

تحسين أداء دارة تبريد ادمصاصية باستخدام تقنيات الاسترجاع الحراري والكتلي

م. رانيا أوري⁽¹⁾ أ. د. م. وجيه ناعمة⁽²⁾

الملخص

يهدف هذا البحث إلى تحسين أداء دارة تبريد ادمصاصية باستخدام تقنيات استرجاع الحرارة والكتلة. ولإجراء هذه الدراسة تمّ حساب بارامترات التصميم الأساسية لآلة إنتاج جليد ادمصاصية تستخدم الكربون المنشط الليفي نوع BusofitATYM مع الأمونيا كزوج عامل، وتعمل على طاقة الضياعات الصناعية، وعند درجة حرارة تكاثف تصميمية 36°C ودرجة حرارة عظمى للسريير 85°C ودرجة حرارة دنيا 36°C .

وقد وُجد أنّ معامل الأداء في دورة التبريد الأساسية بدون استرجاع يساوي إلى 0.1937، وبإجراء عملية استرجاع حراري زادت قيمته إلى 0.308، وزادت إلى 0.385 نتيجة الاسترجاع الكتلي، وبتابع الاسترجاع الكتلي باسترجاع حراري أصبحت 0.504. وبالتالي تُعتبر تقنية الاسترجاع الكتلي ثمّ الحراري هي الأفضل من أجل الحصول على معامل الأداء الأعلى للدارة.

الكلمات المفتاحية:

ادمصاص Adsorption - فصل Desorption - المادة ادمصاصية Adsorbent - المادة المدمصة Adsorbate - سريير المادة ادمصاصية Adsorbent bed - الزوج العامل Working Pair - أمونيا Ammonia - الكربون المنشط الليفي Activated carbon fibers - دورة بدون استرجاع (R0) Cycle without Recovery - دورة مع استرجاع حراري (HR) Cycle with Heat Recovery - دورة مع استرجاع كتلي Cycle with Mass Recovery (MR) - دورة مع استرجاع كتلي ثم حراري (MHR) Cycle with mass and heat recovery

⁽¹⁾ طالبة دكتوراه - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
⁽²⁾ أستاذ في جامعة دمشق - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

Improving the Performance of the Adsorption Cooling Cycle Using Heat and Mass Recovery Techniques

Dr. Wajih Naimeh⁽¹⁾
Eng. Rania Awari⁽²⁾

Abstract

This paper aims to improve the performance of an adsorption cooling cycle using heat and mass recovery techniques. Basic design parameters have been calculated for an adsorptive icemaker that uses activated carbon fibers (BusofitATYM) with ammonia as a working pair, and operates on industrial waste heat at a design condensing temperature of 36 °C, a maximum bed temperature of 85 °C and a minimum of 36 °C.

It was found that the coefficient of performance COP in the basic cooling cycle is 0.1937, the COP increased to 0.308 as a result of heat recovery, increased to 0.385 as a result of mass recovery, and increased to 0.504 as a result of mass heat recovery. Thus, mass heat recovery technique is considered the best in order to obtain the highest performance of the cycle.

⁽¹⁾ Professor –Damascus University – College of Mechanical and Electrical Engineering

⁽²⁾ Damascus University – College of Mechanical and Electrical Engineering

1- المقدمة:

يُعتبر نظام التبريد الادمصاصي من الأنظمة الصديقة للبيئة، فهو يعمل على مصادر طاقة نظيفة ومتجددة (الطاقة الشمسية، الطاقة الجيوحرارية، طاقة الضياعات الصناعيّة والغاز الطبيعي) ويستخدم وسائط تبريد غير ضارة بالبيئة مثل (الماء، الأمونيا، الميثانول، الإيثانول و R134a و R507a...). وبالتالي فإنّ استخدام هذه الأنظمة بديلاً عن أنظمة التبريد الضاغطة البخارية يُخفّض من استهلاك الوقود العضوي ويُسهّم في تخفيض التلوث البيئي. إلا أن معامل أداء مثل هذه الدارات يبقى منخفضاً مقارنةً بآلات التبريد الضاغطة البخارية. [1]

قدّم الباحثون دراسات تجريبية ونظرية عن طرق رفع معامل أداء الدارة وتمحورت هذه الطرق في النقاط الرئيسية التالية:

- اختبار أزواج ادمصاصية جديدة.
 - استخدام مواد ادمصاصية مركبة ومقساة.
 - تطوير أوعية الادمصاص والمبادلات الحرارية المستخدمة.
 - استخدام تقنيّات الاسترجاع الحراري والكتلي والدارات متعددة المراحل والتعاقبية.
- في هذا البحث تمّ التركيز على رفع معامل الأداء Coefficient Of Performance (COP) باستخدام تقنيّات الاسترجاع الحراري والكتلي.

- قدّم Li&Wang [2] (2008) دراسة تجريبية تُبيّن تأثير الاسترجاع الحراري والكتلي على معامل الأداء coefficient of performance (COP) لنظام تبريد ادمصاصي يستخدم (الكربون المنشط المقسّى/ الأمونيا) كزوج عامل وعند درجة حرارة فصل 145 °C.

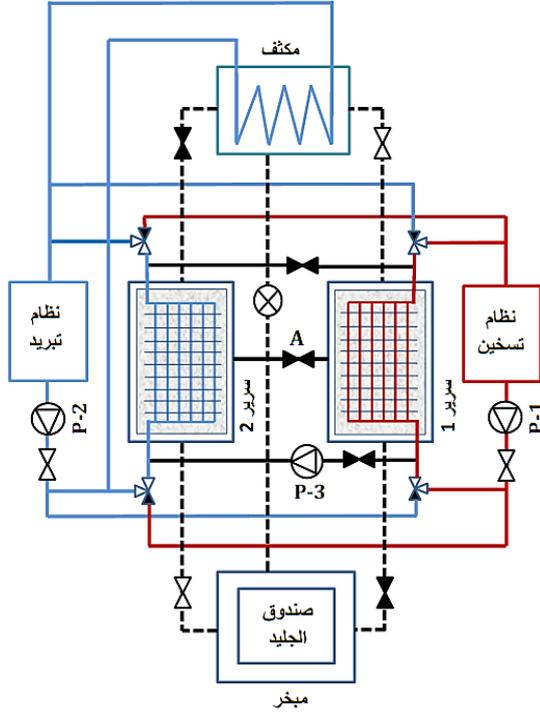
ويبيّن أنّه في دورة التبريد مع استرجاع كتلي Mass Recovery (MR) زاد معامل الأداء COP من 0.15 إلى 0.18 أي بمقدار 0.03، وفي دورة التبريد مع استرجاع كتلي ثمّ حراري Mass Heat Recovery (MHR) زاد COP إلى 0.22 أي بمقدار 0.07.

- قام Duong&Hong [3] (2017) بإجراء محاكاة عددية لسرير ادمصاص يحوي مبادل حراري من النوع الأنبوبي المريش ويعمل في شيلر ادمصاصي يستخدم الزوج (سيليكاجيل/ ماء) وعند درجة حرارة تكاثف 30°C ودرجة حرارة تبخر 15°C ودرجة حرارة فصل 85 °C وتبيّن أنه بإجراء استرجاع حراري HR زاد COP من 0.437 إلى 0.492 أي بمقدار 0.055، وإجراء استرجاع كتلي MR زاد COP إلى 0.544 أي بمقدار 0.107، وإجراء استرجاع كتلي ثم حراري MHR زاد COP إلى 0.576 أي بمقدار 0.139.

