



الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الميكانيك العام

إمكانية تطوير سير الادمصاص في آلة التبريد الادمصاصية وتقييم التأثير على أداء الآلة

أطروحة مقدمة لنيل درجة الدكتوراه في هندسة التبريد

إعداد الطالبة المهندسة رانيا أوري

إشراف الأستاذ الدكتور المهندس وجيه ناعمة

العام الدراسي
2021-2020

كلمة شكر

كل الشكر والثناء الذين منحونا الكثير من ذواتهم والمزيد من وقتهم، ومهدوا لنا طريق العلم والبحث. وكل الامتنان لاساترتنا الكرام الذين اغنوا نفوسنا بالامل وملئوها بالثقة وعززوا فينا حب العمل الجاد. واتقوا بالشكر الجزيل إلى...

الدكتور وجهه ناعمة

الذي منحني خلاصة فكره وعمله فكان عوناً لي على تخطي الصعاب والمشكلات والذي بفضل وأشرف على هذه الرسالة، مع تمنياتي له بولافرا النجاح والتوفيق.

كما أتوجه بالشكر إلى...

الدكتور فهد بن مخبر

الدكتور محمد سعيد الجراح

الدكتور فهد ياسين

الدكتور محمد باكير

لقبولهم التحكيم على هذه الرسالة المتواضعة وإسراء النصح والملاحظات التي اُخذت هذا العمل.

إهداء

إِلَى مَنْ تَقاسمُوا معي حُلْمَ الْحَيَاةِ وَمَرْهَا
إِلَى مَنْ أَسْعَرَ بِاللَّامَةِ مَعَهُمِ وَالِدُفٌ قُرْبَهُمْ
إِلَى مَنْ أَسْخَطُوا فَأَجْزَلُوا الْعَطَاءَ وَلَمْ يَنْتَفِرُوا الْخِزَاءَ

عائِلَتِي الْغَالِيَةِ

إِلَى رِفَاقِ وَرَبِّي وَأَصْدِقَاءِ مَسِيرَتِي
إِلَى مَنْ أَعْمَلُ لَهُمُ الْفَحْلَ الذَّكَرَ بَاسٍ فِي قَلْبِي
إِلَى كُلِّ مَنْ قَدَّمَ لِي الدَّرَجَةَ وَالْمُسَانَدَةَ

أَصْدِقَائِي الْأَوْفَاءُ

استناداً إلى اللائحة التنفيذية لقانون تنظيم الجامعات الصادر بالمرسوم رقم /250/ لعام 2006. وبناءً على قرار مجلس كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية رقم /4151/ تاريخ 2021/6/6، وعلى قرار مجلس البحث العلمي والدراسات العليا /2904/ م.ب.د تاريخ 2021/8/30 تمّ الموافقة على تأليف لجنة الحكم على أطروحة الدكتوراه التي أعدتها الطالبة رانيا أوري في قسم هندسة الميكانيك العام بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بعنوان:

إمكانية تطوير سرير الادمصاص في آلة التبريد الادمصاصية وتقييم التأثير على أداء الآلة

السادة أعضاء لجنة الحكم:

د. نديم مخير	أستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق	الاختصاص: هندسة التبريد وانتقال الحرارة	عضواً رئيساً
د. محمد سعيد الجراح	أستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق	الاختصاص: انتقال الحرارة لسوائل التبريد	عضواً
د. وجيه ناعمة	أستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق	الاختصاص: هندسة التبريد والتكييف	عضواً مشرفاً
د. نصر ياسين	أستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق	الاختصاص: الترموديناميك	عضواً
د. محمد باكير	أستاذ مساعد في قسم هندسة الميكانيك العام	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة البعث	الاختصاص: الترموديناميك	عضواً

اجتمعت لجنة الحكم علنياً في تمام الساعة الحادية عشرة من يوم الاثنين 2021/11/15، وتمّ الاستماع إلى دفاع الطالبة وقبول هذه الرسالة والحكم بالإجماع على أهلية الطالبة رانيا أوري لنيل درجة الدكتوراه في هندسة التبريد.

وتمّت التعديلات وفق ما طُلب من السادة أعضاء لجنة الحكم.

