-water solution was studied on each From the amount of gaseous emissions - generator load - condenser load - evaporator load - pump capacity - in order to determine all parameters affecting the work of the heat recovery system and thus determine the optimal working conditions.

Key Words: Absorption Cooling Circuit, Heat Recovery, Air Conditioning.

Received: 16/8/2022

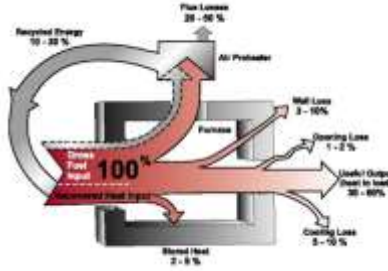
Accepted: 17/1/2023



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright

under a CC BY- NC-SA

1. مقدمة:



الشكل (2) الميزان الطاقي لأحد الأفران [1]

وقد ظهرت العديد من الجهود لرفع كفاءة القطاع الصناعي من خلال استرجاع هذه الحرارة الضائعة وإعادة استخدامها من جديد في كافة القطاعات الصناعية [2]، وتكمن فائدة استرجاع الطاقة الحرارية المهدرة في توفير استهلاك الوقود المطلوب في العمليات الإنتاجية المختلفة وبالتالي تحقيق فائدة اقتصادية، وفائدة بيئية تتمثل في تقليل التلوث الناجم عن انبعاث غازات العادم، إضافة لإمكانية الاستغناء عن بعض التجهيزات ضمن العمليات الصناعية.

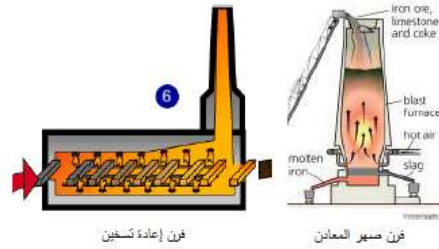
تتم عمليات الاسترجاع الحراري بعدة طرق ولأغراض متنوعة، حيث يمكن أن يُستفاد من الطاقة بنفس العملية الإنتاجية أو بعمليات أخرى، على سبيل المثال يمكن الاستفادة من الطاقة الحرارية المحمولة مع غازات العادم في مراحل تسخين المياه للقيام بعملية تسخين أولي لمياه التغذية أو لتسخين هواء فرن التجفيف.

تكمن المشكلة أن نسبة كبيرة من هذه الحرارة الضائعة تكون ذات درجات حرارة منخفضة وبالتالي من الصعب استرجاعها لذا كان لا بد من استخدام طرق تناسب هذه القيم المنخفضة.

من أهم أساليب استرجاع الحرارة الضائعة [3]:

1. دورة رانكين العضوية التي تستفيد من الحرارة المسترجعة لتوليد الطاقة الكهربائية.
2. آلات التبريد الامتصاصية التي تستخدم المصادر الحرارية للحصول على الأثر التبريدي.

تعتبر الأفران الصناعية أحد أكبر مستهلكات الطاقة في الصناعة (مثل صناعة الزجاج، الإسمنت، الصناعات المعدنية والكيميائية، والسيراميك....) حيث تستهلك ثلث الإنتاج الطاقي من خلال تحويل الوقود الكيميائي داخل الفرن أو ما يسمى بحجرة الاحتراق إلى طاقة حرارية. للأفران أنواع كثيرة تختلف بتركيبها وطريقة عملها، مثل أفران صهر الحديد والتي تتغذى بخامات المعدن والفحم من الأعلى بينما يدخل هواء الاحتراق من وسط الفرن، بينما في أفران إعادة التسخين تتحرك قضبان الحديد على سير نقال خلال حجرة الاحتراق ويبين الشكل (1) نماذج للأفران.



الشكل (1) أمثلة عن الأفران الصناعية [1]

تعمل الأفران الصناعية عادةً بدرجات حرارة مرتفعة كما هو مبين في الجدول (1) وكلما زادت درجة حرارة العمل تزداد درجة حرارة غازات العادم وبالتالي تزداد احتمالية حدوث ضياعات حرارية. وقد أظهرت الدراسات الأخيرة أن كفاءة الأفران الصناعية تكون عادة من 20% إلى 40% وهذا يعني أن 60% من الطاقة المستهلكة في هذا القطاع يطرح إلى الوسط الخارجي كحرارة ضائعة، ويبين الشكل (2) الميزان الطاقي لأحد الأفران.

الجدول (1) درجات الحرارة التي تعمل بها بعض أنواع الأفران الصناعية [1]

نوع الفرن	درجة الحرارة داخل الفرن
أفران الزجاج	1000 – 1300 °C
أفران السيراميك	700 – 1000 °C
أفران الإسمنت	650 – 700 °C
أفران حرق النفايات	650 – 1000 °C

التبريد الامتصاصية.

تعود بداية فكرة استخدام آلة التبريد الامتصاصية إلى القرن الثامن عشر الميلادي، حيث كان من المعروف أن الجليد يمكن أن ينتج عن طريق تبخر الماء النقي ضمن وعاء داخل حاوية مفرغة بوجود حمض الكبريت. عام 1810 أمكن صنع الثلج من الماء في وعاء متصل بوعاء آخر يحتوي على حمض الكبريت، عند امتصاص الحمض لبخار الماء تنخفض درجة الحرارة، مشكلة طبقات من الجليد على سطح الماء، المشكلة الرئيسية لهذا النظام هي التآكل وتسرب الهواء إلى وعاء التفرغ، في عام 1859 قدم Ferdinand Carre آلة جديدة تستخدم الماء/الأمونيا كوسيط تشغيل، وحصلت هذه الآلة على براءة اختراع أمريكية في عام 1860. واستخدمت الآلات القائمة على براءة الاختراع هذه لصنع الثلج وتخزين الطعام، وتم استخدامها لاحقاً كتصميم أساسي في العصر المبكر لتطور آلات التبريد [4].

نظراً لأن كل من الأمونيا والماء قابلين للتطاير فإن الدورة تتطلب مقطر لإزالة الماء الذي يتبخر عادةً مع الأمونيا، بدون المقطر سيتراكم الماء في المبخر ويقلل من أداء النظام، هناك عيوب أخرى لمحلول أمونيا - ماء مثل ضغطه العالي والسمية كما أنه يسبب تآكل النحاس وخلائط النحاس، ومع ذلك فإن محلول أمونيا - ماء صديق للبيئة ومنخفض التكلفة، ويمكن الحصول على الخصائص الترموديناميكية للمحلول من [9 ÷ 5].

بدأ استخدام محلول LiBr/water لأنظمة التبريد الامتصاصية حوالي عام 1930 [10]. لهذا المحلول ميزتان وهما أن المادة الماصة بروميد الليثيوم غير قابلة للتطاير وبالتالي لا حاجة لاستخدام مقطر، والثانية حرارة التبخر العالية للماء المستخدم كوسيط تبريد. مع ذلك فإن استخدام الماء كوسيط تبريد يحد من درجة الحرارة الدنيا الممكن الوصول إليها التي يجب أن تكون أعلى من 0°C، ونظراً لاستخدام الماء أيضاً فإن النظام يجب أن يعمل عند ضغوط أقل من

3. تسخين المياه أو الهواء ضمن المنشآت الصناعية (كمعامل السيراميك) كمحطات توليد الطاقة ومعامل تكرير النفط واستخدامها ضمن مراحل الإنتاج (المسخنات الاسترجاعية)، أو لأغراض الاستخدام العام (كالمشافي) كماء ساخن. وهي موضحة في الشكل (3).