بيّن Kabir [4] (2015) في دراسة عددية أنّ إجراء عملية استرجاع كتلي في نظام تبريد ادمصاصي مُقاد بالطاقة الشمسية ويستخدم زوج (السيليكاجيل/ ماء) أدّى زيادة معامل الأداء الأعظمي COP من 0.8 إلى 1.

2- أجزاء دارة التبريد الادمصاصية المدروسة

1) وعاء المادة الادمصاصية: يسمى أيضاً سرير المادة الادمصاصية Adsorbent bed وهو عبارة عن وعاء مغلق ومعزول يحوي على مبادل حراري أنبوبي مريش وينتشر الكربون المنشط على السطح الخارجي للمبادل مع تأمين فراغات لتسهيل انتقال البخار. يبين الشكل (1) مقطع عرضي وطولي في وعاء الكربون الذي تمّ تصميمه.



الشكل (2) دارة تبريد ادمصاصية بسريين مع دارة استرجاع حراري ودارة استرجاع كتلي.

3- دورة التبريد ادمصاصية وآلية

عمل الدارة

تم تمثيل دورة التبريد على مخطط كلايبيرون (P-T-x)، وتتألف من أربع مراحل كما في الشكل (3):

المرحلة الأولى A → B

تسخين سرير الكربون المنشط مع بقاء تركيز المادة المدمصة x_{max} فيه ثابتاً، ويزداد الضغط من P_{evap} إلى P_{cond} .

المرحلة الثانية B → D

يستمر تسخين سرير الكربون المنشط وتبدأ عملية تحرير المادة المدمصة على شكل بخار يتجه إلى المكثف ويتكاثف فيه (النقطة C) وبالتالي ينقص التركيز في السرير إلى القيمة الدنيا x_{min} وتبلغ درجة حرارة السرير قيمة عظمى T_D . تتم هذه المرحلة عند ضغط ثابت

• P_{cond}

يمر في المبادل ماء التسخين القادم من المسخن وذلك في فترة تسخين سرير الكربون، وفي فترة التبريد يمر فيه ماء التبريد القادم من برج التبريد. تحوي هذه الدارة وعاءين للكربون المنشط يتناوبان على التسخين والتبريد وبالتالي يكون الإنتاج التبريدي مستمر.

(2) مبخر يحوي على صندوق تشكّل الجليد، والمبخر معزول حرارياً عن الوسط الخارجي.

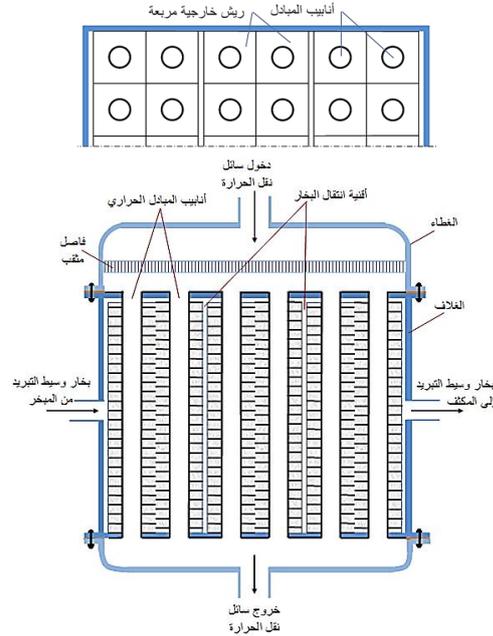
(3) مكثف مائي.

(4) صمام خنق.

(5) برج تبريد: لتبريد الماء القادم من المكثف ومن وعاء الكربون المنشط في فترة التبريد.

(6) مسخن: عبارة عن مبادل حراري يؤمن سطحه التبادل الحراري ما بين الغازات الصناعية والماء القادم من وعاء الكربون في فترة التسخين. الدارة موضحة في

الشكل (2).



الشكل (1) مقطع طولي وعرضي في وعاء ادمصاص.

4- تصميم دائرة التبريد الادمصاصية بهدف

إنتاج الجليد:

المادة الادمصاصية المستخدمة هي الكربون المنشط الليفي نوع BusofitATYM، ووسيط التبريد المستخدم هو الأمونيا. وسائل النقل الحراري هو الماء.

4-1- الشروط الحرارية التصميمية

1. درجة الحرارة الخارجية التصميمية الجافة لمدينة دمشق

وريفها 40°C والرطوبة 23°C . [6]

2. تبريد المكثف بواسطة الماء وبالتالي تكون درجة حرارة

التكاثف $T_{cond} = 23 + 13 = 36^{\circ}\text{C}$. [7]

3. درجة حرارة دخول الماء إلى حجرة صنع الجليد تساوي

درجة الحرارة الرطبة للهواء $T_w = 23^{\circ}\text{C}$.

4. درجة حرارة الجليد المتشكل $T_{ice} = 0^{\circ}\text{C}$.

5. درجة التبخر $T_{evap} = 0 - 6 = -6^{\circ}\text{C}$. [7]

6. درجة حرارة دخول ماء التسخين إلى المبادل

$T_{w,h,1} = 95^{\circ}\text{C}$.

7. درجة حرارة دخول ماء التبريد إلى المبادل والمكثف

$T_{w,c,1} = 23 + 3 = 26^{\circ}\text{C}$. [7]

8. الفرق بين درجة حرارة دخول الماء إلى المبادل ودرجة

حرارة الكربون المنشط في نهاية عملية التسخين أو

التبريد 10°C ، وبالتالي فإن درجة الحرارة العظمى التي

يبلغها سرير الكربون هي:

$T_D = 95 - 10 = 85^{\circ}\text{C}$

درجة الحرارة الدنيا التي يبلغها سرير الكربون المنشط:

$T_A = 26 + 10 = 36^{\circ}\text{C}$

من جداول الإشباع للأمونيا [8] يتم إيجاد ضغوط

التشغيل:

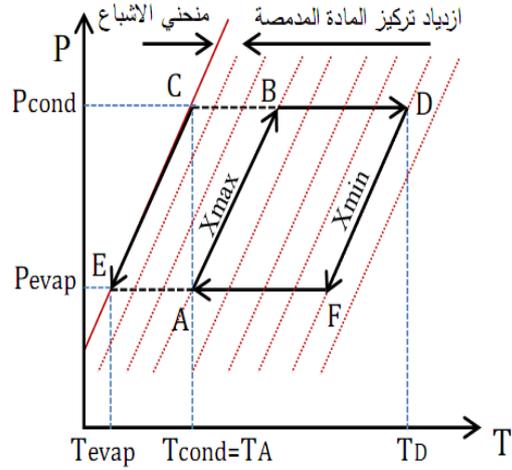
$T_{evap} = -6^{\circ}\text{C} \rightarrow P_{evap} = 3.4114 \text{ bar}$

المرحلة الثالثة D → F

تبريد سرير الكربون مع بقاء تركيز المادة المدمصة x_{min} فيه ثابتاً. في بداية هذه المرحلة يتم إرسال وسيط التبريد من المكثف إلى المبخر عبر صمام الخنق (العملية E → C) فينخفض ضغطه إلى ضغط التبخر P_{evap} .