فهرس المحتويات

1	 فهرس المحتويات
6	 قائمة الأشكال
10	 قائمة الجداول
13	 قائمة الرموز
18	 الملخص
19	 المقدمة

الفصل الأول

23	 مشكلة البحث وأهميته	1-1
24	 الدّراسة المرجعيّة	2-1
35	 هدف البحث	3-1
36	 الجديد في بحثنا	4-1

الفصل الثاني: الادمصاص ودارات التبريد الادمصاصيّة

38	 لمحة تاريخية عن الأنظمة الادمصاصيّة	1-2
40	 آلات التبريد الحرارية	2-2
40	 آلات التبريد القاذفة للبخار	1-2-2
41	 آلات التبريد الادمصاصيّة	2-2-2
43	 ظاهرة الادمصاص	3-2
43	 الادمصاص الفيزيائي	1-3-2
44	 الادمصاص الكيميائي	2-3-2
45	 الأزواج العاملة	4-2
46	 دارة التبريد الادمصاصيّة	5-2
46	 مبدأ دارة التبريد الادمصاصيّة	1-5-2
46	 الأجزاء الرئيسيّة لدارة تبريد ادمصاصيّة	2-5-2
47	 الدّورة الترموديناميكية وآليّة عمل الدّارة	3-5-2
49	 معادلات التوازن الحراري والكتلي	4-5-2
50	 توازن الادمصاص	6-2

53	7-2	تقنيات التبريد الادمصاصي
53	1-7-2	دورة تبريد ادمصاصية مع استرجاع حراري
55	2-7-2	دورة تبريد ادمصاصية مع استرجاع للكتلة والحرارة
57	8-2	المواد الادمصاصية
57	1-8-2	العوامل المؤثرة في اختيار المادة الادمصاصية
57	2-8-2	الخواص السطحية للمواد الادمصاصية
59	3-8-2	الخواص الفيزيوقحرارية للمواد الادمصاصية
59	1-3-8-2	كثافة المادة الادمصاصية
61	2-3-8-2	الموصلية الحرارية للمادة الادمصاصية
62	3-3-8-2	الموصلية الحرارية الفعالة للمادة الادمصاصية
64	9-2	المواد المدمصة
64	10-2	محاسن نظام التبريد الادمصاصي ومساوئه

الفصل الثالث: تصنيع منصّة الاختبار والتجارب المخبرية

67	1-3	الهدف من جهاز الاختبار
67	2-3	أجزاء جهاز الاختبار
67	3-3	تصنيع جهاز الاختبار
69	4-3	آلية تشغيل جهاز الاختبار
74	5-3	الإجراءات التجريبية
	1-5-3	اختبار سعة ادمصاص الزوج العامل عند ضغط ثابت
74		ودرجات حرارة مختلفة
74	1-1-5-3	تجارب الادمصاص
	2-1-5-3	حساب سعة الادمصاص للزوج المختبر تبعاً
78		لنمط الادمصاص
	2-5-3	اختبار سعة ادمصاص الزوج العامل عند درجة حرارة ثابتة
81		وضغوط مختلفة
81	6-3	مبدأ إنشاء مخطط $(P - T - x)$ لزوج ادمصاصي معيّن

الفصل الرابع: تصميم سرير الادمصاص في دارة تبريد لإنتاج الجليد

84	1-4	أجزاء دارة التبريد الادمصاصية
85	2-4	توصيف وعاء الادمصاص

86	الشروط التصميمية الحرارية للدارة	3-4
87	الافتراضات المعتمدة في الدراسة	4-4
87	تمثيل دورة التبريد للزوج العامل على مخطط $(P - T - x)$	5-4
90	تصميم دارة التبريد	6-4
90	1-6-4 تصميم النموذج الأولي لوعاء الادمصاص	
97	2-6-4 انتقال الحرارة في وعاء الادمصاص	
106	3-6-4 الحسابات الحرارية لدارة إنتاج الجليد	
الفصل الخامس: تطوير سرير الادمصاص وتقييم التأثير على آلة التبريد الادمصاصية		
113	1-5 دراسة تأثير نوع الزوج العامل على أداء دارة التبريد الادمصاصية	
	1-1-5 تأثير نوع الزوج العامل على كتلة الجليد المنتجة خلال دورة واحدة	
119	2-1-5 تأثير نوع الزوج العامل على معامل انتقال الحرارة الكلي لسرير الادمصاص	
119	3-1-5 تأثير نوع الزوج العامل على زمن نصف الدورة	
121	4-1-5 تأثير نوع الزوج العامل على مؤشرات الأداء للدارة الادمصاصية	
121	2-5 دراسة تأثير استبدال الريشة الخارجية المسطحة بريشة متعرجة على أداء دارة التبريد الادمصاصية	
122	1-2-5 تأثير استبدال الريشة الخارجية المسطحة بريشة متعرجة على كتلة الجليد المنتجة خلال دورة واحدة	
126	2-2-5 تأثير استبدال الريشة الخارجية المسطحة بريشة متعرجة على معامل انتقال الحرارة الكلي لسرير الادمصاص	
126	3-2-5 تأثير استبدال الريشة الخارجية المسطحة بريشة متعرجة على زمن نصف الدورة	
127	4-2-5 تأثير استبدال الريشة الخارجية المسطحة بريشة متعرجة على مؤشرات الأداء للدارة الادمصاصية	
127	3-5 دراسة تأثير زيادة عدد الريش الخارجية للمبادل على أداء دارة التبريد الادمصاصية	
129	1-3-5 تأثير زيادة عدد الريش الخارجية على معامل انتقال الحرارة الكلي لسرير الادمصاص	
130		