الشكل (3) أساليب استرجاع الحرارة [3]

2. أهمية البحث:

نتيجة تزايد النمو السكاني والتطور الصناعي والتكنولوجي وتزايد الطلب على الطاقة وتسارعه بوتيرة عالية إضافة إلى أزمة الوقود الرهانة وزيادة الاستهلاك الكهربائي كان لا بد من البحث عن حلول لخفض كمية الطاقة المستهلكة للحدود الدنيا ورفع كفاءة التجهيزات فكان لدارة التبريد الامتصاصية دور هام وبارز في تحقيق كل مما يلي:

- ✓ قابلية استخدامها لاسترجاع الحرارة من المصادر ذات درجات الحرارة المنخفضة.
- ✓ إمكانية استخدامها لأغراض تكييف الهواء.

4. هدف البحث:

سنقوم في هذا البحث بإجراء دراسة نظرية عن عملية استرجاع الحرارة من مداخل المنشآت الصناعية واستثمار هذه الحرارة ضمن آلة التبريد الامتصاصية ودراسة تأثير بارامترات التشغيل على أداء هذه الدارة لاختيار شروط العمل المناسبة.

5. دراسة مرجعية لآلات التبريد الامتصاصية:

يمكن الاستفادة من الطاقة الحرارية الضائعة وتحويلها إلى طاقة حرارية مفيدة عن طريق استخدام ما يعرف بـ آلات

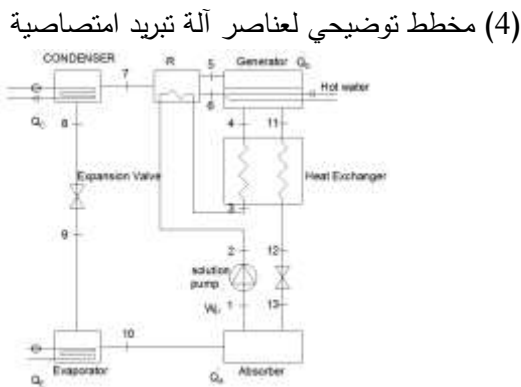
6. مفهوم التبريد وتكييف الهواء باستخدام آلات

التبريد الامتصاصية:

يقصد بعملية التبريد إزالة الحرارة من وسط ما بحيث تبقى درجة حرارته أقل من درجة حرارة الوسط المحيط به. تزيد تجهيزات التكييف كلاً من احتياجات الطاقة وأحجام الاستثمارات وكلف الصيانة ويهدف تخطيط الأبنية الحديثة إلى تقليل احتياجات الطاقة قدر الإمكان، لذا فإنه من الضروري في كثير من الحالات استخدام الأنظمة الفعالة لتنظيم درجة الحرارة.

تمتاز آلات التبريد الامتصاصية بالمقارنة بالآلات التبريد الانضغاطية بأنها لا تحتاج إلى استنطاعة كهربائية عالية، أما سلبيتها تكمن بانخفاض معامل أدائها مقارنة مع آلات التبريد الانضغاطية.

الأجزاء الرئيسية لدارة التبريد الامتصاصية: يبين الشكل



الشكل (4) مخطط توضيحي لعناصر آلة تبريد امتصاصية

1- **وعاء الفصل (المولد):** ويتم فيه فصل بخار عنصر التبريد عن المحلول السائل حرارياً، بالاعتماد على فرق درجات حرارة الغليان لمكونات المحلول النقية عند نفس الضغط، المصدر الحراري المستخدم للفصل في هذا البحث هو الحرارة المسترجعة من غازات الاحتراق.

الضغط الجوي، وعند تراكيز عالية يكون المحلول عرضة للتبلور.

الميزة الأساسية لآلة التبريد الامتصاصية أنها تتطلب للعمل فقط مصدراً للطاقة الحرارية ولا تحتاج إلى استنطاعة كهربائية عالية.

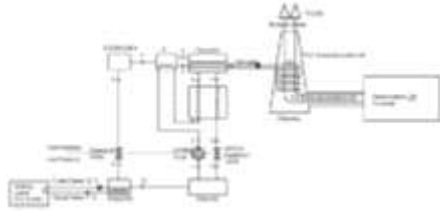
اختلفت المصادر الحرارية المستخدمة لآلة التبريد الامتصاصية، من أهم هذه المصادر الطاقات المتجددة وفي مقدمتها الطاقة الشمسية [11 - 12] ولهذا الموضوع أهمية كبيرة كونها طاقة مجانية ودائمة وتؤمن حل بديل للطاقة الإحفورية، أو الحرارة المسترجعة من مصادر مختلفة والذي يساهم في تخفيض الانبعاثات الغازية.

أجري في البحث [13] دراسة تجريبية لتشغيل آلة تبريد امتصاصية تستخدم الطاقة الحرارية لغازات الاحتراق من محرك احتراق داخلي تعمل على المحلول أمونيا - ماء وذلك من أجل عدة فتحات لصمام الخنق الخاص بالمحرك وتأثير ذلك على عمل آلة التبريد الامتصاصية، حيث تم الوصول إلى درجة حرارة ضمن البراد تتراوح بين $4 - 13^{\circ}\text{C}$ ، وذلك تبعاً لفتحة الصمام.

أجرى [14] دراسة لأنظمة تبريد امتصاصية تعمل على الطاقة الحرارية المسترجعة من محركات السفن الضخمة، وذلك عند درجة حرارة خارجية ($30 - 40^{\circ}\text{C}$) وقيم مختلفة لدرجة حرارة كل من المولد والمبخر باستخدام المحلولين ماء - بروميد الليثيوم، والأمونيا - ماء وذلك عند حمل تبريد مساوٍ لـ 150 kW لتحديد مجال العمل الأمثل. تبين من خلال الدراسة أن استخدام محلول ماء - بروميد الليثيوم أكثر كفاءة لأغراض التكييف، وكانت الكمية المقدرة للتوفير بالوقود مساوية لـ 46.8 طن وتصل إلى 95 طن عند درجة حرارة 40°C .

2. تبريد وسيط التبريد ضمن آلة الدارة الامتصاصية.
3. تبادل حراري بين وسيط التبريد والماء ضمن مبخر آلة التبريد الامتصاصية.

يبين الشكل (4) دارة آلة التبريد الامتصاصية مع كافة العناصر المستخدمة حيث تتم العمليات بحالة دارة أمونيا - ماء /الشكل (6) وفق التسلسل التالي:



الشكل (5) دارة التكييف باستخدام آلة التبريد الامتصاصية

يدخل بخار وسيط التبريد المحمص الخارج من المولد (النقطة 5) إلى المقطر ومنه إلى المكثف (النقطة 7) حيث يتكاثف معطياً حرارة Q_C لمياه التبريد (بحالة استخدام مكثف مائي مع برج تبريد) أو للهواء (بحالة استخدام مكثف هوائي)، يدخل السائل المتكاثف إلى صمام التمدد (النقطة 8) ومنه إلى مبخر آلة التبريد الامتصاصية (النقطة 9) حيث يتبخر سائل وسيط التبريد لإنتاج التأثير التبريدي Q_E ، ثم يذهب البخار إلى وعاء الامتصاص (النقطة 10) حيث يمتص بواسطة المحلول الفقير القادم من المولد وينتج عن ذلك طاقة حرارية Q_A ، أخيراً يتم ضخ المحلول الغني (النقطة 1) عبر مضخة (النقطة 2)، ثم يدخل عبر المقطر (النقطة 3) ثم إلى مبادل حراري حيث يسخن أولاً (النقطة 4) ومنه إلى المولد (وعاء الفصل) حيث يتم تسخين المحلول في المولد لتبخير سائل وسيط التبريد وفصله عن المحلول عن طريق تقديم الطاقة الحرارية المسترجعة من غازات الاحتراق Q_D ، المادة الماصة الفقيرة بوسيط التبريد تدخل إلى مبادل حراري (النقطة 12) ثم عبر صمام تمدد (النقطة 13) وتعود إلى وعاء الامتصاص. تختلف دارة بروميد الليثيوم - ماء (الشكل 6) بعدم الحاجة لاستخدام المقطر.