المرحلة الرابعة F → A

يستمر تبريد سرير الكربون وبالمقابل يتبخر وسيط التبريد في المبخر (النقطة E) ويمتص الحرارة اللازمة لتبخره من الماء المراد تجميده ويتجه البخار إلى سرير الكربون حيث يتم ادمصاصه وتترافق عملية الادمصاص بإطلاق حرارة، ويزداد تركيز المادة المدمصة في السرير إلى القيمة العظمى x_{max} ، وتبلغ درجة حرارة السرير قيمة دنيا T_A . تتم هذه المرحلة عند ضغط ثابت P_{evap} . [5]



الشكل (3) الدورة الترموديناميكية لدائرة التبريد الادمصاصية.

$$T_{cond} = 36 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow P_{cond} = 13.9 \text{ bar}$$

2-4- الافتراضات المعتمدة في الدراسة

1. عملية الادمصاص والفصل تتم عند ضغط ثابت.
2. بخار وسيط التبريد الخارج من المبخر في حالة إشباع.
3. سائل وسيط التبريد الخارج من المكثف في حالة إشباع.

3-4- تمثيل دورة التبريد الادمصاصية للزوج

العامل BusofitATYM/Ammonia على مخطط (P-T-X)

من خلال تمثيل الدورة التبريدية على مخطط (P-T-x) لهذا الزوج كما هو موضح على الشكل (4) تم الحصول على النقاط B و F .

B تمثل بداية عملية تحرير وسيط التبريد من السرير .
F تمثل بداية عملية ادمصاص وسيط التبريد في السرير .

$$T_F = 45 \text{ }^\circ\text{C} , T_B = 74 \text{ }^\circ\text{C}$$

من جدول الإشباع للأمونيا يمكن إيجاد بارامترات النقاط الستة للدورة (A,B,D,F,C,E) بدلالة درجة الحرارة وهي موضحة في الجدول (1)

الجدول (1) بارامترات النقاط الستة لدورة التبريد.

	T	P	ρ_L	h_l	h_v
	$^\circ\text{C}$	bar	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	kJ/kg	kJ/kg
A	36	13.9	585.8	370.96	
B	74	36.311	518.22	566.904	
D	85	46.1	494.5	629.04	
F	45	17.832	571.25	415.48	
C	36	13.9		370.96	1488.7
E	-6	3.4114		172.34	1455.51

4-4- الحسابات التصميمية

1-4-4- الحسابات التصميمية لوعاء الادمصاص

تم تصميم وعاء الادمصاص ليعمل في دارة التبريد ضمن الشروط الحرارية المحددة سابقاً، لإنتاج 1.5 kg جليد خلال دورة عمل واحدة.

a. حساب التركيز الأعظمي والأصغري للمادة المدمصة في سرير الكربون المنشط

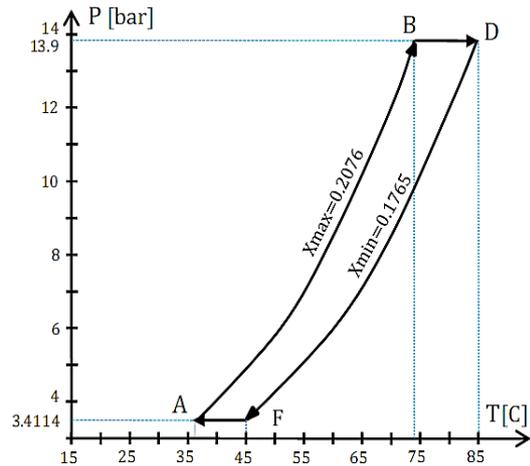
يحسب التركيز الأعظمي x_A والأصغري x_D للأمونيا في السرير من معادلة Dubinin-Astakhov [9]. وقيم معاملات الزوج BusofitA/Ammonia [10] هي :

$$n = 2 , \omega_o = 0.491 [\text{cm}^3/\text{g}]$$

$$D = 1.72 * 10^{-6} [1/\text{k}^n]$$

$$x_A = \omega_o \cdot \rho_A \cdot \exp \left[-D \left(T_A \ln \frac{P_A}{P_{evap}} \right)^n \right] \dots\dots\dots (1)$$

$$x_{max} = x_A = 0.20762 \text{ kg/kg}$$



شكل (4) دورة التبريد الأساسية للزوج BusofitA/Ammonia

$$x_D = \omega_0 \cdot \rho_D \cdot \exp \left[-D \left(T_D \ln \frac{P_D}{P_{cond}} \right)^n \right] \dots \dots \dots (2)$$

$$x_{min} = x_D = 0.17654 \text{ kg/kg}$$

T_A و P_A و T_D و P_D و ρ_D من الجدول (1).

ويُحسب تغير تركيز المادة المدمصة في السريير كمايلي:

$$\Delta x = x_{max} - x_{min} = 0.03108 \dots \dots \dots (3)$$

b. حساب كمية الحرارة التي يمتصها وسيط التبريد في المبخر من 1.5 kg من الماء (لتبريده من درجة حرارة دخوله إلى حجرة التبريد $T_w = 23^\circ\text{C}$ حتى درجة حرارة التجمد 0°C ، ثم تحويله إلى جليد عند الدرجة 0°C) من العلاقة:

$$Q_e = M_w (C_{l,w} \cdot \Delta T_w + L_w (0^\circ\text{C})) \dots \dots \dots (4)$$

$$Q_e = 646.293 \text{ kJ}$$

c. حساب كتلة الأمونيا اللازم تبخرها في المبخر لإنتاج 1.5 kg جليد خلال دورة عمل واحدة

درجة الحرارة الوسطية $\frac{23+0}{2} = 11.5^\circ\text{C}$ السعة الحرارية للماء عند $L_w(0^\circ\text{C}) = 334.4 \text{ kJ/kg}$ الحرارة النوعية الكامنة لتجمد الماء. [7]

d. حساب كتلة الكربون المنشط في الوعاء اللازمة لادمصاص كتلة بخار الأمونيا القادمة من المبخر .

$$M_{ref} = \frac{Q_e}{h_{v,evap} - h_{l,cond}} = 0.5959 \dots \dots \dots (5)$$

$$M_{ac} = \frac{M_{ref}}{\Delta x} = 19.17 \text{ kg} \dots \dots \dots (6)$$

تم اعتماد كتلة الكربون المنشط Busofit في الوعاء

$$M_{ac} = 20 \text{ kg}$$

e. تحديد مواصفات وعاء الادمصاص والمبادل الحراري

تم إنشاء برنامج حاسوبي رياضي بلغة Visual Basic لحساب أبعاد وعاء الادمصاص وأبعاد المبادل الحراري الأنبوبي المرش المتوضع ضمنه، بحيث أن الحجم المتشكل بين السطح الداخلي لغلاف الوعاء والسطح الخارجي للمبادل يتسع لكمية من الكربون المنشط نوع Busofit مقدارها $M_{ac} = 20 \text{ kg}$ ، وكانت المواصفات الهندسية لعناصر الوعاء كماهي موضحة في الجدول (2):

