

تأثير درجة حرارة التكاثف في الإنتاجية التبريدية لدارة تبريد ادمصاصية لإنتاج الجليد

م. رانيا أوري*

د. م. بسام بدران**

الملخص

درِسَ في هذا البحث تأثير درجة حرارة التكاثف في الإنتاجية التبريدية لآلة تبريد ادمصاصية لإنتاج الجليد. لإجراء هذه الدراسة حُسِبَتِ المواصفات والبارامترات التصميمية الأساسية لآلة إنتاج جليد ادمصاصية تستخدم زوجاً عاملاً (كربون منشط - ميثانول) وتعمل على مصدر حراري ثابت الشدة. تبين من خلال البحث أن ارتفاع درجة حرارة التكاثف التي تعمل عندها الآلة من 25°C إلى 45°C أدى إلى انخفاض الإنتاجية التبريدية للدورة الواحدة في حين ازداد عدد الدورات المنجزة¹ خلال زمن معين (5 hour) من 8 إلى 12 دورة للآلة؛ ممّا أدى إلى ازدياد كمية الجليد المنتجة بمقدار 7 kg عند الانتقال من 8 إلى 9 دورات، وبمقدار 5 kg عند الانتقال من 9 إلى 10 دورات، وبمقدار 3.6 kg عند الانتقال من 10 إلى 11 دورة، وبمقدار 2.4 kg عند الانتقال من 11 إلى 12 دورة.

الكلمات المفتاحية: ادمصاص (امتزاز) Adsorption - فصل (استرجاع) Desorption - المادة ادمصاصية
Adsorbent - المادة المدمصة Adsorbate - سرير المادة ادمصاصية Adsorbent bed - الزوج العامل Working
Pair - الكربون المنشط Activated carbon - الميثانول Methanol.

* قائمة بالأعمال - قسم الميكانيك العام - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

** أستاذ مساعد - قسم الميكانيك العام - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق..

1- المقدمة:

تعمل أنظمة التبريد ادمصاصية على الطاقة الحرارية فقط، ولا يتطلب عملها طاقة ميكانيكية وومن ثم تُشغَّل مباشرة باستخدام أحد مصادر الطاقات التقليدية أو المتجددة، ويُمكن استخدامها من أجل إنتاج الجليد وحفظ المنتجات الغذائية والدوائية وتبريد الماء لأغراض التكييف، إلا أن معامل أدائها منخفض جداً مقارنةً بآلات التبريد الضاغطة البخارية وآلات التبريد ادمصاصية.

تستخدم أنظمة التبريد ادمصاصية وسائط تبريد غير ضارة بالبيئة (الأمونيا، الميثانول، الإيثانول، الماء...) وتُعدُّ هذه الأنظمة صديقة للبيئة إذا شغَّلت على أحد مصادر الطاقة النظيفة والمتجددة (الطاقة الشمسية، الطاقة الجيوحرارية، الطاقة المهذورة في الصناعة، حرق الغاز الطبيعي) ومن ثمَّ هذا يُخفِّض من استهلاك الوقود الأحفوري ويسهم في تخفيض التلوث البيئي.

2- ظاهرة ادمصاص:

هناك نوعان للادمصاص: فيزيائي وكيميائي.

الادمصاص الفيزيائي هو عملية انفصال الجزيئات من الطور الغازي أو السائل وارتباطها مع الجزيئات السطحية للمادة الصلبة أي التصاقها على سطح المادة الصلبة. تُسمَّى المادة الصلبة بالمادة ادمصاصية، والمادة التي التصقت على سطحها بالمادة المدمصة. تُصنَّف قوى الارتباط في هذه الحالة إلى مجموعتين هي: قوى فاندرالس وقوى ذات منشأ الكتروستاتي. أمَّا في حالة ادمصاص الكيمياء فنجد أنَّ جزيئات الغاز تشكِّل مع سطح المادة الصلبة روابط كيميائية (مشاركة أو شاردية).

تختلف المواد ادمصاصية عن بعضها بعضاً بخواصها السطحية وهي: (a) المسامية التي تحدد مساحة السطح الفعال (b) الاستقطاب.

تترافق عملية ادمصاص بإطلاق حرارة وهي تعتمد على طبيعة الزوج ادمصاصي المستخدم. يمكن إرجاع المادة

الادمصاصية إلى وضعها الأصلي بواسطة عملية الفصل Desorption كما يطلق على هذه العملية اسم الاسترجاع Regeneration أو التوليد Generation ولتحقيقها يلزم تقديم حرارة للمادة ادمصاصية [1,2,3].

3- الأزواج ادمصاصية:

تُصنع المواد ادمصاصية غالباً من السيليكا جيل، الزيوليت أو الكربون المنشط. أمَّا وسائط التبريد (المواد المدمصة) الأكثر استخداماً فهي الماء، الأمونيا، الميثانول أو الإيثانول. والأزواج الشائعة والمستخدمه تجارياً هي:

▪ زيوليت/ ماء (Zeolite /H₂O) .

▪ السيليكا جيل/ ماء (Silica Gel /H₂O).

▪ كربون منشط/ ميثانول (AC /Methanol) .

▪ كربون منشط / أمونيا (AC /Ammonia).

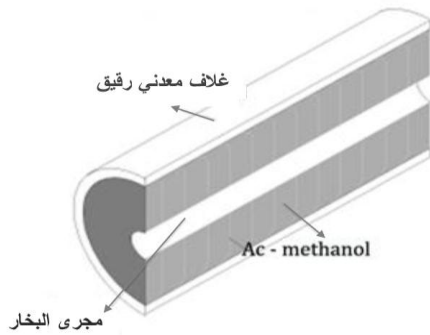
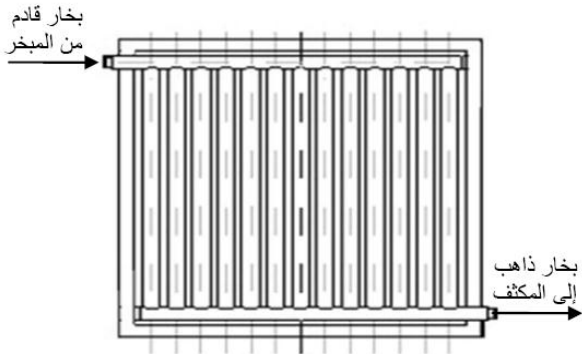
تُستخدم أزواج (زيوليت/ ماء) و(جيل السيليكا/ ماء) لأغراض تكييف الهواء أي لدرجات حرارة فوق الصفر. في حين تُستخدم أزواج (كربون منشط/ ميثانول) و(كربون منشط/ أمونيا) لإنتاج الجليد أي لدرجات حرارة تحت الصفر.