132	2-3-5	تأثير زيادة عدد الريش الخارجية على زمن نصف الدورة
	3-3-5	تأثير زيادة عدد الريش الخارجية على مؤشرات الأداء للدّارة
132		الادمصاصيّة
	4-5	دراسة تأثير إضافة ريش نصف قطريّة ضمن أنابيب المبادل وزيادة عددها
133		على أداء دارة التبريد الادمصاصيّة
	1-4-5	تأثير زيادة عدد الريش النصف قطريّة على نوع الجريان لسائل
136		نقل الحرارة ضمن أنابيب المبادل
	2-4-5	تأثير زيادة عدد الريش النصف قطريّة على معامل انتقال
137		الحرارة الكلي لسرير الادمصاص
138	3-4-5	تأثير زيادة عدد الريش النصف قطريّة على زمن نصف الدورة.
	4-4-5	تأثير زيادة عدد الريش النصف قطريّة على هبوط الضغط في
139		الأنابيب
	5-4-5	تأثير زيادة عدد الريش النصف قطريّة على مؤشرات الأداء
139		للدّارة
140	5-5	تأثير الاسترجاع الحراري والكتلي على أداء دارة التبريد الادمصاصيّة.....
141	1-5-5	تأثير الاسترجاع الحراري على أداء دارة التبريد الادمصاصيّة..
144	2-5-5	تأثير الاسترجاع الكتلي على أداء دارة التبريد الادمصاصيّة...
	3-5-5	تأثير عملية استرجاع كتلي تليها عملية استرجاع حراري على
148		أداء دارة التبريد الادمصاصيّة.....
	4-5-5	مقارنة الدّورة الأساسيّة OR مع دورات استرجاع حراري HR
150		واسترجاع كتلي MR واسترجاع كتلي ثم حراري MHR
	5-5-5	تأثير عملية استرجاع حراري تليها عملية استرجاع كتلي على
154		أداء دارة التبريد الادمصاصيّة
	6-5-5	تأثير ازدياد درجة حرارة السّريّر البارد في نهاية عمليّة
		الاسترجاع الحراري على معامل الأداء لدورة مع استرجاع
		حراري HR ودورة مع استرجاع كتلي ثم حراري MHR ودورة
156		مع استرجاع حراري ثم كتلي HMR
161	6-5	البرنامج الحاسوبي

الفصل السادس: النتائج والتوصيات

163	 النتائج	1-6
166	 مقارنة نتائج الأطروحة مع نتائج أبحاث سابقة	2-6
170	 الاستنتاجات والتوصيات	3-6
171	 المراجع	
176	 الملاحق	
181	 الملخص (باللغة الإنجليزية)	

قائمة الأشكال

الصفحة	الفصل الأول
24-33	الشكل (1-1) حتى الشكل (9-1) أشكال تابعة للدراسة المرجعية
	الفصل الثاني
40	الشكل (1-2) أجزاء آلة التبريد القاذفة للبخر
42	الشكل (2-2) أجزاء آلة التبريد الادمصاصية
47	الشكل (3-2) الأجزاء الرئيسية لدارة تبريد ادمصاصية
48	الشكل (4-2) الدورة الترموديناميكية لدارة تبريد ادمصاصية
49	الشكل (5-2) دارة تبريد ادمصاصية بسريرين ذات إنتاج تبريدي مستمر
	الشكل (6-2) إيزوتيرمات الادمصاص للزوج (MaxsorbIII/methanol) عند درجات حرارة مختلفة
53	
54	الشكل (7-2) نظام التبريد الادمصاصي المستمر بسريرين مع استرجاع حراري
54	الشكل (8-2) الدورة الترموديناميكية لنظام ادمصاص بسريرين مع استرجاع حراري
55	الشكل (9-2) نظام التبريد الادمصاصي المستمر بسريرين مع استرجاع كتلي
56	الشكل (10-2) دورة تبريد ادمصاصية مع استرجاع كتلي وحراري
58	الشكل (11-2) هيكلية المسام في حبيبة مادة ادمصاصية
60	الشكل (12-2) صورة مجهرية إلكترونية للكربون المنشط المسحوق نوع Maxsorb III
	الشكل (13-2) الكربون المنشط الليفي نوع Busofit : صورة مكبرة 50 مرة، 1000 مرة، 50000 مرة
60	
61	الشكل (14-2) النماذج الثلاث للكربون المنشط المركب بعد الادمصاص
63	الشكل (15-2) نمذجة الوسط المسامي
	الفصل الثالث
70	الشكل (1-3) المخطط الرمزي لجهاز الاختبار
71	الشكل (2-3) مراحل تصنيع وتركيب سرير الكربون المنشط