الجدول (2) المواصفات الهندسية لوعاء الادمصاص

العنصر	رمزه		
سماكة جدار وعاء الادمصاص	δ_{shell}	mm	3
القطر الداخلي للأنبوب	$D_{tube,in}$	mm	12
القطر الخارجي للأنبوب	$D_{tube,ex}$	mm	13.6
عدد صفوف الأنابيب	N_{row}	-	6
عدد الأنابيب في الصف الواحد	$N_{tube,row}$	-	8
عدد الأنابيب الكلي	$N_{tube,tot}$	-	48
خطوة الأنابيب	S_{tube}	mm	34
السماكة الكلية لفراغات انتقال البخار	δ_{space}	mm	6
سماكة الفراغ العلوي لانتقال البخار	$\delta_{space,up}$	mm	3
سماكة الريشة	δ_{fin}	mm	0.3
بعد الريشة الخارجية المربعة المتعرجة	X_{fin}	mm	34
عدد التعرجات في الريشة باتجاه X	N_{zik}	mm	12
ارتفاع الريشة المتعرجة بدون سماكتها	Z_{zik}	mm	1
عدد الريش على أنبوب واحد	N_{fin}	-	158
خطوة الترييش	S_{fin}	mm	3.34
البعد الداخلي للوعاء باتجاه X	X_{in}	mm	210
البعد الداخلي للوعاء باتجاه Y	Y_{in}	mm	272
البعد الداخلي للوعاء باتجاه Z	Z_{in}	mm	532

f. حساب كتلة كل عنصر من عناصر وعاء الادمصاص

4-4-1- الحسابات التصميمية لدارة التبريد

الأساسية بدون استرجاع OR (Zero Recovery)

تم إجراء الحسابات التصميمية على أساس أن كتلة الكربون في الوعاء هي: $M_{ac} = 20 \text{ kg}$.

a. حساب كتلة الأمونيا العاملة في الدارة

$$M_{ref} = M_{ac} \cdot \Delta x = 0.6218 \text{ kg} \dots\dots\dots(9)$$

. حساب قدرة المكثف b

$$Q_{cond} = M_{ref}(h_{v,D} - h_{l,cond}) \dots\dots\dots(10)$$

$$Q_{cond} = 795.35 \text{ kJ}$$

تم الحصول على إنتالبي النقطة D في منطقة البخار المحمص $h_{v,D}$ من مخطط $(\log p - i)$ للأمونيا وبدلالة T_D و P_{cond} . [8]

$$h_{v,D} = 1650 \text{ kJ/kg}$$

c. حساب قدرة المبخر (قدرة التبريد)

$$Q_{evap} = M_{ref}(h_{v,evap} - h_{l,cond}) \dots\dots\dots(11)$$

$$Q_{evap} = 674.41 \text{ kJ}$$

d. حساب كمية الجليد المنتجة خلال دورة واحدة

كمية الحرارة التي يمتصها الأمونيا في المبخر من 1kg ماء لتحويله إلى جليد عند الدرجة 0 °C تعطى بالعلاقة:

يوضح الجدول (3) الخواص الفيزيوجحرارية للكربون المنشط Busofit [10] والخواص الفيزيوجحرارية لمعادن كل من الغلاف وأنابيب المبادل والریش [11]، ثم تم حساب حجم وكتلة كل عنصر من هذه العناصر.

الغلاف shell	الأنابيب tube	الریش fin	الكربون ac
خليطة الألمنيوم T81-2219	خليطة الألمنيوم T6-6101	خليطة الألمنيوم T6-6101	Busofit
2770	2710	2710	860
919	903	903	900
1917.7	821.33	2814.82	23263.03
5.31	2.23	7.63	20

الجدول (3) الخواص الفيزيوجحرارية وكتل عناصر وعاء الادمصاص

وتحسب الكتلة الحرارية لوعاء الادمصاص من العلاقة:

$$C = M \cdot c_p \dots\dots\dots(7)$$

M كتلة العنصر

c_p السعة الحرارية النوعية

C الكتلة الحرارية للعنصر

وتكون الكتلة الحرارية الكلية لوعاء الادمصاص:

$$C_{tot} = M_{shell} \cdot c_{p,shell} + M_{tube} \cdot c_{p,tube} + M_{fin} \cdot c_{p,fin} + M_{ac} \cdot c_{p,ac} \dots\dots\dots(8)$$

$$C_{tot} = 31.78 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

$$\bar{x} = \frac{x_{max} + x_{min}}{2} = 0.19208 \quad \dots\dots\dots(16)$$

وتكون الحرارة المقدمة للسّيرير خلال فترة التسخين

A → D هي:

$$Q_{heat} = Q_D = Q_{AB} + Q_{BD} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$Q_{heat} = Q_D = 3481.78 \text{ kJ}$$

• مرحلة تبريد السيرير بثبات التركيز D → F

$$Q_{DF} = C_{tot}(T_D - T_F) + M_{ac} \cdot x_{min}(h_{l,D} - h_{l,F}) \quad \dots\dots\dots(18)$$

• مرحلة التبريد + ادمصاص وسيط التبريد في

السيرير بثبات الضغط F → A

$$Q_{FA} = [C_{tot}(T_F - T_A)] + [M_{ac} \cdot \bar{x} \cdot (h_{l,F} - h_{l,A})] + [M_{ac} \cdot \Delta x \cdot \Delta h_{ads}] - [M_{ac} \cdot \Delta x (h_{v,A} - h_{v,evap})] \quad \dots\dots\dots(19)$$

حيث تؤخذ $h_{v,A} = h_{v,cond}$ من الجدول (1).

وبالتالي تكون الحرارة المطروحة من السيرير خلال فترة

التبريد D → A

$$Q_{cool} = Q_A = Q_{DF} + Q_{FA} \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$Q_{cool} = Q_A = 3333.83 \text{ kJ}$$

إنّ الحرارة الكامنة النوعية للادمصاص أكبر من

الحرارة الكامنة النوعية للتكاثف بحدود (30- 100%) [11]

$$\Delta h_{ads} = 1401.7 \text{ kJ/kg} \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$q_e = C_{l,w} \cdot \Delta T_w + L_w(0^\circ\text{C}) \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$q_e = 430.86 \text{ kJ/kg}$$

وتكون كتلة الجليد الممكن تشكلها خلال دورة عمل

واحدة:

$$M_{ice} = Q_{evap}/q_e \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$M_{ice} = 1.565 \text{ kg}$$

e. حساب كميّة الحرارة المقدمة للسّيرير خلال فترة

التسخين وكميّة الحرارة المطروحة من السيرير خلال فترة

التبريد (في دورة عمل واحدة).

تُحسب من معادلات التوازن الحراري والكتلي للمراحل

الأربعة للدورة [1]، وباعتبار السعة الحرارية لمكونات

السيرير الصلبة ثابتة أما السعة الحرارية لسائل التبريد

الدممص في السيرير فهي تتغير بتغير درجة الحرارة

وبالتالي تُكتب معادلات التوازن الحراري والكتلي كما يلي:

• مرحلة تسخين السيرير بثبات التركيز A → B

$$Q_{AB} = C_{tot}(T_B - T_A) + M_{ac} \cdot x_{max}(h_{l,B} - h_{l,A}) \quad \dots\dots\dots(14)$$

• مرحلة التسخين + تحرير المادة المدمصة من

السيرير بثبات الضغط B → D

$$Q_{BD} = C_{tot}(T_D - T_B) + M_{ac} \cdot \bar{x} \cdot (h_{l,D} - h_{l,B}) + M_{ac} \cdot \Delta x \cdot \Delta h_{ads} \quad \dots\dots\dots(15)$$

حيث \bar{x} متوسط تركيز المادة المدمصة في السيرير:

5-2- تأثير الاسترجاع الكتلّي على أداء دورة التبريد.