تعمل الأنظمة مع الأمونيا عند ضغوط أعلى من الضغط الجوي بكثير، أمَّا مع الميثانول والماء فتعمل عند ضغوط أخفض من الضغط الجوي [4]

4- تصميم دارة تبريد ادمصاصية لإنتاج الجليد تستخدم (الكربون منشط - ميثانول) زوجاً عاملاً.

4-1- مكونات دارة التبريد ادمصاصية:

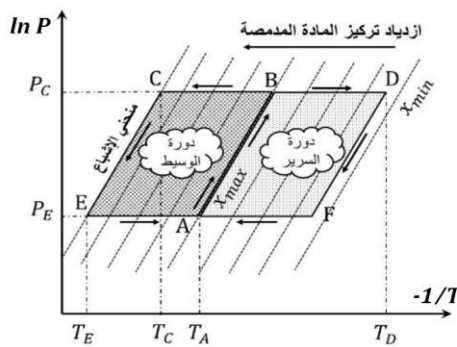
تستخدم دارة التبريد ادمصاصية موضوع بحثنا الميثانول كوسيط تبريد (يتصف الميثانول بأنه مادة سامة، وقابلة للاشتعال، كما يجب تخلية الهواء من الدارة عند العمل عند درجات حرارة تبخر منخفضة). أمَّا المادة ادمصاصية المستخدمة فهي الكربون المنشط (إذ تختلف



الشكل (2) مقطع أفقي في سرير الكربون المنشط ومقطع طولي في أحد أنابيب الكربون.

4-2- آلية عمل دائرة التبريد الادمصاصية:

تمثلت دورة التبريد الادمصاصية على مخطط كلايرون (P-T-X) وتتألف هذه الدورة كما هو موضح على الشكل (3) من أربع مراحل:



الشكل (3) الدورة الترموديناميكية لدائرة التبريد الادمصاصية

المرحلة الأولى:

تقوم مضخة الزيت H بضخ الزيت ذي درجة الحرارة العالية من مسخن الزيت إلى السرير، وتعمل الطاقة الحرارية المقدمة على رفع درجة حرارة السرير من T_A إلى T_B

سعة الادمصاص العظمى لكل نوع من أنواع الكربون تبعاً لمساميته).

يبين الشكل (1) الأجزاء الرئيسية لهذه الدارة، وهي:

- سرير الكربون المنشط مغلفاً بغطاء معدني رقيق ومغمور في حوض يتدفق فيه سائل حراري (زيت) لتسخين السرير في مرحلة التسخين، ثم يتدفق فيه ماء التبريد في مرحلة التبريد.

إن سرير الكربون المنشط له تصميمات متعددة منها أن يصنع الكربون المنشط على شكل أنابيب متحدة المركز ومجووفة حيث يجري الميثانول ضمن هذه التجاويف. الشكل (2) يوضح مقطعاً أفقياً في سرير الكربون، كما يوضح مقطعاً طولياً في أحد الأنابيب.

- مكثف مائي.

- صمام خنق.

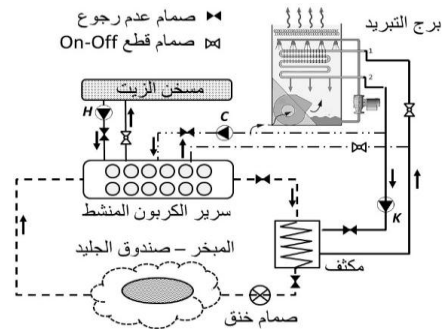
- مبخر حاوٍ على صندوق الجليد.

- برج تبريد مع مضخة K لضخ الماء إلى المكثف، ومضخة C لضخ الماء إلى السرير.

- مسخن زيت مع مضخة H لضخ الزيت الساخن إلى السرير.

- صمامات عدم رجوع وصمامات ON-OFF.

- تيرموستات مركب على سرير الكربون للتحكم بعمل المضخات وصمامات ON-OFF؛ وذلك تبعاً لدرجة الحرارة التصميمية (العظمى والدنيا) للسرير.



الشكل (1) مكونات دائرة التبريد الادمصاصية لإنتاج الجليد.

- انتقال الحرارة مستقر ضمن المبادلات الحرارية الموجودة في الدارة.
- إهمال مقاومة الاحتكاك بين الميثانول ومكونات الدارة كلها.
- إهمال المفاقيد الحرارية على طول الأنابيب.
- عملية الادمصاص/ إزالة الادمصاص تجري عند ضغط ثابت (عملية إيزوبارية).
- سائل وسيط التبريد الخارج من المكثف وبخار وسيط التبريد الخارج من المبخر في حالة إشباع.
- السعات الحرارية ومعاملات انتقال الحرارة ثابتة للحالة الصلبة والسائلة.

4-4- النموذج الرياضي للدارة:

في هذه الفقرة وُضِعَتِ المعادلات التي تمكننا من حساب المواصفات والبارامترات التصميمية الأساسية لدارة التبريد الادمصاصية.

4-4-1- معادلات التوازن الحراري والكتلي لكل مكون من مكونات الدارة:

تمكننا هذه المعادلات من حساب كميات الحرارة (المقدمة والمطروحة من النظام) في كل مرحلة من مراحل الدورة.

- المرحلة I (تسخين السريير بثبات التركيز) $A \rightarrow B$
كمية الحرارة المقدمة لسريير الكربون المنشط:

$$Q_{AB} = (m_s \cdot c_s + x_{max} \cdot m_s \cdot c_a)(T_B - T_A) \quad (1)$$

- المرحلة II (تسخين - تحرير الميثانول - تكاثف)

$B \rightarrow D$

كمية الحرارة المقدمة لسريير الكربون المنشط:

$$Q_{BD} = (m_s \cdot c_s + x_{min} \cdot m_s \cdot c_a)(T_D - T_B) + m_r \cdot \Delta h \quad (2)$$

$$m_r = m_s(x_{max} - x_{min}) \quad (3)$$

ومن ثَمَّ تكون كمية الحرارة المقدمة للسريير خلال مرحلتي التسخين:

ويزداد الضغط في النظام من ضغط التبخر P_E إلى ضغط التكايف P_C مع بقاء تركيز الميثانول في مسامات الكربون المنشط (x_{max}) ثابتاً (العملية $A \rightarrow B$).