2- **المقطر:** يقوم بتفقيع البخار الخارج من وعاء الفصل باتجاه المكثف لكي نضمن دخول عنصر التبريد بدرجة نقاوة عالية إلى المبخر.

3- **وعاء الامتصاص:** تحدث فيه عملية امتصاص بخار الأمونيا القادم من المبخر من قبل المحلول الفقير القادم من وعاء الفصل عند ضغط ثابت مساو لضغط التبخر وتكون عملية الامتصاص هذه ناشرة للحرارة والتي يجب إزالتها إلى الوسط المحيط عن طريق الهواء أو الماء.

4- **المكثف:** يتم فيه تحويل بخار وسيط التبريد القادم من وعاء الفصل إلى سائل يتجه إلى المبخر عبر صمام التمدد.

5- **صمام التمدد:** يقوم بتخفيض ضغط سائل وسيط التبريد القادم من ضغط التكاثف إلى ضغط التبخر مما يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة وسيط التبريد إلى درجة حرارة التبخر أيضاً.

6- **المبخر:** في المبخر يتم الحصول على الأثر التبريدي المطلوب من خلال إزالة عنصر التبريد حرارة الوسط المراد تبريده.

7- **المبادل الحراري للمحلول:** يقوم باسترجاع الحرارة من السائل الفقير الخارج من وعاء الفصل وإعطائها للسائل الغني الداخل إلى وعاء الفصل.

8- **المضخة:** مهمتها رفع الضغط للسائل الغني بعنصر التبريد من ضغط التبخر إلى ضغط التكاثف.

مبدأ عمل آلة التبريد الامتصاصية:

سنستخدم في دراستنا الدورة الامتصاصية العاملة إما على الثنائي Ammonia-H₂O حيث /Ammonia/ الأمونيا هو وسيط التبريد و /H₂O/ الماء هو المادة الماصة أو على الثنائي H₂O - LiBr حيث /H₂O/ الماء كوسيط تبريد و /LiBr/ بروميد الليثيوم كمادة ماصة.

تتم عملية التكييف وفق ثلاث مراحل كما يبين الشكل (5):

1. تسخين المحلول ضمن مولد الدارة الامتصاصية.

سلبية هذه الطريقة أن الحمل التبريدي الممكن الحصول عليه قد يكون أقل من حمل المنشأة وبالتالي نحتاج لمصدر تبريد مساعد إضافي. أما ميزتها تكمن في استثمار كامل الطاقة المتاحة مع غازات الاحتراق.

أولاً - حساب نظام استرجاع حرارة للتبريد الامتصاصي انطلاقاً من الحمل التبريدي للمنشأة [15,16]:

لا بد للانطلاق بعملية الحساب من اعتماد بعض الشروط التصميمية:

1. تحديد درجة حرارة تبخر وتكثف وسيط التبريد ضمن الدارة:

باعتبار أن المبخر مائي فإن درجة حرارة التبخر تؤخذ :

$$t_o = t_{win} - (2 \div 5) \quad (1)$$

باعتبار أن المكثف هوائي فإن درجة حرارة التكثف تؤخذ مساوية لـ:

$$t_c = t_{a,out} + (7 \div 11) \quad (2)$$

في حال كان المكثف مائي واستخدم برج تبريد فإن درجة حرارة التكثف تؤخذ مساوية لـ:

$$t_c = t_{wet} + (5 \div 8) \quad (3)$$

ودرجة حرارة المولد: $t_D = 80 [^{\circ}C]$

أما درجة حرارة وعاء الفصل $A = 30 [^{\circ}C]$

t_{win} درجة حرارة دخول ماء التبريد إلى المبادل الحراري المستخدم للتبريد ضمن المنشأة.

$t_{a,out}$: درجة حرارة الوسط الخارجي.

t_{wet} : درجة الحرارة الخارجية الرطبة.

عند هذه الشروط نحدد الضغط الأعظمي P_o والضغط الأصغري P_c ضمن الدارة ويكون:

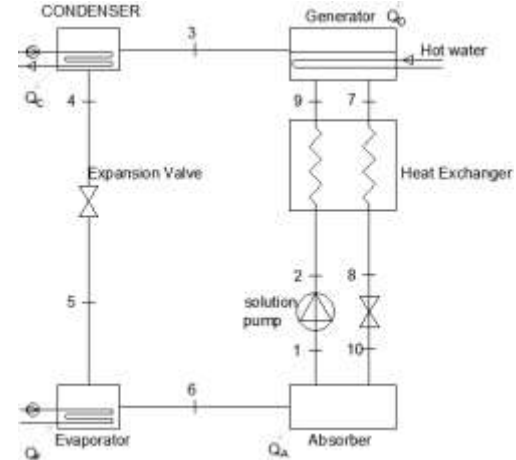
$$P_o = P_9 = P_{10} = P_1 = P_{13}$$

$$P_c = P_2 = P_3 = P_4 = P_{11} = P_{12} = P_7 = P_8$$

نفرض أن تركيز الأمونيا الخارج من المقطر $0.999 \div$

$$z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z_5 = z_6 = 0.998 \cdot 0.997$$

2. انطلاقاً من الحمل التبريدي للمنشأة وبفرض أن درجة حرارة دخول وخروج ماء التبريد مساوٍ لـ $12 \div 7$ على



الشكل (6) آلة التبريد الامتصاصية العاملة على بروميد

الليثيوم - ماء

8. الحالات المدروسة لتصميم دارة التبريد

الامتصاصية مع نظام استرجاع الحرارة:

نميز من أجل عملية الحساب والتصميم الحالتين التاليتين:
الحالة الأولى: الانطلاق بالحساب من الاستطاعة التبريدية المطلوبة للمنشأة.

المعلوم في هذه الحالة هو حمل المنشأة التبريدية Q_E والذي يساوي حمل مبخر آلة التبريد الامتصاصية، ويتم من خلاله تحديد تدفق وسيط التبريد ضمن مبخر آلة التبريد الامتصاصية وصولاً لحساب كمية الحرارة المطلوبة لوعاء الفصل Q_D والذي يساوي كمية الحرارة المسترجعة والتي سيتم تأمينها عن طريق حرارة غازات الاحتراق.

الحالة الثانية: الانطلاق بالحساب من الحرارة الممكن استرجاعها من غازات الاحتراق.

المعلوم في هذه الحالة هو كمية الحرارة الممكن استرجاعها من غازات الاحتراق والتي تساوي الحمل الحراري لوعاء الفصل Q_D ويتم من خلاله تحديد تدفق المحلول ضمن وعاء الفصل ويتم الحساب وصولاً لحساب استطاعة مبخر آلة التبريد الامتصاصية Q_E وتحديد الحمل التبريدي الممكن تغطيته.

النقطة 11: يتم إيجادها بدلالة ضغط التكاثف ودرجة حرارة المولد وهي عبارة عن سائل مشبع.