■ تتم عملية الاسترجاع الكتلّي بفصل الوعاءين عن المبخر والمكثف وفتح صمام البخار A على الأنبوب الواصل بين الوعاءين كما هو موضّح في الشكل (2). في كلا الوعاءين يكون وسيط التبريد المدمص في مسامات الكربون بشكل سائل مشبع، أما في فراغ السرير فيكون بشكل بخار مشبع. عند فتح صمام البخار بين الوعاءين سوف ينتقل البخار الموجود في فراغ الوعاء الساخن ذو الضغط العالي P_{cond} إلى الوعاء البارد ذو الضغط المنخفض P_{evap} ، فينخفض الضغط قليلاً في الوعاء الساخن وبالمقابل يرتفع قليلاً في الوعاء البارد، وهذا يؤدي إلى حدوث عملية فصل في الوعاء الساخن حيث يتحرر سائل وسيط التبريد المدمص ويتحول إلى بخار يتجه إلى الوعاء البارد الذي تحدث فيه عملية ادمصاص حيث يتحوّل بخار وسيط التبريد إلى سائل ويتراكم في مسامات الكربون، وتستمر هذه العملية حتى تعادل الضغط بين الوعاءين وتساوي قيمته تبعاً لشروط التشغيل:

$$P_m = \frac{P_{cond} + P_{evap}}{2} = \frac{3.4114 + 13.9}{2} = 8.6557 \text{ [bar]} \dots\dots(30)$$

في نهاية الاسترجاع الكتلّي يزداد فرق التركيز في كل سرير بمقدار δx كما هو موضّح في الشكل (6). بعد انتهاء الاسترجاع الكتلّي يتم إعادة وصل السريرين إلى نظامي التسخين والتبريد مع تبديل الأدوار بينهما. [14]

■ توضيح المسارات على مخطط $(P - T - x)$ لدورة التبريد في الشكل (6).

x_G و x_M تركيز المادة المدمصة في سرير الادمصاص وفي سرير الفصل بعد عملية استرجاع كتلي.

$$Q_{reg} = Q_{AI} = C_{tot}(T_I - T_A) + M_{ac} \cdot x_{max}(h_{L,I} - h_{L,A}) = 1292.3 \text{ kJ} \dots\dots(25)$$

حساب درجة الحرارة T_J التي يبلغها السرير الساخن في نهاية عملية الاسترجاع الحراري:

$$Q_{reg} = Q_{DJ} = C_{tot}(T_D - T_J) + M_{ac} \cdot x_{min}(h_{L,D} - h_{L,J}) = 1292.3 \text{ kJ} \dots\dots(26)$$

حيث يتم إيجاد كلًا من $h_{L,I}$ و $h_{L,J}$ من جدول الإشباع للأوميا بدلالة درجة الحرارة.

$$\text{بالحل البياني ينتج: } T_J = 60.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

■ كمية الحرارة المقدمة لتسخين الوعاء من T_I إلى T_D تساوي:

$$Q_{heat} = Q_{ID} = Q_D - Q_{reg} = 2189.5 \text{ kJ} \dots\dots(27)$$

وكمية الحرارة المطروحة لتبريد الوعاء من T_A إلى T_J تساوي:

$$Q_{cool} = Q_{JA} = Q_A - Q_{reg} = 2041.5 \text{ kJ} \dots\dots(28)$$

■ بما أن كتلة وسيط التبريد لم تتغير نتيجة الاسترجاع الحراري وبالتالي فإن Q_{cond} و Q_{evap} و M_{ice} و SCE تبقى نفسها كما في الدورة الأساسية، لكن يتغير معامل الأداء كمايلي:

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{ID}} = 0.308 \dots\dots(29)$$

رُبِت هذه النتائج في الجدول (4) من أجل مقارنة الدورات الاربعة.

قيمة التركيز الأعظمي والأصغري في سرير الفصل:

$$x_{max} = x_A , x_{min} = x_M$$

ويكون فرق التركيز في سرير الفصل:

$$\Delta x^* = x_A - x_M = 0.07704 \text{ kg/kg} \dots\dots\dots(32)$$

حساب مقدار الزيادة في فرق تركيز المادة المدمصة في السرير نتيجة الاسترجاع الكتلي:

$$\delta x = x_D - x_M = 0.04596 \text{ kg/kg} \dots\dots\dots(33)$$

حساب تركيز المادة المدمصة الأعظمي في سرير الادمصاص البارد في نهاية عملية الاسترجاع الكتلي:

$$x_G = x_A + \delta x = 0.25358 \text{ kg/kg} \dots\dots\dots(34)$$

قيمة التركيز الأعظمي والأصغري في سرير الادمصاص:

$$x_{max} = x_G , x_{min} = x_D$$

حساب درجات الحرارة المجهولة من مخطط (P-T-x)

$$x_M , P_{evap} \rightarrow T_N = 57^\circ\text{C}$$

$$x_G , P_m \rightarrow T_G = 46^\circ\text{C}$$

$$x_G , P_{cond} \rightarrow T_K = 58^\circ\text{C}$$

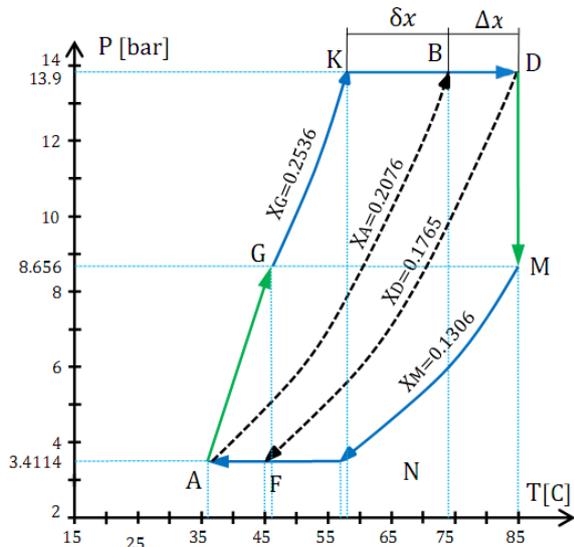
حساب كمية الحرارة المقدمة للسرير خلال عملية التسخين المحسوس G-K :

A-G و D-M عملية الاسترجاع الكتلي بين الوعاءين حتى تعادل الضغط.

G-K-D عملية تسخين السرير.

M-N-A عملية تبريد السرير الآخر.

في عملية استرجاع كتلي مثالية بين الوعاءين تحدث عملية (الادمصاص / فصل) بشكل تلقائي، وبالتالي في نهاية هذه العملية تبقى درجة حرارة سرير الفصل الساخن ثابتة $T_M = T_D = 85^\circ\text{C}$ ، بينما ترتفع درجة حرارة سرير الادمصاص البارد من T_A إلى T_G بسبب المحتوى الحراري العالي للبخار القادم من السرير الساخن.