المرحلة الثانية:

مع استمرار تقديم الحرارة للسريير ترتفع درجة حرارته من T_B إلى T_D ، كما يُحَرَّرُ الميثانول من مسامات الكربون على شكل بخار، ومن ثَمَّ يتناقص تركيز الميثانول في السريير إلى أدنى قيمة له (x_{min}) (العملية $B \rightarrow D$)، ويتجه بخار الميثانول إلى المكثف ويتكاثف عند درجة حرارة وضغط ثابتين (النقطة C) مطلقاً حرارته إلى ماء التبريد الذي تعمل المضخة K على تدويره بين برج التبريد والمكثف. تجري هذه المرحلة عند ضغط ثابت P_C .

المرحلة الثالثة:

يُرْسَلُ الميثانول المتكاثف إلى المبخر عبر صمام الخنق (العملية $C \rightarrow E$) فينخفض الضغط من P_C إلى P_E ، ومن ثَمَّ تنخفض درجة حرارة الميثانول إلى T_E . تقوم المضخة C في هذه المرحلة بضخ الماء البارد من برج التبريد إلى السريير، ومن ثَمَّ تنخفض درجة حرارته حتى T_F مع بقاء تركيز الميثانول في السريير (x_{min}) ثابتاً (العملية $D \rightarrow F$).

المرحلة الرابعة:

يتبخر الميثانول في المبخر عند درجة حرارة وضغط ثابتين (النقطة E)، ويمتص الحرارة اللازمة لتبخره من الماء المراد تجميده، ويتجه بخار الميثانول إلى السريير حيث يجري ادمصاصه نتيجة استمرار عملية تبريد السريير من T_F إلى T_A (العملية $F \rightarrow A$)؛ ممَّا يؤدي إلى ازدياد تركيز الميثانول في السريير حتى القيمة (x_{max})، وتترافق عملية الادمصاص بإطلاق حرارة (تسمى الحرارة الكامنة للادمصاص) إلى الوسط المحيط (ماء التبريد). تجري هذه المرحلة عند ضغط ثابت P_E .

4-3- افتراضات النموذج الرياضي:

$$Q_{EIVb} = m_{ice} \cdot l_{w/ice} \quad (12)$$

المعادلات موضحة بالتفصيل في المراجع [5,6].

4-4-2- معادلات التوازن الطاقى للدارة:

يمكننا حساب زمن كل مرحلة من المراحل الأربع للمرحلة من خلال معادلات التوازن الطاقى للدارة. إذ قمنا بصياغة هذه المعادلات آخذين بالحسبان مبدأ عمل الدارة.

(a) زمن تحرير الميثانول من السيرير = زمن تكاثفه في المكثف = t_{III} . (لأنَّ عمليتي تحرير الميثانول وتكاثفه يجب أن تحدثا بشكل متزامن).

(b) زمن تبخر الميثانول في المبخر = زمن ادمصاصه في السيرير = t_{IV} . (لأنَّ عمليتي تبخر الميثانول وادمصاصه في السيرير يجب أن تحدثا بأن معاً).

(c) التدفق الحراري إلى السيرير في المرحلة I = التدفق الحراري في المرحلة II. (لأنَّ المضخة H ذات تدفق ثابت).

(d) التدفق الحراري من السيرير في المرحلة III = التدفق الحراري في المرحلة IV. (لأنَّ المضخة C ذات تدفق ثابت).

لدينا معادلة التوازن الطاقى بشكلها الأولي:

$$\dot{Q}_D + \dot{Q}_E = \dot{Q}_A + \dot{Q}_C \quad (13)$$

\dot{Q}_D معدل تدفق الحرارة المقدمة للسيرير خلال مرحلتي التسخين.

\dot{Q}_E معدل تدفق الحرارة المقدمة للمبخر.

\dot{Q}_A معدل تدفق الحرارة المطروحة من السيرير خلال مرحلتي التبريد.

\dot{Q}_C معدل تدفق الحرارة المطروحة من المكثف.

بالأخذ بالحسبان البند (a) و (b) تصبح معادلة التوازن الطاقى بالشكل الآتي:

$$Q_D = Q_{AB} + Q_{BD} \quad (4)$$

كمية الحرارة الكامنة المطروحة خلال عملية التكاثف:

$$Q_C = m_r \cdot [l_{a@T_C} + (C_{P_D} \cdot T_D - C_{P_C} \cdot T_C)] \quad (5)$$

- المرحلة III (تبريد السيرير بثبات التركيز) $D \rightarrow F$:
كمية الحرارة التي يطرحها السيرير:

$$Q_{DF} = (m_s \cdot c_s + x_{min} \cdot m_s \cdot c_a)(T_F - T_D) \quad (6)$$

- المرحلة IV (تبخر - تبريد - ادمصاص الميثانول) $F \rightarrow A$:
كمية الحرارة التي يطرحها السيرير:

$$Q_{FA} = (m_s \cdot c_s + x_{max} \cdot m_s \cdot c_a)(T_A - T_F) + m_r \cdot \Delta h \quad (7)$$

ومن ثَمَّ تكون كمية الحرارة المطروحة من السيرير خلال مرحلتي التبريد:

$$Q_A = Q_{DF} + Q_{FA} \quad (8)$$

تعطى كمية الحرارة الكامنة التي يمتصها الميثانول في المبخر لإنجاز الأثر التبريدي بالعلاقة الآتية:

$$Q_E = m_r \cdot l_{a@T_E} \quad (9)$$

نظراً إلى أن كمية الحرارة التي يمتصها الميثانول تساوي كمية الحرارة التي يطرحها الماء باعتبار أن الضياعات مهملة نستطيع أن نكتب العلاقة الآتية:

$$Q_E = Q_{EIVa} + Q_{EIVb} \quad (10)$$

Q_{EIVa} هي كمية الحرارة التي يمتصها الميثانول من الماء لتتخفض درجة حرارة الماء من درجة حرارة دخوله المبخر حتى 0°C بمقدار ΔT_w . وتعطى بالعلاقة:

$$Q_{EIVa} = m_w \cdot c_w \cdot \Delta T_w \quad (11)$$

Q_{EIVb} هي كمية الحرارة التي يمتصها الميثانول من الماء لتتحول كامل كتلة الماء إلى جليد عند 0°C . وتعطى بالعلاقة:

استطاعة مبرد الماء:

$$\dot{Q}_A = \frac{Q_A}{t_{III}+t_{IV}} \quad (23)$$

4-4-4- معامل الأداء التبريدي للدارة:

$$COP = \frac{Q_E}{Q_D} \quad (24)$$

4-5- حل النموذج الرياضي:

لحل النموذج الرياضي لابدأ أولاً من تحديد مدخلات هذا النموذج بحيث نتمكن بعدها من حل المعادلات السابقة لنحصل بالنتيجة على المواصفات التصميمية الأساسية لدارة التبريد الادمصاصية .