لإيجاد تنمة النقاط لا بد من إجراء موازنة حرارية وكتلية لكل من المقطر والمبادل الحراري للمحلول ضمن الدارة ويتم ذلك من خلال الخطوات التالية:

نحسب تدفق وسيط التبريد ضمن مبخّر آلة التبريد الامتصاصية وفق العلاقة:

$$m_9 = Q_E / h_{10} - h_9 \quad (5)$$

وهو ثابت ضمن دارة التبريد ولكافة النقاط (7,8,10).

نكتب معادلة الموازنة الكتلية للمقطر والمولد:

$$m_5 = m_7 + m_6 \quad (6)$$

$$m_4 + m_6 = m_5 + m_{11} \quad (7)$$

بالتعويض

$$m_4 = m_7 + m_{11} \quad (8)$$

$$m_4 \cdot x_4 = m_7 \cdot x_7 + m_{11} \cdot x_{11} \quad (8)$$

$$m_5 \cdot x_5 = m_7 \cdot x_7 + m_6 \cdot x_6 \quad (9)$$

بحل المعادلتين (7 و 8) يتم حساب تدفق النقاط 4 و

11:

$$m_4 = m_1 = m_2 = m_3 \quad \text{و} \quad m_{11} = m_{12} = m_{13}$$

بحل المعادلتين (6 و 8) يتم إيجاد تدفق النقاط 5 و 6.

نحسب الاستطاعة الحرارية للمقطر من العلاقة:

نوجد انتالبي النقطة 3 من معادلة التوازن الحراري للمقطر:

النقطة 3: يتم إيجادها بدلالة الانتالبي h_3 وضغط التكاثف

و تركيزها مساوٍ لتركيز النقطة 1.

لإيجاد انتالبي النقطة 12 نجري موازنة حرارية للمبادل

الحراري للمحلول كما يبين الشكل (8):

$$m_3(h_4 - h_3) = m_{11} \cdot (h_{11} - h_{12}) \quad (12)$$

التوالي فإن تدفق مياه التبريد ضمن دارة التبريد الثانوية يكون مساوٍ ل:

$$m_w = Q_E / C_{pw} (t_{w_{out}} - t_{w_{in}}) \quad (4)$$

Q_E : الحمل التبريدي للمنشأة. $t_{w_{out}}, t_{w_{in}}$: درجتي حرارة

دخول وخروج الماء على التوالي.

3. إيجاد نقاط الدارة:

يتم تحديد درجة حرارة غليان المحلول ضمن المولد t_{dew}

النقطة 7: يتم إيجادها بدلالة ضغط التكاثف ودرجة الحرارة

t_{dew} وتركيز الأمونيا.

النقطة 8: يتم إيجادها بدلالة ضغط التكاثف وتركيز

الأمونيا وهي عبارة عن سائل مشبع.

النقطة 9: يؤخذ انتالبي النقطة 9 مساوٍ لانتالبي النقطة 8

ثم يتم إيجادها بدلالة ضغط التبخر وتركيز الأمونيا.

النقطة 10: يتم إيجادها بدلالة ضغط التبخر وتركيز

الأمونيا وهي عبارة عن بخار مشبع جاف.

النقطة 1: يتم إيجادها بدلالة ضغط التبخر ودرجة الحرارة

t_A وهي عبارة عن سائل مشبع.

النقطة 2: باعتبار أن المضخة ايزوانتروبية يؤخذ

$S_2 = S_1$ ويتم إيجاد النقطة 2 بدلالة ضغط التكاثف وتركيز

المحلول مساوٍ لتركيز المحلول للنقطة 1.

يتم تحديد t_b درجة حرارة غليان ضمن وعاء الفصل ويتم

اختيار t_4 بحيث لا يحدث غليان قبل وعاء الفصل.

النقطة 4: يتم تحديدها بدلالة ضغط التكاثف ودرجة

الحرارة t_4 وتركيز المحلول مساوٍ لتركيز المحلول للنقطة

$$t_4 = t_b - 1:1$$

النقطة 5: يتم إيجادها بدلالة ضغط التكاثف ودرجة حرارة

المولد وهي عبارة عن بخار مشبع جاف.

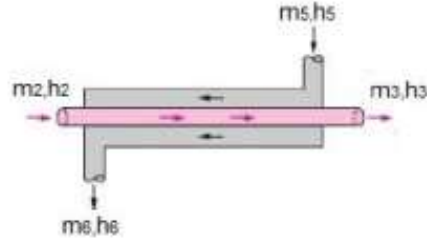
النقطة 6: يتم إيجادها بدلالة ضغط التكاثف ودرجة الحرارة

t_{dew} وهي عبارة عن سائل مشبع.

6. حساب معامل أداء الدارة:

النقطة 12: يتم إيجادها بدلالة الانتالبي h_{12} وضغط

التكاثف وتركيزها مساوٍ لتركيز النقطة 11.



الشكل (7) توضيحي للمبادل الحراري البيني

النقطة 13: يتم إيجادها بدلالة الانتالبي h_{12} وضغط

التبخير وتركيزها مساوٍ لتركيز النقطة 11.

4. حساب استطاعة كل من وعاء الفصل - وعاء

الامتصاص - المكثف - المضخة:

وعاء الفصل:

$$Q_D = m_{11} \cdot h_{11} + m_5 \cdot h_5 - m_4 \cdot h_4 + m_6 \cdot h_6 \quad (13)$$

وعاء الامتصاص:

$$Q_A = m_{13} \cdot h_{13} + m_{10} \cdot h_{10} - m_1 \cdot h_1 \quad (14)$$

المكثف:

$$Q_C = m_7 \cdot (h_7 - h_8) \quad (15)$$

المضخة:

$$W_P = m_1 \cdot (h_2 - h_1) \quad (16)$$

5. حساب معامل التدوير: وقيمته تعني كمية المحلول

التي يجب ضخها إلى وعاء الفصل للحصول على 1 kg من

بخار عنصر التبريد، وبارتفاع هذه القيمة يزداد العبء على

المضخة، وتصبح الاستطاعة المطلوبة للمضخة أكبر.

7. تؤخذ استطاعة المبادل الحراري ضمن المدخنة مساوية لاستطاعة وعاء الفصل وبالتالي تحسب درجة حرارة خروج الغازات من المدخنة باستخدام العلاقة:

في حال كانت درجة حرارة خروج الغازات أقل من درجة حرارة نقطة الندى لغازات الاحتراق فيجب إعادة الحساب بتقليل الحمل التبريدي للمنشأة. يبين الشكل (8) تسلسل العمليات الحسابية:



الشكل (8) تسلسل عمليات الحساب انطلاقاً من الحمل التبريدي

للمنشأة

ثانياً - حساب نظام استرجاع حرارة للتبريد الامتصاصي

انطلاقاً من كمية الحرارة المسترجعة:

1. انطلاقاً من حرارة غازات الاحتراق ويفرض أن درجة

حرارة خروج الغازات تساوي 150°C (درجة حرارة تشكل أكاسيد

الكبريت) يكون حمل المبادل ضمن المدخنة:

$$Q_g = m_g \cdot C_g \cdot (T_{g_{in}} - T_{g_{out}}) \quad (17) \quad (20) \\ = m_{total} / m_1$$