الشكل (6) دورة التبريد مع استرجاع كتلي.

حساب تركيز المادة المدمصة في سرير الفصل الساخن في نهاية عملية الاسترجاع الكتلي:

$$x_M = \omega_o \cdot \rho_M \cdot \exp \left[-D \left(T_M \cdot \ln \frac{P_M}{P_m} \right)^n \right] \dots\dots\dots(31)$$

$$x_M = 0.13057 \text{ kg/kg}$$

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{GD}} = 0.3848 \quad (42)$$

$$SCE = \frac{Q_{evap}}{M_{ac}} = 83.56 \text{ kJ/kg}_{ads} \quad (43)$$

■ رُتبت هذه النتائج في الجدول (4) من أجل مقارنة الدورات الأربعة.

5-3- تأثير الاسترجاع الكتلي ثم الحراري على أداء دارة التبريد.

تمّ توضيح مسارات الاسترجاع الكتلي ثم الاسترجاع الحراري في هذه الدورة على الشكل (7) وفيها:

■ عملية استرجاع كتلي مثالية: يمثلها المسار D-M والمسار A-G ، وفي هذه العملية: يتعادل الضغط بين الوعاءين ويصبح :

$$P_m = \frac{P_{evap} + P_{cond}}{2} = 8.6557 \text{ bar}$$

ينقص تركيز المادة المدمصة في سرير الفصل من x_D إلى x_M ، ويزداد تركيز المادة المدمصة في سرير الادمصاص من x_A إلى x_G . يصبح فرق التركيز في السرير بعد عملية استرجاع كتلي: $\Delta x^* = \Delta x + \delta x$.

■ عملية الاسترجاع الحراري المثالية: يمثلها المسار M-J والمسار G-K-I.

■ عملية تسخين السرير يمثلها المسار I-D وكمية الحرارة المقدمة هي $Q_{heat} = Q_{ID}$.

وعملية تبريد السرير يمثلها المسار J-N-A وكمية الحرارة المطروحة هي $Q_{cool} = Q_{JA}$.

■ وعلى هذا الأساس تمّ إجراء الحسابات ورُتبت النتائج في الجدول (4).

$$Q_{GK} = C_{tot}(T_K - T_G) + M_{ac} \cdot x_G (h_{L,K} - h_{L,G}) \quad (35)$$

حساب كمية الحرارة المقدمة للسرير لرفع درجة حرارته المحسوسة وتحرير المادة المدمصة K-D :

$$Q_{KD} = C_{tot}(T_D - T_K) + M_{ac} \cdot \frac{x_G + x_D}{2} (h_{L,D} - h_{L,K}) + M_{ac}(x_G - x_D) \cdot h_{ads} \quad (36)$$

كمية الحرارة المقدمة خلال إجراء التسخين كاملاً G-D :

$$Q_{heat} = Q_{GD} = Q_{GK} + Q_{KD} \quad (37)$$

$$Q_{heat} = Q_{GD} = 4344.62 \text{ kJ}$$

حساب كمية وسيط التبريد الدوّارة في الدارة:

$$M_{ref}^* = M_{ads} \cdot \Delta x^* = 1.541 \text{ kg} \quad (38)$$

وعلى أساس كمية وسيط التبريد M_{ref}^* تمّ حساب Q_{evap} و Q_{cond} و M_{ice} و COP و SCE كمايلي:

$$Q_{cond} = M_{ref}^* (h_{v,D} - h_{l,cond}) \quad (39)$$

$$Q_{cond} = 1971.45 \text{ kJ}$$

$$Q_{evap} = M_{ref}^* (h_{v,evap} - h_{l,cond}) \quad (40)$$

$$Q_{evap} = 1671.67 \text{ kJ}$$

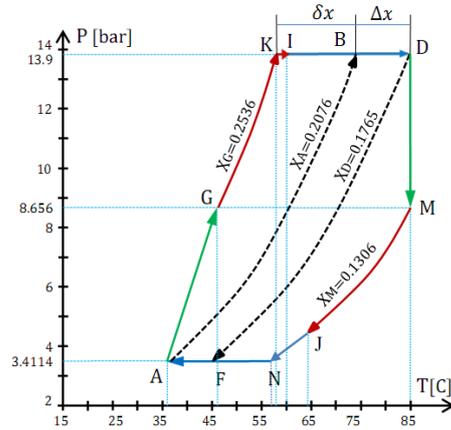
$$M_{ice} = \frac{Q_{evap}}{q_e} = 3.88 \text{ kg} \quad (41)$$

6- النتائج والمناقشة

6-1- المقارنة بين الدورة الأساسية R0 ودورة مع

استرجاع حراري RH.

(1) كمية الجليد المنتجة: إن عملية الاسترجاع الحراري لا تؤثر على كمية وسيط التبريد في الدارة وبالتالي تبقى قدرة التبريد Q_{evap} ثابتة، وكذلك كمية الجليد المنتجة خلال دورة واحدة تبقى ثابتة $M_{ice} = 1.565 \text{ kg}$. (الشكل (8)).



الشكل (7) دورة التبريد مع استرجاع كتلي ثم حراري

الجدول (4) مقارنة الحسابات التصميمية

بين الدورات الأربعة.

البارامتر	OR	HR	MR	MHR
x_{max} [kg/kg]	0.20762	0.20762	0.25358	0.25358
x_{min} [kg/kg]	0.17654	0.17654	0.17654	0.17654
δx [kg/kg]	0	0	0.04596	0.04596
δM_{ref} [kg]	0	0	0.9195	0.9195
Δx [kg/kg]	0.03108	0.03108	0.07704	0.07704
M_{ref} [kg]	0.6218	0.6218	1.541	1.541
Q_{cond} [kJ]	795.35	795.35	1971.45	1971.45
Q_{evap} [kJ]	674.41	674.41	1671.67	1671.67
M_{ice} [kJ]	1.565	1.565	3.88	3.88
Q_{heat} [kJ]	3481.78	2189.49	4344.62	3315.28
Q_{reg-h} [kJ]	0	1292.29	0	1029.18
SCE [kJ/kg _{ac}]	33.71	33.71	83.56	83.56
COP [-]	0.1937	0.3080	0.3848	0.5042

(2) كمية الحرارة المقدمة خلال التسخين: نتيجة الاسترجاع الحراري تنتقل كمية من الحرارة Q_{reg} من السريبر الساخن إلى السريبر البارد، وبالتالي ينخفض الاستهلاك الحراري Q_{heat} مرحلة تسخين السريبر من 3481.78 kJ إلى 2189.49 kJ . (الشكل (9)).

(3) مؤشرات الأداء للدارة

نتيجة انخفاض الاستهلاك الحراري في مرحلة التسخين زاد COP من 0.1937 إلى 0.308، وبقي SCE ثابتاً وقيمته $33.71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{ac}}$ لأن قدرة التبريد بقيت ثابتة. (الشكل (9)).