أولاً: المدخلات

تضم مدخلات الموديل الرياضي ما يأتي:

- الشروط التصميمية المفروضة على الدارة.
- مخطط (P-T-X) لزوج (كربون منشط/ ميثانول) [7]. في الملحق المرافق.
- جدول الخواص الترموديناميكية لبخار الميثانول [8]. في الملحق المرافق.
- الخواص الفيزيوقحرارية لكل من الكربون المنشط والميثانول السائل والماء.

● الشروط التصميمية المفروضة على الدارة:

- درجة الحرارة الخارجية لمدينة دمشق 40°C ودرجة الحرارة الرطبة 23°C.
- درجة حرارة دخول الماء إلى الصندوق 20°C.
- المطلوب تجميد 6 kg ماء بدرجة حرارة 0°C ومن ثمّ فإنّ درجة حرارة التبخر تساوي إلى:

$$T_E = 0 - 5 = -5^\circ\text{C}$$

- تبريد المكثف والسرير يكون بواسطة الماء المبرّد في برج التبريد، ونتيجة ذلك نعدّ أنّ درجة حرارة التكاثف تساوي إلى درجة حرارة السرير في نهاية عملية التبريد وتساوي إلى:

$$\frac{Q_D}{t_I+t_{II}} + \frac{Q_E}{t_{IV}} = \frac{Q_A}{t_{III}+t_{IV}} + \frac{Q_C}{t_{II}} \quad (14)$$

بالأخذ بالحسبان البند (c) نكتب:

$$\dot{Q}_{AB} = \dot{Q}_{BD} \rightarrow \frac{Q_{AB}}{t_I} = \frac{Q_{BD}}{t_{II}} \quad (15)$$

بالأخذ بالحسبان البند (d) نكتب:

$$\dot{Q}_{DF} = \dot{Q}_{FA} \rightarrow \frac{Q_{DF}}{t_{III}} = \frac{Q_{FA}}{t_{IV}} \quad (16)$$

إذاً لدينا ثلاث معادلات (14) و(15) و(16) بأربعة مجاهيل

هي: $t_I, t_{II}, t_{III}, t_{IV}$.

لحلها نفرض زمن إحدى المراحل وليكن زمن المرحلة الثانية II ونفرضه مساوياً $t_{II} = 10 \text{ min}$ ومن ثمّ نحصل على المدة الزمنية لكل مرحلة. (سيظهر تأثير فرض هذه القيمة في النتائج إذ إنّهُ بتكبير قيمة t_{II} سيطول زمن الدورة ومن ثمّ ستتنقص استطاعة التجهيزات، والعكس بالعكس).

المدة الزمنية لمرحلتي التسخين تساوي إلى:

$$t_D = t_I + t_{II} \quad (17)$$

المدة الزمنية لمرحلتي التبريد تساوي إلى:

$$t_A = t_{III} + t_{IV} \quad (18)$$

ونحسب زمن الدورة الكلي من العلاقة:

$$t_{cycl} = t_I + t_{II} + t_{III} + t_{IV} \quad (19)$$

4-4-3- معادلات الاستطاعة لتجهيزات الدارة:

استطاعة المكثف:

$$\dot{Q}_C = \frac{Q_C}{t_{II}} \quad (20)$$

استطاعة المبرّد:

$$\dot{Q}_E = \frac{Q_E}{t_{IV}} \quad (21)$$

استطاعة مسخن الزيت:

$$\dot{Q}_D = \frac{Q_D}{t_I+t_{II}} \quad (22)$$

$1800 \cdot 10^3$	Δh (J/kg)
-------------------	-------------------

يبين الجدول (1) الخواص الفيزيوكيميائية لكل من الكربون المنشط والميثانول السائل والماء [6].

ثانياً: نتائج حسابات الدارة:

بُرمج الموديل الرياضي على برنامج Excel، وتم الحصول على نتائج حسابات الدارة متضمنة المواصفات التصميمية الموضحة في الجدول (2).

الجدول (2) نتائج حسابات الدارة.

رقم العلاقة المستخدمة	القيمة	الكمية المحسوبة
(10)	2508	Q_E (kJ)
(5)	3027.47	Q_C (kJ)
(9)	2.12	m_r (kg)
(3)	26.8	m_s (kg)
(1)	1475.17	Q_{AB} (kJ)
(2)	4605.33	Q_{BD} (kJ)
(4)	6080.5	Q_D (kJ)
(6)	1327.73	Q_{DF} (kJ)
(7)	4642.18	Q_{FA} (kJ)
(8)	5969.91	Q_A (kJ)
(15)	3.2	t_I (min)
فرضاً	10	t_{II} (min)
(17)	13.2	t_D (min)
(14),(16)	3.87	t_{III} (min)
(14),(16)	13.53	t_{IV} (min)
(18)	17.39	t_A (min)
(19)	30.6	t_{cycl} (min)
(20)	5045.79	Q_C (W)
(21)	3090.38	Q_E (W)

$$T_C = T_A = T_{wet} + 12 = 35^\circ\text{C}$$

تسخين السريبر يكون بواسطة الزيت وأعلى درجة حرارة يبلغها السريبر هي $T_D = 110^\circ\text{C}$. (حتماً قيمة T_D التي اخترناها يجب أن تكون أكبر من قيمة درجة حرارة بدء التحرير T_B ، ونعلم بأن هناك حدوداً لاختيار T_D إذ سندرس تأثيرها في بحث لاحق).

● نحصل على باقي بارامترات الدورة من مخطط كلايرون (P-T-X) لزوج (AC/methanol) وهي:

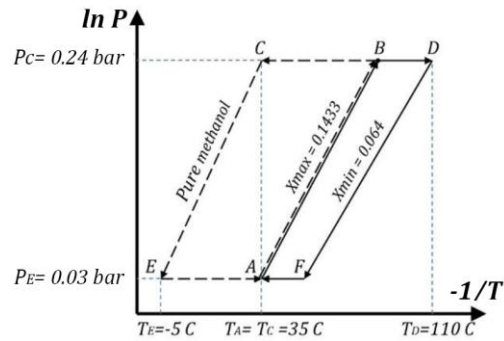
$$T_B = 80.85^\circ\text{C}$$

$$T_F = 60.40^\circ\text{C}$$

$$x_{max} = 0.1433$$

$$x_{min} = 0.0640$$

يبين الشكل (4) تمثيل دورة التبريد الادمصاصية للدارة السابقة على مخطط كلايرون.