$\left. \begin{array}{l} q = 0 \\ x_8 = 0.998 \\ P_c = 11.65 \text{ bar} \\ \rightarrow h_8 = 140.2 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\}$	النقطة 8
$\left. \begin{array}{l} h_8 = h_9 \\ x_8 = 0.998 \\ P_o = 5.148 \text{ bar} \\ \rightarrow t_9 = 5.2 \text{ [}^\circ\text{C]} \end{array} \right\}$	النقطة 9
$\left. \begin{array}{l} T_{10} = T_o = 5 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ x_{10} = 0.998 \\ P_o = 5.148 \text{ bar} \\ \rightarrow h_{10} = 1336 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\}$	النقطة 10
$\left. \begin{array}{l} T_{11} = T_D = 85 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ q_{11} = 0 \\ P_c = 11.65 \text{ bar} \\ h_{11} = 147.6 \text{ kJ/kg} \\ \rightarrow x_{11} = 0.4183 \end{array} \right\}$	النقطة 11
$\left. \begin{array}{l} T_5 = T_D = 85 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ q_5 = 1 \\ P_c = 11.65 \text{ bar} \\ h_5 = 1471 \text{ kJ/kg} \\ \rightarrow x_5 = 0.974 \end{array} \right\}$	النقطة 5
$\left. \begin{array}{l} T_6 = t_{dew} = 49.7 \\ P_c = 11.65 \text{ bar} \\ q_6 = 0 \\ x_6 = 0.6467 \\ \rightarrow h_6 = 13.52 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\}$	النقطة 6
$\left. \begin{array}{l} T_1 = t_A \\ P_1 = P_o = 5.148 \text{ bar} \\ q_1 = 0 \\ x_1 = 0.5757 \\ \rightarrow h_1 = -97.48 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\}$	النقطة 1
$\left. \begin{array}{l} x_1 = x_2 \\ P_1 = P_c \\ S_1 = S_2 \\ \rightarrow h_2 = -96.66 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\}$	النقطة 2
$\left. \begin{array}{l} x_1 = x_4 \\ P_4 = P_c \\ T_4 = 59 - 1 = 58 \\ \rightarrow h_4 = 28.42 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\}$	النقطة 4
$m_7 = m_8 = m_9 = m_{10} = 0.08364 \text{ kg/s}$	تدفق النقطة 9
$m_4 = m_1 = m_2 = m_3 = 0.3076 \text{ kg/s}$	تدفق النقطة 4
$m_{11} = m_{12} = m_{13} = 0.2239 \text{ kg/s}$	تدفق النقطة 11
$m_5 = 0.08961 \text{ kg/s}$	تدفق النقطة 5
$m_6 = 0.005973 \text{ kg/s}$	تدفق النقطة 6
$Q_R = 18.95 \text{ kJ/kg}$	استطاعة المقطر
$h_3 = -35 \text{ kJ/kg}$	انتالي وبارامترات النقطة 3 من معادلة التوازن الحراري للمقطر:

2. تتماثل الخطوات 1 و 2 و 3.

3. إيجاد نقاط الدارة:

يتمثل حساب النقاط 1، 2، 3، 4، 5، 6، 7، 8، 10، 11، مع الحل السابق باعتبارها تتعلق فقط بالشروط الخارجية وهي ثابتة للحالتين، أما النقاط التي يتطلب إيجادها موازنات حرارية فسوف تختلف نتيجة اختلاف تدفق وسيط التبريد المطلوب ضمن الدارة وهي النقاط 3، 12، 13.

4. يتم حساب تدفق النقاط بالحل المشترك لمعادلة التوازن الحراري لوعاء الفصل ومعادلتى التوازن الكتلي للمقطر والمبادل البيني، ثم يتم حساب انتالي باقي النقاط كما في السابق.

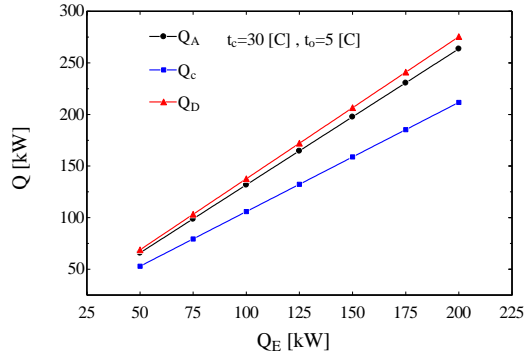
5. تحسب استطاعة وعاء الامتصاص - المكثف - المضخة - معامل التدوير ومعامل أداء الدارة كما في الحالة السابقة.

10. تصميم وحساب نظام تكييف امتصاصي عن طريق

استرجاع الحرارة الضائعة:

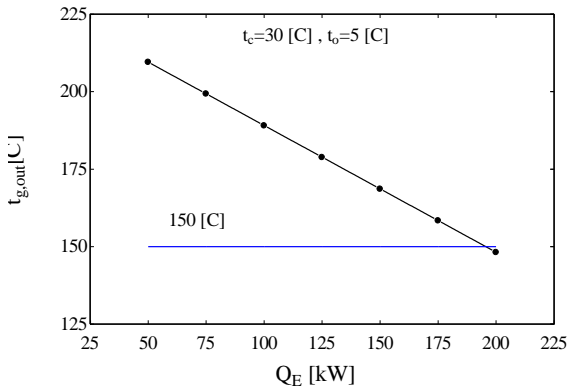
استخدمنا لإيجاد نقاط الدارة برنامج EES الذي يتضمن مكتبة لحساب خصائص كل من الأمونيا/ماء وبروميدي الليثيوم/ماء.

$Q_E = 100 \text{ kW}$	حمل المنشأة التبريدي
0.998	تركيز الأمونيا
$t_o = 5^\circ\text{C}$ $\rightarrow P_o = 5.148 \text{ bar}$	درجة حرارة وضغط التبخر
$t_c = 30^\circ\text{C}$ $\rightarrow P_c = 11.65 \text{ bar}$	درجة حرارة وضغط التكاثف
$t_D = 85 \text{ [}^\circ\text{C]}$	درجة حرارة المولد
$t_A = 30 \text{ [}^\circ\text{C]}$	درجة حرارة وعاء الامتصاص
$P_c = 11.65 \text{ bar}$ $x = 0.998$ $q = 1$ $\rightarrow t_{dew} = 49.7 \text{ [}^\circ\text{C]}$	dew
$T_7 = T_{dew} = 49.7 \text{ [}^\circ\text{C]}$ $x_7 = 0.998$ $P_c = 11.65 \text{ bar}$ $\rightarrow h_7 = 1348 \text{ kJ/kg}$	النقطة 7



الشكل (9) تأثير الاستطاعة التبريدية على الأحمال الحرارية

أما الشكل (10) فهو يوضح تغير درجة حرارة خروج الغازات مع زيادة الحمل التبريدي المطلوب للمنشأة، كما نلاحظ بزيادة الاستطاعة التبريدية فإن درجة حرارة خروج الغازات تنخفض وتقترب من درجة حرارة تشكل أكاسيد الكبريت (150°C)، وبالتالي يمكن من خلال المنحني تحديد درجة حرارة خروج الغازات من أجل استطاعة تبريدية محددة.