6-2- المقارنة بين الدورة الأساسية R0 ودورة مع

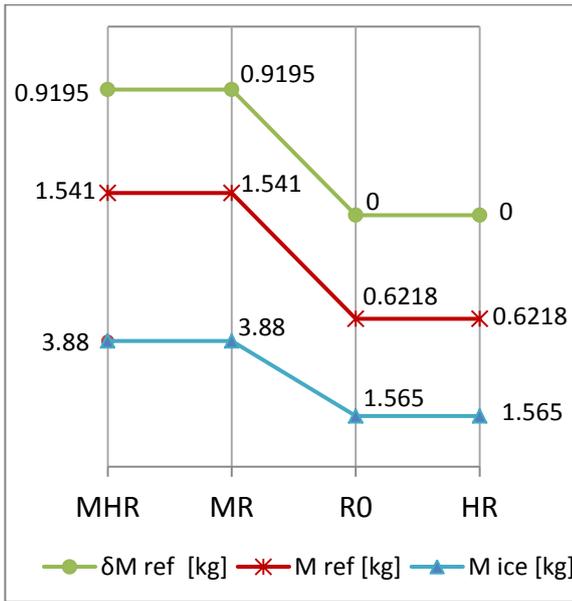
استرجاع كتلي MR.

(1) كمية الجليد المنتجة: نتيجة فرق الضغط بين الوعاءين وضمن شروط الدراسة كانت كمية البخار المنتقلة من السريبر الساخن إلى السريبر البارد هي 0.9195 kg وبالتالي زادت كمية وسيط التبريد في الدارة M_{ref} من 0.6218 kg إلى 1.541 kg ، وبالنتيجة زادت قدرة المبخر Q_{evap} بشكل كبير، ما أدى إلى ازدياد كمية

الواجب تقديمها في مرحلة تسخين السرير من 3481.78 kJ إلى 3315.28 kJ (الشكل 9).

(3 مؤشرات الأداء للدائرة

زاد COP من 0.1937 إلى 0.5042 . وزاد SCE من $33.71 \frac{\text{kJ}}{\text{kgac}}$ إلى $83.56 \frac{\text{kJ}}{\text{kgac}}$ (الشكل 9).



الشكل (8): تأثير عمليات الاسترجاع HR و MR و MHR على كمية الجليد الممكن إنتاجها خلال دورة عمل واحدة.

الجليد المنتجة في دورة واحدة M_{ice} من 1.565 kg إلى 3.88 kg أي بمقدار 2.315 kg (الشكل 8).

(2 كمية الحرارة المقدمة خلال التسخين: نتيجة حصول ادمصاص إضافي في السرير البارد فإن عملية تحرير وسيط التبريد المدمص تستلزم كمية أكبر من الحرارة، وبالتالي يزداد الاستهلاك الحراري Q_{heat} من 3481.78 kJ إلى 4344.62 kJ (الشكل 9).

(3 مؤشرات الأداء للدائرة

نتيجة ازدياد قدرة التبريد زاد COP من 0.1937 إلى 0.3848 ، وزاد SCE من $33.71 \frac{\text{kJ}}{\text{kgac}}$ إلى $83.56 \frac{\text{kJ}}{\text{kgac}}$ (الشكل 9).

6-3- المقارنة بين الدورة الأساسية RO ودورة مع

استرجاع كتلي ثم حراري MHR.

(1 كمية الجليد المنتجة: نتيجة عملية الاسترجاع الكتلي، تزداد كمية وسيط التبريد M_{ref} العاملة في الدائرة بمقدار الكتلة المسترجعة وتساوي 0.9195 kg ، وتزداد قدرة التبريد Q_{evap} ، وتزداد كمية الجليد المنتجة في دورة واحدة M_{ice} بمقدار 2.315 kg (الشكل 8).

(2 كمية الحرارة المقدمة خلال التسخين: إن عملية الاسترجاع الكتلي بين السريرين والتي ينتج عنها عملية (فصل/ادمصاص) إضافية تؤدي إلى زيادة كمية الحرارة (المقدمة/المطروحة) خلال فترة (التسخين/التبريد) اللاحقة، ولكن إتباعها مباشرة بعملية استرجاع حراري يُخفّض كمية الحرارة الواجب تقديمها خلال فترة التسخين وكمية الحرارة الواجب طرحها خلال فترة التبريد. وبالنتيجة تنخفض كمية الحرارة

(3) في دورة مع HR بقي معامل قدرة التبريد SCE ثابت. بينما في دورة مع MR ودورة مع MHR زاد SCE بنسبة 147.87% وذلك بسبب ازدياد كتلة وسيط التبريد العاملة في الدارة.

(4) زاد معامل الأداء COP في دورة مع HR بمقدار 0.1143 بسبب انخفاض الاستهلاك الحراري، وفي دورة مع MR زاد بمقدار 0.1911 بسبب ازدياد كتلة وسيط التبريد العاملة في الدارة، وفي دورة مع MHR زاد بمقدار 0.3105 لأن هذه الدورة تملك مزايا الاسترجاع الحراري والاسترجاع الكتلي معاً.

8- التوصيات

يُنصح بإجراء عملية استرجاع كتلي ثم عملية استرجاع حراري MHR بين السريرين قبل تبديل الأدوار بينهما لأنها تحقق معامل الأداء الأعلى وقدرة تبريد نوعي أعلى مقارنة بدورة مع HR ومع MR.

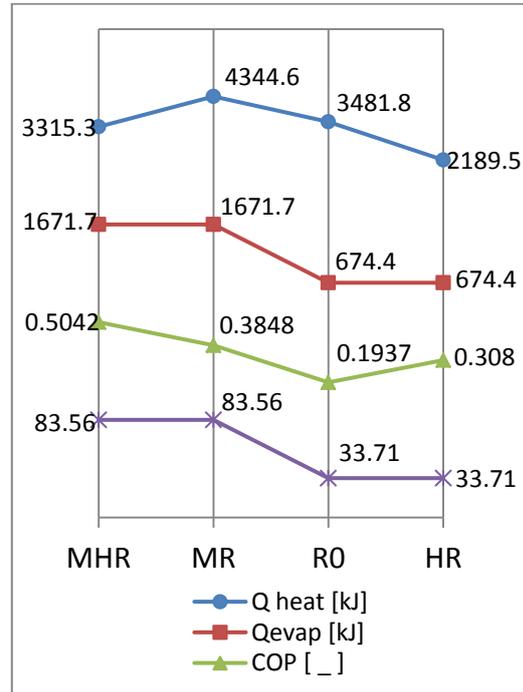
مقارنة النتائج مع الدراسة المرجعية:

- في عملية الاسترجاع الكتلي: تنخفض كمية البخار المسترجعة تبعاً للعوامل التالية:

- (1) بازدياد درجة حرارة الفصل
- (2) بانخفاض الفرق بين ضغط التبخر وضغط التكاثف أي بانخفاض الضغط بين الوعاءين
- (3) بانخفاض زمن الاسترجاع الكتلي.

- في عملية الاسترجاع الحراري: تنخفض كمية الحرارة المسترجعة بانخفاض زمن الاسترجاع الحراري، فعند زمن استرجاع مثالي تصبح درجة حرارة السريرين متساوية.

- إن درجة حرارة الفصل في بحثنا $T_D = 85^\circ\text{C}$ أخفض بكثير مقارنة ببحث Wang [2] حيث $T_D = 145^\circ\text{C}$.