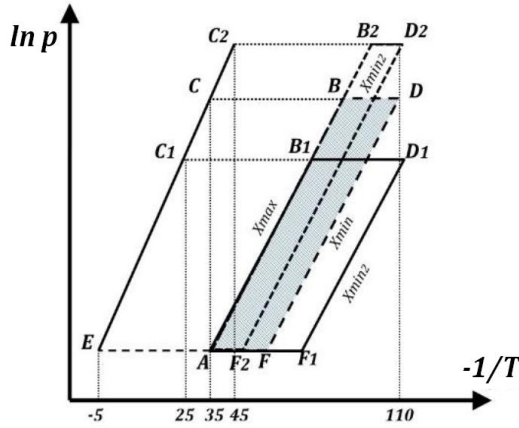
الشكل (4) تمثيل دورة التبريد الادمصاصية

على مخطط كلايرون.

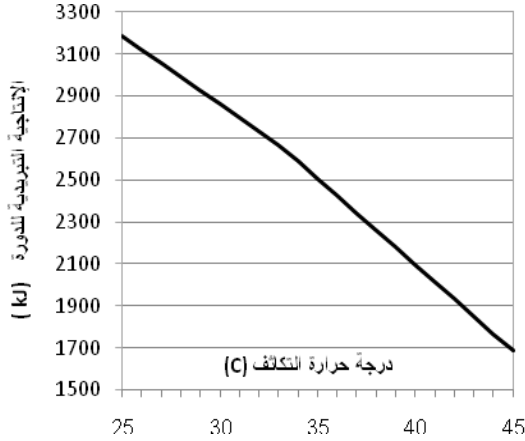
الجدول (1) الساعات الحرارية.

قيمه	المعامل
836	c_s (J/kg.°C)
2545	c_a (J/kg.°C)
4180	c_w (J/kg.°C)
1922	c_{ice} (J/kg.°C)
قيمه	المعامل
$334.4 \cdot 10^3$	$l_{w/ice}$ (J/kg)

التي يبلغها السرير $T_D = 110^\circ\text{C}$ ثابتة فمن ثم فإن T_B تصبح أكثر اقتراباً من T_D كما هو موضح في الشكل (5)، وهذا يعني أن كمية الحرارة المقدمة خلال المرحلة II (مرحلة تحرير الميثانول من السرير) Q_{ED} ستقلص، وهذا يؤدي إلى أن كمية بخار الميثانول المتحررة من السرير m_p ستقلص مما يؤدي إلى انخفاض الإنتاجية التبريدية للدورة Q_E وفقاً للمنحنى المبين في الشكل (6).



الشكل (5) تأثير تغير درجة حرارة التكاثف في عمل دارة التبريد ادمصاصية.



الشكل (6) تغير الإنتاجية التبريدية للدورة تبعاً لدرجة حرارة التكاثف التي تعمل عندها آلة التبريد ادمصاصية.

5-2- تأثير درجة حرارة التكاثف التي تعمل عندها الآلة في زمن إنجاز الدورة الواحدة t_{cycle} .

رقم العلاقة المستخدمة	القيمة	الكمية المحسوبة
(22)	7675.55	$Q_D (W)$
(23)	5720.15	$Q_A (W)$
(24)	0.41	COP

5- دراسة تأثير درجة حرارة التكاثف في الإنتاجية التبريدية لآلة إنتاج الجليد ادمصاصية: هدَفَ هذا البحث إلى:

- دراسة تأثير درجة حرارة التكاثف التي تعمل عندها آلة التبريد ادمصاصية في الإنتاجية التبريدية للدورة الواحدة Q_E .
- دراسة تأثير درجة حرارة التكاثف التي تعمل عندها الآلة في زمن إنجاز الدورة الواحدة t_{cycle} .
- دراسة تأثير درجة حرارة التكاثف التي تعمل عندها الآلة في كمية الجليد الكلية المنتجة خلال مدة زمنية معينة (5 hour).

إن قيمة T_C التي تعمل عندها الآلة تقع ضمن المجال $[25 \div 45^\circ\text{C}]$.

أُجريت الدراسة مع المحافظة على المواصفات التصميمية للدارة ثابتة وهي:

- كمية الكربون المنشط في السرير m_s .
- استطاعة التجهيزات Q_C و Q_D و Q_E .
- درجة حرارة التبخر T_E .
- درجة حرارة بدء التسخين المعير عليها الحساس T_A .
- درجة حرارة نهاية التسخين المعير عليها الحساس T_D .
- أمّا باقي المقادير والبارامترات فهي تتغير تبعاً لقيمة T_C التي تعمل عندها الآلة.

5-1- تأثير درجة حرارة التكاثف التي تعمل عندها آلة التبريد ادمصاصية في الإنتاجية التبريدية للدورة الواحدة Q_E :

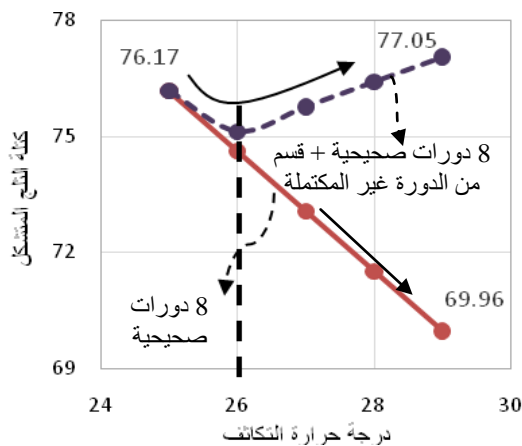
بازدياد T_C تزداد درجة الحرارة T_B التي يبدأ عندها السرير بتحرير الميثانول، ونظراً إلى أن درجة الحرارة العظمى

وجدنا أنه بازياد T_C التي تعمل عندها الآلة تتخفض الإنتاجية التبريدية لدورة العمل الواحدة، لكن بالمقابل ينقص الزمن اللازم لإنجاز هذه الدورة. هذا يعني أن عدد الدورات المنجزة خلال مدة زمنية معينة سيزداد حتماً بازياد T_C التي تعمل عندها الآلة، إذ إن:

$$\text{عدد الدورات المنجزة خلال زمن الإنتاج الكلي} = \text{زمن الإنتاج الكلي} / \text{زمن دورة العمل الواحدة.}$$

أي إن الآلة ستجز خلال زمن الإنتاج الكلي عدداً صحيح من دورات العمل (أي الدورات تكون كاملة بأربع مراحل) فضلاً عن قسم من الدورة غير المنجزة بشكل كامل (وهي الدورة الأخيرة التي لم تكتمل بمراحلها الأربع نتيجة انتهاء زمن العمل المفروض).