الشكل (10) تأثير الاستطاعة التبريدية على درجة حرارة خروج الغازات

تأثير درجة حرارة التكاثف: تزداد درجة حرارة تكاثف وسيط التبريد ضمن المكثف (سواء كان مائي أو هوائي) بزيادة درجة حرارة الوسط الخارجي الذي يؤثر بالتالي على أداء الدارة، وكما نلاحظ من الشكل (11) فإن زيادة درجة حرارة التكاثف تؤدي لزيادة الأحمال الحرارية لدارة التبريد الامتصاصية

$$\begin{array}{l} \text{درجة} \\ \text{حرارة وضغط} \\ \text{التبخّر} \\ t_o = 5^\circ\text{C} \\ \rightarrow P_o = 5.148 \text{ bar} \end{array}$$

$\left. \begin{array}{l} h_3 = -35 \text{ kJ/kg} \\ P_3 = P_c \\ x_3 = x_1 \\ \rightarrow t_3 = 43.7^\circ\text{C} \end{array} \right\}$	
من معادلة التوازن الحراري: $\left. \begin{array}{l} h_{12} = 60.45 \text{ kJ/kg} \\ h_{12} = 60.45 \text{ kJ/kg} \\ P_{12} = P_c \\ x_{12} = x_{11} \\ \rightarrow t_{12} = 65.8^\circ\text{C} \end{array} \right\}$	انتالي وبارامترات النقطة 12
من معادلة التوازن الحراري: $\left. \begin{array}{l} h_{13} = h_{12} = 60.45 \text{ kJ/kg} \\ h_{13} = 60.45 \text{ kJ/kg} \\ P_{13} = P_o \\ x_{13} = x_{11} \\ \rightarrow t_{13} = 57.3^\circ\text{C} \end{array} \right\}$	بارامترات النقطة 13
$Q_D = 156 \text{ kW}$	استطاعة وعاء الفصل
$Q_A = 155.2 \text{ kW}$	استطاعة وعاء الامتصاص
$Q_C = 101 \text{ kW}$	استطاعة المكثف
$w_p = 0.252 \text{ kW}$	استطاعة المضخة
$Q_{HX} = 18.95 \text{ kW}$	استطاعة المبادل البيني للمحلول
$COP = 0.64$	معامل أداء الدارة

عند نفس الشروط السابقة وبحالة استخدام بروميد الليثيوم

- ماء نحصل على الاستطاعات التالية:

$Q_C = 106 \text{ kW}$	$Q_D = 137.7 \text{ kW}$
$COP = 0.72$	$Q_A = 131.8 \text{ kW}$

11 - تأثير العوامل المختلفة على دراسة وتصميم الدارة

(بحالة بروميد الليثيوم - ماء):

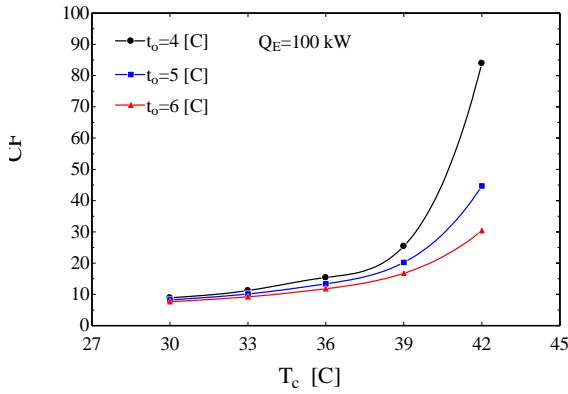
تأثير الاستطاعة التبريدية للمنشأة: يبين الشكل (9) تأثير الاستطاعة التبريدية للمنشأة Q_E على الأحمال الحرارية المختلفة للدارة الامتصاصية (وعاء الفصل - المكثف - المولد)، كما نلاحظ فإن زيادة الاستطاعة التبريدية تؤدي لزيادة كافة الأحمال الحرارية. وذلك عند الشروط التالية:

$$\begin{array}{l} t_o = 5^\circ\text{C} \\ \rightarrow P_o = 5.148 \text{ bar} \\ t_c = 30^\circ\text{C} \\ \rightarrow P_c = 11.65 \text{ bar} \\ t_D = 85 [^\circ\text{C}] \\ t_A = 30 [^\circ\text{C}] \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{درجة حرارة وضغط التبخّر} \\ \text{درجة حرارة وضغط التكاثف} \\ \text{درجة حرارة المولد} \\ \text{درجة حرارة وعاء الفصل} \end{array}$$

تبين الأشكال (13 ÷ 15) تأثير كل من درجتي حرارة التبخر والتكاثف على معامل التدوير ومعامل الأداء ودرجة حرارة

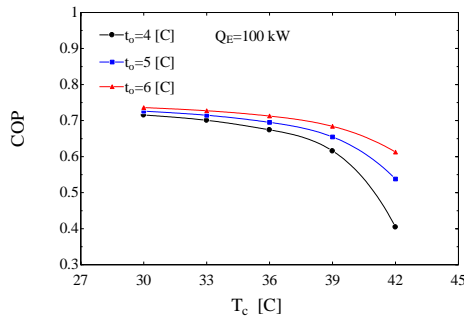
خروج غازات الاحتراق عند استطاعة تبريدية ثابتة.

تبين الدراسة أنه بزيادة درجة حرارة التكاثف فإن معامل أداء الدارة ينخفض ويزداد معامل التدوير وهذا يعني الحاجة إلى كمية أكبر من المحلول لتشغيل الدارة الامتصاصية وتنخفض درجة حرارة خروج الغازات ويفسر ذلك بازدياد الحمل المطلوب استرجاعه لتغطية الحمل التبريدي. وعند قيمة ثابتة لدرجة حرارة التكاثف نجد أنه بزيادة درجة حرارة التبخر يزداد معامل الأداء الحراري وتنخفض قيمة معامل التدوير.



الشكل (13) تأثير درجتي حرارة التكاثف والتبخر على معامل

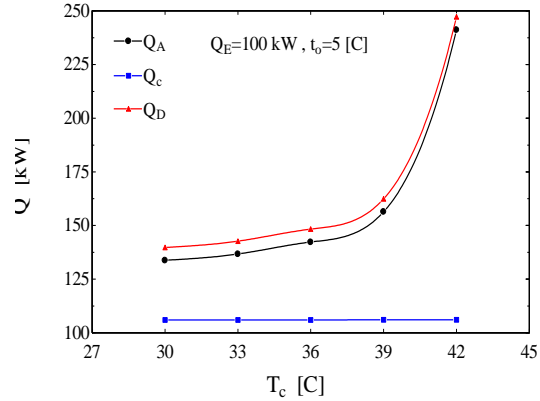
التدوير



الشكل (14) تأثير درجتي حرارة التكاثف والتبخر على معامل

الأداء

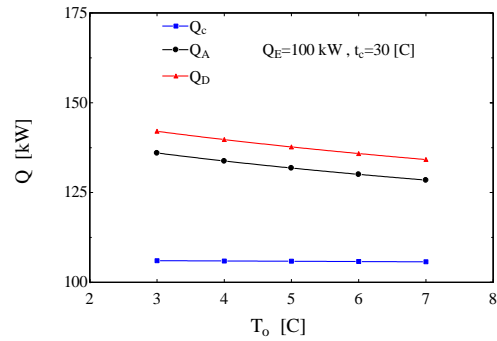
درجة حرارة المولد
 $t_D = 85 [^{\circ}\text{C}]$
درجة حرارة وعاء الفصل
 $t_A = 30 [^{\circ}\text{C}]$



الشكل (11) تأثير درجة حرارة التكاثف على الأحمال الحرارية

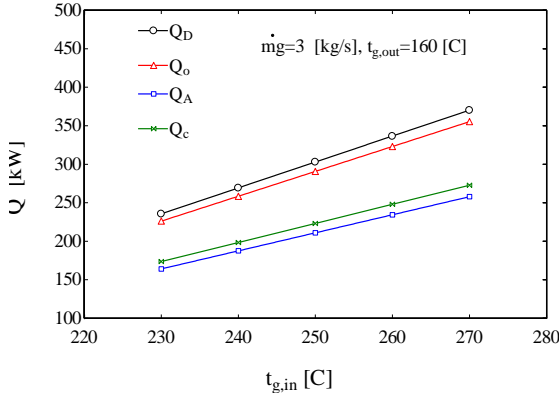
تأثير درجة حرارة التبخر يبين الشكل (12) تأثير درجة حرارة التبخر على الأحمال الحرارية للدارة كما نلاحظ بزيادة درجة حرارة التبخر فإن الأحمال الحرارية والتدفقات سوف تنخفض كما نجد من الشكل أن كتلة المادة الماصة تتناقص مع زيادة درجة حرارة التبخر حتى تثبت عند قيمة محددة وذلك عند درجة حرارة توليد عظمى ثابتة.