الشكل(9): تأثير عمليات الاسترجاع HR وMR وMHR على أداء الدارة.

7- الاستنتاجات

(1) بالمقارنة مع دورة RO وُجِدَ أنَّ الاستهلاك الحراري في دورة مع HR انخفض بمقدار 37.12%، وفي دورة مع MHR انخفض بمقدار 4.78%.

وفي دورة مع MR زاد الاستهلاك الحراري بمقدار 24.78% من أجل فصل كمية وسيط التبريد المدمصة بشكل إضافي نتيجة الاسترجاع الكتلي.

(2) إنَّ استرجاع الكتلة يزيد كتلة وسيط التبريد العاملة في الدارة بسبب انتقال بخار وسيط التبريد من سرير الفصل الساخن إلى سرير ادمصاص البارد نتيجة فرق الضغط بينهما، وكلما زاد فرق الضغط كلما كانت كتلة البخار المنتقلة أكبر، وبالتالي في دورات مع MR وMHR يكون ادمصاص أكثر إشباعاً والفصل أكثر اكتمالاً مقارنةً بدورة RO ودورة مع HR.

وهذا ما يجعل مقدار الزيادة في COP أكبر عند إجراء استرجاع كتلي.

- إنَّ درجة حرارة التكاثف T_{cond} في بحثنا $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ أعلى مقارنةً ببحث Duong [3] حيث قيمتها $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. وإنَّ درجة حرارة التبخر T_{evap} في بحثنا $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ - أخفض مقارنةً ببحث Duong [3] حيث قيمتها $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. هذا يعني أنَّ فرق الضغط بين الوعاءين في بحثنا أعلى بكثير مقارنةً ببحث Duong، وهذا ما يجعل مقدار الزيادة في COP أكبر عند إجراء استرجاع كتلي.

تمَّ في بحثنا دراسة استرجاع كتلي مثالي واسترجاع حراري مثالي وهذا ما جعل مقدار الزيادة في COP أكبر في بحثنا مقارنةً بالأبحاث المرجعية.

- [10] Vasiliev, L. L., (2003) “Solar sorption refrigerator”, Research Gate.
- [11] Lambert, M. A., (2007) “Design of solar powered adsorption heat pump with ice storage”, Science Direct, Applied Thermal Engineering 27, 1612–1628.
- [12] Sumathy, K., Yeung, K. H., Yong, L., (2003). “Technology development in the solar adsorption refrigeration systems”. Progress in Energy and Combustion Science, 29, 301–327.
- [13] Demirocak, D. E., (2008) “Thermodynamic and economic analysis of a solar thermal powered adsorption cooling system”, Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University.
- [14] Wang, R. Z., (2001) “Performance improvement of adsorption cooling by heat and mass recovery operation”, International Journal of Refrigeration 24, 602 – 611.

المراجع العربية

- [6] كود العزل الحراري للأبنية في سوريا 2007 .
- [7] د. نديم مخبير . آلات التبريد . جامعة دمشق.

References

المراجع

- [1] Demir, H., Mobedi, M., Ulku, S., (2008). “A review on adsorption heat pump: Problems and solutions”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 2381–2403.
- [2] Li, T. X., Wang, R. Z., Wang, L. W., Lu, Z. S., Wu, J. Y., (2008) “Influence of mass recovery on the performance of a heat pipe type ammonia sorption refrigeration system using CaCl₂ /activated carbon as compound adsorbent”, Science Direct, Applied Thermal Engineering 28, 1638–1646.
- [3] Duong, X. Q., Cao, N. V., Hong, S. W., Ahn, S. H., Chung, J. D., (2017) “Numerical Study on the Combined Heat and Mass Recovery Adsorption Cooling Cycle”, Energy Technology 5, 1 – 11.
- [4] kabir, K. M., Alam, K. C., Sarker, M. M., Rouf, R. A., Saha, B. B., (2015) “Effect of Mass Recovery on the Performance of Solar Adsorption Cooling System”, Science Direct, Energy Procedia 79, 67 – 72.
- [5] Aghbalou, F., Mimet, A., Badia, F., Illa, J., El Bouardi, A., Bougard, J., (2004). “Heat and mass transfer during adsorption of ammonia in a cylindrical adsorbent bed: thermal performance study of a combined parabolic solar collector, water heat pipe and adsorber generator assembly”. Applied Thermal Engineering, 24, 2537–2555.
- [8] ASHRAE fundamental handbook SI (2017).
- [9] Habib, K., (2015). “Performance investigation of a waste heat driven pressurized adsorption refrigeration cycle”. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

قائمة الرموز:

kg	..... الكتلة	M
$J/kg \cdot ^\circ C$	..... السعة الحرارية النوعية	C_p
$^\circ C$ أو K	..... درجة الحرارة	T
bar	..... الضغط	P
kg/m^3	..... كثافة سائل وسيط التبريد عند درجة حرارة الإشباع	ρ
kJ/kg	..... انتالبي سائل وسيط التبريد عند درجة حرارة الإشباع	h_l
kJ/kg	..... انتالبي بخار وسيط التبريد عند درجة حرارة الإشباع	h_v
kJ/kg	..... الحرارة النوعية الكامنة للادمصاص / فصل	Δh_{ads}
kg/kg	..... تركيز وسيط التبريد المدمص في السرير	x
kg/kg	..... فرق تركيز المادة المدمصة في السرير	Δx
kg/kg	..... فرق تركيز المادة المدمصة في السرير بعد عملية استرجاع كتلي	Δx^*
kg/kg	..... التغير في فرق تركيز المادة المدمصة نتيجة الاسترجاع الكتلي	δx
-	..... معامل عدم تجانس توزع المسام ذات الحجوم المختلفة	n
$1/K^n$	..... معامل الجذب	D
m^3_{ref}/kg_{ac}	..... الحجم الأعظمي للمادة المدمصة في واحدة الكتلة للمادة الادمصاصية	ω_o
kJ	..... قدرة المبخر	Q_{evap}
kJ	..... قدرة المكثف	Q_{cond}
kJ	..... كمية الحرارة المقدمة للسرير خلال فترة التسخين	Q_{heat}
kJ	..... كمية الحرارة المطروحة من السرير خلال فترة التبريد	Q_{cool}
kJ	..... كمية الحرارة المسترجعة في عملية الاسترجاع الحراري	Q_{reg}
$kJ/^\circ C$	..... الكتلة الحرارية الكلية لوعاء الادمصاص	C_{tot}
-	..... معامل الأداء للدورة	COP
kJ/kg_{ac}	..... معامل قرة التبريد النوعية	SCE

الرموز السفلية

تكاثف	cond	نهاية عملية الادمصاص	A
تبخر	evap	بداية عملية الفصل	B
غلاف الوعاء	shell	نهاية عملية الفصل	D
أنابيب المبادل	tube	بداية عملية الادمصاص	F
ريش المبادل	fin	نهاية عملية الاسترجاع	I
الكربون المنشط	ac	الحراري في السرير البارد نهاية عملية الاسترجاع	J
وسيط التبريد	ref	الحراري في السرير الساخن نهاية عملية الاسترجاع	M
الماء	w	الكتلي في السرير الساخن نهاية عملية الاسترجاع	G
جليد الماء	ice	الكتلي في السرير البارد إشباع	sat