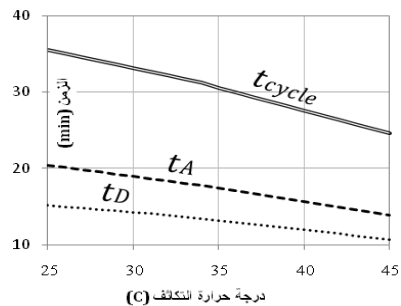
في الشكل (8) قمنا برسم منحنيين، المنحنى المستمر يمثل كمية الجليد المنتجة خلال 5 ساعات؛ وذلك مع ازدياد درجة حرارة التكايف آخذين بالحسبان فقط العدد الصحيح من الدورات (هنا تنجز الآلة 8 دورات صحيحة)، أما المنحنى المنقط فهو يمثل كمية الجليد المنتجة خلال 5 ساعات؛ وذلك مع ازدياد درجة حرارة التكايف آخذين بالحسبان العدد الكلي من الدورات (أي أخذنا بالحسبان الدورة الأخيرة غير المكتملة).



- وجدنا سابقاً أن ازدياد T_C أدى إلى ازدياد درجة الحرارة T_B التي يبدأ عندها السرير بتحرير الميثانول، ومن الشكل (5) نجد أن النقطة B أصبحت أكثر ابتعاداً عن A وأكثر اقتراباً من D، هذا يعني أن زمن المرحلة الأولى $t_{AB} = t_I$ سيزداد في حين زمن المرحلة الثانية $t_{BD} = t_{II}$ سينقص، ولكن بالمحصلة وجدنا أن زمن مرحلتي التسخين t_D سينقص وفق المنحنى المبين في الشكل (7).

- كما أن ازدياد T_C أدى إلى انخفاض درجة الحرارة T_F التي يبدأ عندها السرير بادمصاص الميثانول، ومن الشكل (5) نجد أن النقطة F أصبحت أكثر ابتعاداً عن D وأكثر اقتراباً من A، هذا يعني أن زمن المرحلة الثالثة $t_{DF} = t_{III}$ سيزداد في حين زمن المرحلة الرابعة $t_{FA} = t_{IV}$ سينقص ولكن بالمحصلة وجدنا أن زمن مرحلتي التبريد t_A سينقص، وفق المنحنى المبين في الشكل (7).

- إذاً بالنتيجة وجدنا أن زمن إنجاز الدورة t_{cycle} سينقص بازياد T_C التي تعمل عندها الآلة؛ وذلك وفق المنحنى المبين في الشكل (7).



الشكل (7) تغير زمن إنجاز الدورة تبعاً لدرجة حرارة التكايف التي تعمل عندها آلة التبريد الادمصاصية.

3-5- تأثير درجة حرارة التكايف التي تعمل عندها الآلة في كمية الجليد الكلية المنتجة خلال مدة زمنية (5 hour):

الانتقال من 10 إلى 11 دورة ازدادت كمية الجليد المنتجة بمقدار 3.6 kg ، وعند الانتقال من 11 إلى 12 دورة ازدادت كمية الجليد المنتجة بمقدار 2.4 kg . لكن من المنحنيات البيانية في الشكل (9) يتضح أيضاً أن بازياد درجة حرارة التكايف تنقص الإنتاجية الكلية من الجليد مادامت الآلة تنجز العدد نفسه من الدورات. إذ وجدنا أن إنتاج الجليد قد نقص بمقدار $(69.96 - 76.17) \text{ kg}$ عندما أنجزت الآلة 8 دورات (انظر كذلك إلى الشكل (8) والجدول (3))، ونقص بمقدار 9.5 kg عندما أنجزت الآلة 9 دورات، ونقص بمقدار 10 kg عندما أنجزت الآلة 10 دورات، ونقص بمقدار 8 kg عندما أنجزت الآلة 11 دورة.

أما بالنسبة إلى المنحنيات التي تمثل إنتاج الجليد خلال العدد الكلي من الدورات.

وجدنا كما ذكرنا سابقاً أنه عندما تبدأ مرحلة الإنتاج التبريدي (المرحلة الرابعة) في الدورة الأخيرة غير المكتملة بالظهور ستزداد كمية الجليد المنتجة تبعاً للمقدار المنجز من هذه المرحلة، وذلك على الرغم من ازدياد درجة حرارة التكايف التي تعمل عندها الآلة.

الجدول (3) يوضح بالأرقام ما شرحناه سابقاً.

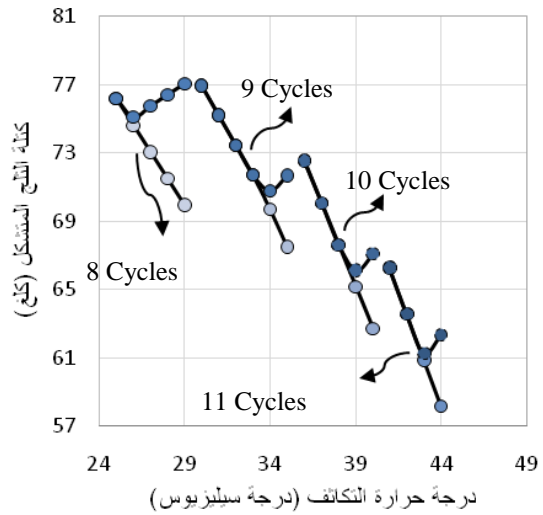
الجدول (3) كمية الجليد المنتجة كتابع لدرجة حرارة

التكايف التي تعمل عندها الآلة ولعدد الدورات المنجزة.

درجة حرارة التكايف	عدد الدورات الصحيحة	كمية الجليد المنتجة خلال العدد الصحيح من الدورات	عدد الدورات الكلي	زمن الإنتاج التبريدي للفترة المنجز من الدورة الأخيرة	كمية الجليد المنتجة خلال العدد الكلي من الدورات
[c]		[kg]		[min]	[kg]
25	8	76.17	8.43	0	76.17
26	8	74.62	8.55	0.90	75.12
27	8	73.07	8.66	4.87	75.12

الشكل (8) كمية الجليد المنتجة خلال الزمن الكلي للإنتاج كتابع لدرجة حرارة التكايف لعدد دورات ثابتة (8 دورات).

وجدنا أن المنحنى المنقط ينطبق على المنحنى المستمر مادامت أن الدورة الأخيرة غير المكتملة لم تبلغ مرحلة الإنتاج التبريدي (المرحلة الرابعة)، وفي حال بلوغ الدورة الأخيرة غير المكتملة مرحلة الإنتاج التبريدي سيفصل المنحنى المنقط عن المنحنى المستمر ويبدأ بالصعود (وذلك بسبب بدء عملية إنتاج الجليد وازدياد الكمية المنتجة منه تبعاً لمقدار زمن الدخول في مرحلة الإنتاج التبريدي). بالطريقة نفسها رُسمت المنحنيات الموضحة في الشكل (9).