درجة حرارة وضغط التكاثف
 $t_c = 30^{\circ}\text{C}$
 $\rightarrow P_c = 11.65 \text{ bar}$
درجة حرارة المولد
 $t_D = 85 [^{\circ}\text{C}]$
درجة حرارة وعاء الفصل
 $t_A = 30 [^{\circ}\text{C}]$



الشكل (12) تأثير درجة حرارة التبخر على الأحمال الحرارية

الممكن الحصول عليه من الدارة إضافة لزيادة الأحمال ضمن دارة التبريد الامتصاصية.



الشكل (17) تأثير درجة حرارة دخول الغازات على الأحمال الحرارية

الأثر البيئي للتبريد الامتصاصي بالاستفادة من حرارة غازات الاحتراق:

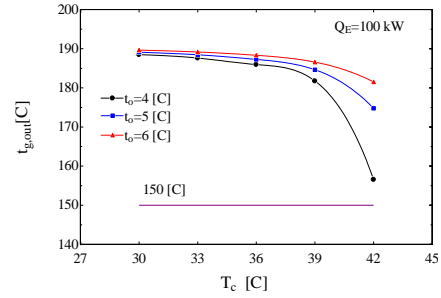
نظراً للاهتمام المتزايد في حماية البيئة من التلوث فقد أخذت دارة التبريد الامتصاصية اهتمام الباحثين وكذلك الشركات حيث تستخدم وسائط تبريد لا تضر بالبيئة فهي تحتاج إلى طاقة حرارية فقط ولا تتطلب مصادر طاقة أخرى. من ناحية أخرى فإن استخدام آلات التبريد الانضغاطية تستهلك كميات كبيرة من الكهرباء التي يتم توليدها عادةً من الوقود الأحفوري الملوث للبيئة.

لتحديد مدى فعالية استخدام الدارة الامتصاصية سنقوم بحساب كمية الوقود الأحفوري التي سيتم توفيرها وانبعثات غاز ثاني أكسيد الكربون التي سيتم منعها.

حتى نتمكن من الحصول على الطاقة الحرارية من خلال مرجل ذو كفاءة ($\eta_b = 80\%$) نحتاج إلى كمية من الوقود (المازوت) ذو قيمة حرارية دنيا تبلغ ($f = 41800 \text{ kJ/kg}$) تحسب الكمية المستهلكة خلال ساعة من الزمن والمبينة بالعلاقة التالية [18]:

$$G_f = 3600 \cdot Q_{fuel} / \eta_b \cdot H_f \quad [kg/h] \quad (32)$$

حيث:

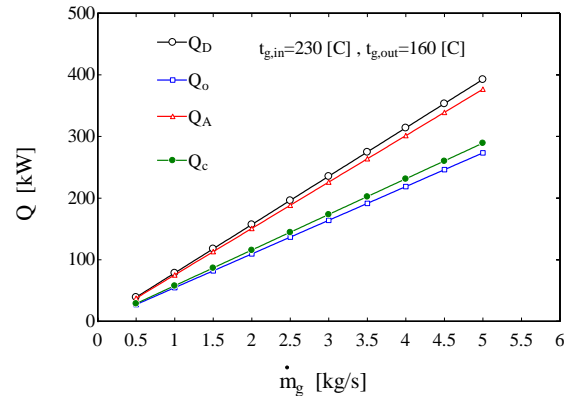


الشكل (15) تأثير درجتي حرارة التكايف والتبخير على درجة حرارة خروج الغازات

تأثير معدل تدفق الغازات: يبين الشكل (16) تأثير تدفق

الغازات ضمن المدخنة على كل من الأحمال الحرارية ضمن الدارة. كما نلاحظ فإن زيادة تدفق الغازات سيؤدي لزيادة الاستطاعة التبريدية الممكن الحصول عليها من الدارة الامتصاصية وبالتالي تزداد بقية الأحمال الحرارية ضمن دارة التبريد الامتصاصية.

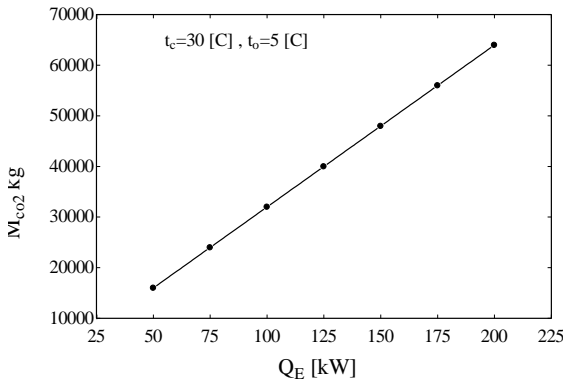
$t_o = 5^\circ\text{C}$	درجة حرارة وضغط التبخير
$\rightarrow P_o = 5.148 \text{ bar}$	
$t_c = 30^\circ\text{C}$	درجة حرارة وضغط التكايف
$\rightarrow P_c = 11.65 \text{ bar}$	
$t_D = 85 [^\circ\text{C}]$	درجة حرارة المولد
$t_A = 30 [^\circ\text{C}]$	درجة حرارة وعاء الفصل



الشكل (16) تأثير معدل تدفق الغازات على الأحمال الحرارية

يبين الشكل (17) تأثير درجة حرارة دخول الغازات ضمن المدخنة على كل من الأحمال الحرارية ضمن الدارة. كما نلاحظ فإن لدرجة حرارة دخول الغازات تأثير مشابه لزيادة معدل تدفق الغازات حيث تؤدي زيادتها إلى زيادة حمل التبريد

غاز ثاني أكسيد الكربون المنبعثة نحن نعلم أن إحراق كل 1 لتر من المازوت ينتج عنه $(2.6 \text{ kg}, \text{CO}_2)$ [18]، وبالتالي فإن توفير استهلاك كل $V_{fuel,y}$ ليتر من الوقود سيؤدي إلى وفر في انبعاثات يساوي إلى $2.6 M_{fuel,y}$. يبين الشكل (19) كمية الوفر في انبعاثات الغازات ونلاحظ أنه من أجل استطاعة تبريدية 100 kW نحصل على خفض في انبعاثات غاز (CO_2) تصل إلى (32 Ton) سنوياً ويزداد الوفر بزيادة الاستطاعة التبريدية.



الشكل (19) تأثير الاستطاعة التبريدية على الانبعاثات الغازية

نتائج الدراسة وأهم إسقاطاتها:

1. أظهرت الدراسة فعالية استخدام آلة التبريد الامتصاصية لأغراض تكييف الهواء حيث يمكن تغطية حمل 100 kW دون انخفاض درجة حرارة الغازات إلى ما دون نقطة تشكل أكاسيد الكبريت.
2. حقق محلول ماء - بروميد الليثيوم أداء أفضل لتكييف الهواء مقارنة بمحلول أمونيا ماء.
3. يمكن استخدام النموذج البرمجي لدارة التبريد الامتصاصية عند استخدام محلولي أمونيا/ماء أو ماء/بروميد الليثيوم لأغراض تكييف الهواء باستخدام الحرارة المسترجعة كمصدر حراري.
4. تؤدي زيادة الاستطاعة التبريدية إلى زيادة حمل كل من المكثف ووعاء الامتصاص والمولد وبالتالي كمية الحرارة المطلوب استرجاعها من غازات الاحتراق.