الشكل (9) كمية الجليد المنتجة خلال الزمن الكلي للإنتاج كتابع لدرجة حرارة التكايف.

بالنسبة إلى المنحنيات التي تمثل إنتاج الجليد خلال العدد الصحيح فقط من الدورات وجدنا أن بازياد درجة حرارة التكايف من 25°C إلى 45°C يزداد عدد الدورات التي تنجزها الآلة خلال 5 ساعات من 8 إلى 12 دورة. واستنتجنا الآتي:

عند الانتقال من 8 إلى 9 دورات ازدادت كمية الجليد المنتجة بمقدار 7 kg ، وعند الانتقال من 9 إلى 10 دورات ازدادت كمية الجليد المنتجة بمقدار 5 kg ، وعند

76.41	8.83	8.79	71.51	8	28
77.05	12.79	8.91	69.96	8	29
76.96	0	9.04	76.96	9	30
75.21	0	9.17	75.21	9	31
73.46	0	9.31	73.46	9	32
71.71	0	9.45	71.71	9	33
70.79	1.95	9.61	69.71	9	34
71.69	7.55	9.80	67.50	9	35

(4) وجدنا أن زمن الدورة اللازم لإنتاج 6 kg جليداً هو 32 min تقريباً، فإذا كان الإنتاج اليومي المطلوب من الجليد أكبر عندئذٍ يجب إنقاص زمن الدورة (أي يجب إنقاص الزمن المفروض t_{II})، وفي هذه الحالة يجب زيادة استطاعة التجهيزات أو زيادة كمية الكربون المنشط، وهذا ما يجعل الكلفة التأسيسية أكبر.

(5) وجدنا من جدول النتائج (2) أن كمية الحرارة المطروحة من السيرير خلال مرحلتي التبريد Q_A أعلى من كمية الحرارة المطروحة خلال عملية التكاثف Q_C بقرابة 50% ، لذلك حُسِبَتْ استطاعة برج التبريد على أساس كمية الحرارة المطروحة من السيرير خلال عملية تبريده وليس على أساس كمية الحرارة المطروحة من المكثف. كما أن الحرارة العالية الناتجة عن عملية الادمصاص Q_{FA} تجعل من الضروري التركيز على دراسة بنية السيرير من حيث المواد والتصميم لتجنب الإجهادات الحرارية.

(6) بازدياد T_C تناقصت كمية الحرارة المقدمة خلال مرحلة تحرير الميثانول Q_{BD} ، ومن ثمَّ انخفضت كمية الميثانول المحررة m_r ما أدى إلى انخفاض الإنتاجية التبريدية Q_E ، ولكي نحصل على الإنتاجية التبريدية المطلوبة تجب زيادة درجة الحرارة العظمى T_D التي يبلغها السيرير، وذلك بتغيير الحساس على قيمة أعلى من $110\text{ }^\circ\text{C}$ آخذين بالحسبان أنه عند درجات حرارة أعلى من $150\text{ }^\circ\text{C}$ يدخل الكربون المنشط كوسيط كيميائي في تفاعل تفكك الميثانول.

(7) لزيادة كمية الميثانول المحررة تجب زيادة كمية الحرارة المقدمة للسيرير خلال عملية التسخين، وهذا لا يشكل عبئاً اقتصادياً إضافياً إذا كانت الحرارة المقدمة هي من الغازات الساخنة الناتجة عن العمليات الصناعية، وفي هذه الحالة ستكون زيادة الإنتاجية التبريدية هي أكثر أهمية من زيادة معامل الأداء التبريدي.

6- النتائج والتوصيات:

- (1) إنَّ الدارة الادمصاصية التي دُرِسَتْ في هذا البحث تُنتجُ فيها البرودة بشكل متقطع، وهذا ما يجعل مثل هذه الدارات مناسبة لتعمل على الطاقة الشمسية بشكلٍ مباشر دون الحاجة إلى خزانات حرارية، إذ تجري عملية (التسخين - وتحرير وسيط التبريد - وتكاثف) خلال النهار وعملية (التبريد - وادمصاص وسيط التبريد - وتبخر) في الليل. في هذه الحالة يُستبدلُ المكثف المائي بمكثف هوائي ويُستغنى عن صمام الخنق لأن انخفاض الضغط في النظام سيحدث نتيجة التبريد ليلاً.
- (2) للحصول على عملية تبريد مستمرة يجب استخدام آلة بسريرين على الأقل، وهناك تطبيقات مختلفة لدارات ادمصاصية متعددة الأسرّة.
- (3) وجدنا عند تصميم هذه الدارة أن كتلة الكربون المنشط المطلوبة $m_s = 27\text{ kg}$ ، وهي كتلة كبيرة جداً مقارنةً بالأثر التبريدي المحدث، وهو تجميد 6 kg من الماء خلال دورة واحدة تستغرق من الزمن (32 min) ، ومن ثمَّ فإنَّ الوزن الكبير للمادة الادمصاصية يجعل مثل هذه الدارات غير مناسبة للاستطاعات العالية.

(8) بازدياد درجة حرارة التكايف التي تعمل عندها الآلة تتخفض الإنتاجية التبريدية لدورة العمل الواحدة، لكن بالمقابل ينقص الزمن اللازم لإنجاز هذه الدورة هذا يعني أن عدد الدورات المنجزة خلال زمن الإنتاج الكلي سيزداد حتماً، ومن ثم فإن درجة حرارة التكايف ليست هي البارامتر الوحيد الذي يؤثر في كمية الجليد المنتجة خلال زمن الإنتاج الكلي، وإنما يتفاعل معه عامل آخر هو عدد الدورات الكلية المنجزة.

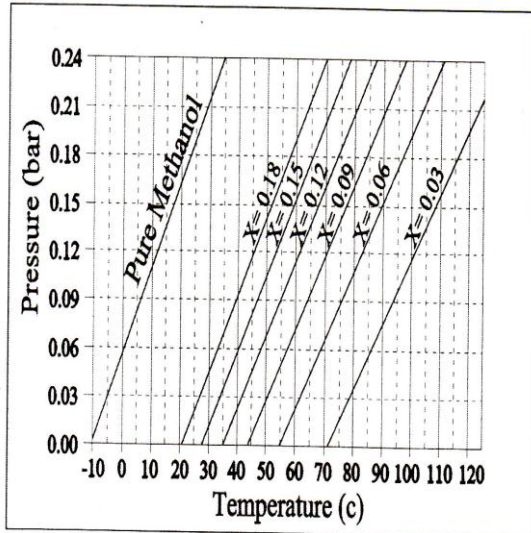
(9) عندما تعمل الآلة عند درجة حرارة تكايف أعلى ستنجز عدد أكبر من الدورات خلال المدة الزمنية نفسها. وبالأخذ بالحسبان العدد الصحيح فقط من الدورات وجدنا أنه عند الانتقال إلى عدد أكبر من الدورات ازدادت الإنتاجية الكلية من الجليد.

(10) إذا عملت الآلة عند درجة حرارة تكايف أعلى ليس بالضرورة أن يكون إنتاجها الكلي من الجليد أقل وذلك عند الأخذ بالحسبان العدد الكلي من الدورات المنجزة. على سبيل المثال وجدنا من خلال المنحنى البياني في الشكل (8) ومن الجدول (3) أنه قد أُنتج 70.8 kg جليداً خلال 5 ساعات عندما عملت الآلة درجة حرارة تكايف 34°C ، في حين أُنتجت كمية أكبر من الجليد مقدارها 71.7 kg عند درجة حرارة تكايف أعلى 35°C .

(11) باختلاف زمن الإنتاج الكلي سيختلف المنحنى البياني الذي يمثل العلاقة بين (T_C, m_{ice}) تبعاً لعدد الدورات الكلية المنجزة خلال زمن الإنتاج الكلي.

(12) من الجدير بالذكر أن هذه الآلة غير اقتصادية إذ إن كلفتها التأسيسية كبيرة جداً، ومعامل أدائها التبريدي منخفض جداً مقارنةً بآلات التبريد الضاغطة البخارية وآلات التبريد ادمصاصية، وتعمل البحوث الحديثة في هذا المجال على خفض الكلفة التأسيسية ورفع معامل الأداء لهذه الدارة.

الملحق



مخطط كلايرون لزوج (الكربون المنشط - ميثانول) [7]

جدول الخواص الترموديناميكية للميثانول [8]

T (°C)	Latent Heat (kJ/kg)	Liquid Density (kg/m ³)	Vapor Density (kg/m ³)	Vapor Pressure (bar)	Vapor Specific Heat (kJ/kg°C)
-50	1194	844	0.01	0.01	1.20
-30	1187	834	0.01	0.02	1.27
-10	1182	819	0.04	0.04	1.34
10	1175	801	0.12	0.10	1.40
30	1155	782	0.31	0.25	1.47
50	1125	764	0.77	0.55	1.54
70	1085	746	1.47	1.31	1.61
90	1035	724	3.01	2.69	1.79
110	980	704	5.64	4.98	1.92
130	920	685	9.81	7.86	1.92
150	850	653	15.9	8.94	1.92

قائمة الرموز:

m_s	كتلة الكربون المنشط.....	kg
m_r	كتلة الميثانول الدوّارة في الدارة....	kg
m_w	كتلة الماء المراد تجميده.....	kg
c_s	السعة الحرارية للكربون المنشط.....	J/kg.°C
c_a	السعة الحرارية للميثانول السائل.....	J/kg.°C
c_w	السعة الحرارية للماء السائل.....	J/kg.°C
c_{ice}	السعة الحرارية للماء المتجمد.....	J/kg.°C
$l_{a@TE}$	الحرارة الكامنة لتبخّر الميثانول عند درجة حرارة التبخّر.....	J/kg
$l_{a@TC}$	الحرارة الكامنة لتكاثف الميثانول عند درجة حرارة التكاثف.....	J/kg
Δh	الحرارة الكامنة للادمصاص/ إزالة ادمصاص.....	J/kg
$l_{w/ice}$	الحرارة الكامنة لتجمد/ انصهار الماء.....	J/kg
T_C	درجة حرارة التكاثف.....	°C
T_E	درجة حرارة التبخّر.....	°C
T_A	درجة حرارة السرير عند بدء التسخين.....	°C
T_B	درجة حرارة السرير التي يبدأ عندها تحرير الميثانول.....	°C
T_D	أعلى درجة حرارة يبلغها السرير....	°C
T_F	درجة حرارة السرير التي يبدأ عندها ادمصاص الميثانول.....	°C
x_{max}	التركيز الأعظمي للميثانول في سرير الكربون لمنشط.....	g/g
x_{min}	التركيز الأصغري للميثانول في سرير الكربون المنشط.....	g/g
t_I	زمن المرحلة الأولى.....	sec
t_{II}	زمن المرحلة الثانية.....	sec
t_{III}	زمن المرحلة الثالثة.....	sec
t_{IV}	زمن المرحلة الرابعة.....	sec
t_{cycl}	زمن الدورة كاملة.....	sec

*المراجع

- [1] Dieng, A. O., Wang, R. Z. (2001) "*Literature Review on Solar Adsorption Technologies for Ice-Making and Air-Conditioning Purposes and Recent Developments in Solar Technology*," Renewable & Sustainable Energy Reviews Journal, 5, 313-342.
- [2] Lewis, J. S., Chaer, I., and Tassou, S. A. (2007), "*Fostering the Development of Technologies and Practices to Reduce the Energy Inputs into the Refrigeration of Food*," Reviews of Alternative Refrigeration Technologies.
- [3] Schawe, D., (2000), "*Theoretical and Experimental Investigations of an Adsorption Heat Pump with Heat Transfer between Two Absorbers*," Ph.D. thesis, University of Stuttgart.
- [4] Boubakri, A, (2005), "*Performance of an Adsorptive Solar Ice Maker Operating with a Single Double Function Heat Exchanger (Evaporator/Condenser)*," Renewable Energy Journal 31, 1799-1812.
- [5] Khattab, N. M., (2004), "*A Novel Solar-Powered Adsorption Refrigeration Module*," Applied Thermal Engineering Journal, 24, 2747-2760.
- [6] S. Vasta^a, G. Maggio^a, G. Santori^b, A. Freni^a, F. Polonara^b and G. Restuccia^a (2008) "*An adsorptive solar ice-maker dynamic simulation for north mediterranean climate*".
- [7] Alghoul, M. A., Sulaiman, M. Y., Sopian, K., Yahya, M., and Zaharim, A., (2008), "*Potential of Malaysian Activated Carbon in Dual Purpose Adsorption System*," Proceeding of the 7th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering, Proceeding of ICOSSE'08.
- [8] NIST Organization, Thermo-physical Properties of liquid and Gases.