G_f : كمية الوقود المستهلكة kg/h

$$H_f = 41800 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right]$$

$$\eta_b = 0.8$$

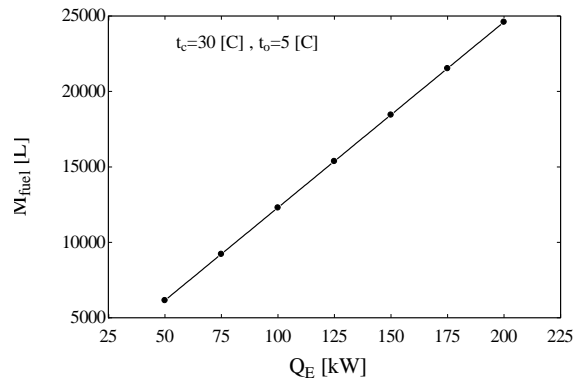
حيث $Q_{fuel} = Q_E$ الحرارة المقدمة للمولد للحصول على الاستطاعة التبريدية المطلوبة فيما لو تم الحصول عليها عن طريق حرق الوقود.

وبفرض أن تشغيل آلة التبريد يتم 8 ساعة يومياً خلال أربعة أشهر وكثافة المازوت (0.84 kg/L) وبالتالي يكون حجم الوقود المستهلك سنوياً وفق العلاقة التالية [18]:

$$V_{fuel,y} = G_f \cdot \frac{8 \times 4 \times 30}{0.84} \quad (33)$$

$$\approx 1143 \cdot M_{fuel,h} [L]$$

يبين الشكل (18) كمية الوقود الموفرة بتغيير الاستطاعة التبريدية. نجد مما سبق أن استخدام التبريد الامتصاصي من أجل استطاعة تبريدية 100 kW يوفر ما يقارب **12 ألف لتر** من الوقود سنوياً في حال تم استرجاع الحرارة من غازات الاحتراق بدلاً من أن يتم توليدها بالطرق الاعتيادية. بما أن سعر لتر الوقود (المازوت) 2500 ل.س ، فيكون الوفر السنوي ما يقارب **ثلاثين مليون ليرة سورية**.



الشكل (18) تأثير الاستطاعة التبريدية على كمية الوقود الموفرة

حساب مقدار التوفير من انبعاثات غاز CO_2 من الناحية البيئية فإن تخفيض استهلاك المازوت سيؤدي إلى انخفاض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، ولحساب مقدار الوفر في كمية

المسترجعة وبالتالي زيادة الاستطاعة التبريدية الممكن الحصول عليها من الدارة بالإضافة لزيادة الأحمال الحرارية لبقية عناصر الدارة الامتصاصية.

11. تؤدي زيادة درجة حرارة دخول الغازات عند تدفق محدد ودرجة حرارة خروج ثابتة للغازات إلى زيادة كمية الحرارة المسترجعة وبالتالي زيادة الاستطاعة التبريدية الممكن الحصول عليها من الدارة بالإضافة لزيادة الأحمال الحرارية لبقية عناصر الدارة الامتصاصية.

12. من أجل حمل تبريدي 100 kW فإن كمية الوقود الممكن توفيرها سنوياً عند استخدام آلة التبريد الامتصاصية تساوي 12 ألف لتر ما يعادل ثلاثين مليون ليرة سورية، وتزداد هذه الكمية بزيادة حمل التبريد.

13. من أجل حمل تبريدي 100 kW فإن كمية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الممكن تخفيضها سنوياً عند استخدام آلة التبريد الامتصاصية تساوي 32 طن وتزداد هذه الكمية بزيادة حمل التبريد.
التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

5. تؤدي زيادة كمية الحرارة المطلوب استرجاعها لتغطية الحمل التبريدي إلى انخفاض درجة حرارة خروج الغازات من المدخنة.

6. تؤدي زيادة درجة حرارة التكاثف لزيادة حمل كل من المكثف ووعاء الفصل والمولد بالتالي زيادة كمية الحرارة المطلوب استرجاعها من غازات الاحتراق.

7. تؤدي زيادة درجة حرارة التبخر إلى انخفاض الأحمال الحرارية لدارة التبريد الامتصاصية بالتالي تنخفض كمية الحرارة المطلوب استرجاعها من غازات الاحتراق.

8. تؤدي زيادة درجة حرارة التكاثف عند استطاعة تبريدية ثابتة إلى زيادة معامل التدوير للدارة وانخفاض معامل الأداء وبالتالي الحاجة إلى كمية أكبر من المحلول لتشغيل الدارة، بالإضافة إلى انخفاض درجة حرارة خروج الغازات من المدخنة.

9. عند درجة حرارة تكاثف ثابتة واستطاعة تبريدية محددة فإن زيادة درجة حرارة التبخر تؤدي لزيادة معامل الأداء الحراري للدارة وانخفاض قيمة معامل التدوير وارتفاع درجة حرارة خروج الغازات.

10. تؤدي زيادة معدل تدفق الغازات عند درجة حرارة دخول وخروج ثابتة للغازات إلى زيادة كمية الحرارة

المراجع References

1. Energy Efficiency in Thermal Utilities, Bureau of Energy Efficiency, 2005.
2. U.S. Department of Energy. (2008, March). Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry.
3. Sarah Brückner, Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies, Applied Energy 151 (2015) 157–167.
4. Herold KE, Radermacher L. Absorption heat pump, Mech. Eng., Aug, 1989;68–73.
5. Gosney WB. Principle of refrigeration. Cambridge Uni. Press, 1982.
6. El-Sayed YM, Tribus M. Thermodynamic properties of water-ammonia mixtures: theoretical implementation for use in power cycle analysis. ASME Pub AES 1985;1:89–95.
7. Ziegler B, Trepp C. Equation of state for ammonia-water mixtures. Int J Refrig 1984;7(2):101–6.
8. Herold KE, Han K, Moran MJ. AMMWAT: a computer program for calculating the thermodynamic properties of ammonia and water mixtures using a Gibbs free energy formulation. ASME Pub AES 1988;4:65–75.

9. Patek J, Klomfae J. Simple function for fast calculations of selected thermodynamic properties of ammonia-water system. Int J Refrig 1995;18(4):228–34.
10. Berestneff AA. Absorption refrigeration. Mech Eng 1949;72:216–20.
11. Alizadeh, S. "Multi-pressure absorption cycles in solar refrigeration: a technical and economical study" Solar Energy 69, (2000) 37 – 44
12. Chen, G." Hihara, E. „A new absorption refrigeration cycle using solar energy“ Solar Energy 66, (1999) 479 – 482.
13. André Aleixo Manzela, Using engine exhaust gas as energy source for an absorption refrigeration system, Applied Energy 87 (2010) 1141–1148.
14. Waltteri Salmi, Using waste heat of ship as energy source for an absorption refrigeration System, Applied Thermal Engineering 115 (2017) 501–516.

15. د. عيسى محمود، محاضرات التبريد المقاد حرارياً،.

16. د. عيسى محمود، أنظمة التسخين الشمسي، جامعة دمشق.

17. د. سعيد الجراح، التدفئة والتهوية الصناعية، منشورات جامعة دمشق.