72	أجزاء جهاز الاختبار المصنَّع	الشكل (3-3)
76	تغيّر T_{w2} و T_{ads} كتابع للزمن عند نمط ادمصاص 25°C للزوج ACG/R 134a	الشكل (4-3)
77	تغيّر T_{w2} و T_{ads} كتابع للزمن عند نمط ادمصاص 35°C للزوج ACG/R 134a	الشكل (5-3)
77	تغيّر T_{w2} و T_{ads} كتابع للزمن عند نمط ادمصاص 45°C للزوج ACG/R 134a	الشكل (6-3)
79	مقطع عرضي في وعاء الكربون	الشكل (7-3)
80	إيزوبارات الادمصاص للزوجين ACG/R134a و ACG/R407C عند ضغط 70 psi	الشكل (8-3)
81	إيزوتيرمات الادمصاص للزوجين ACG/R134a و ACG/R407C عند درجة حرارة 35°C	الشكل (9-3)
82	إنشاء مخطط (P-T-x) لزوج ادمصاصي ضمن مجال الضغط $[P_1 \div P_2]$	الشكل (10-3)
الفصل الرابع		
85	أجزاء دائرة التبريد الادمصاصية	الشكل (1-4)
86	مقطع عرضي وطولي في وعاء الادمصاص	الشكل (2-4)
88	دورة التبريد للزوج العامل ACG/R134a	الشكل (3-4)
88	دورة وسيط التبريد R134a خارج السرير	الشكل (4-4)
97	انتقال الحرارة ودرجات الحرارة التصميمية ضمن وعاء الادمصاص	الشكل (5-4)
104	الرّيشة المربعة والرّيشة النصف قطرية المكافئة لها	الشكل (6-4)
الفصل الخامس		
116	تمثيل دورة التبريد للزوج (ACG/R134a) وتحديد النقاط B و F	الشكل (1-5)
116	تمثيل دورة التبريد للزوج (ACF - A20/ R 134a) وتحديد النقاط B و F	الشكل (2-5)
116	تمثيل دورة التبريد للزوج (MaxsorbIII/ R 134a) وتحديد النقاط B و F	الشكل (3-5)
117	تمثيل دورة التبريد للزوج (Busofit /Ammonia) وتحديد النقاط B و F	الشكل (4-5)
120	تأثير نوع الزوج العامل على كتلة الجليد المنتجة خلال دورة واحدة	الشكل (5-5)
120	تأثير نوع الزوج العامل على معامل انتقال الحرارة الكلي لسرير الادمصاص	الشكل (6-5)
121	تأثير نوع الزوج العامل على زمن نصف الدّورة	الشكل (7-5)

122	الشكل (5-8)	تأثير نوع الزوج العامل على مؤشرات الأداء للدّارة
123	الشكل (5-9)	توضّع الرّيش الخارجيّة على أنابيب المبادل
123	الشكل (5-10)	المواصفات الهندسيّة للرّيشة المتعرّجة
124	الشكل (5-11)	حساب مساحة سطح الرّيشة المتعرّجة
	الشكل (5-12)	تأثير تغيير الرّيشة الخارجيّة من مسطّحة إلى متعرّجة على معامل انتقال الحرارة
127		للسّير
128	الشكل (5-13)	تأثير تغيير الرّيشة الخارجيّة من مسطّحة إلى متعرّجة على زمن نصف الدّورة....
128	الشكل (5-14)	تأثير تغيير الرّيشة الخارجيّة من مسطّحة إلى متعرّجة على مؤشرات الأداء للدّارة
131	الشكل (5-15)	تأثير زيادة عدد الرّيش الخارجيّة على معامل انتقال الحرارة الكلّي للسّير
132	الشكل (5-16)	تأثير زيادة عدد الرّيش الخارجيّة على زمن نصف الدّورة
133	الشكل (5-17)	تأثير زيادة عدد الرّيش الخارجيّة على مؤشرات الأداء للدّارة
134	الشكل (5-18)	مقطع عرضي في أنبوب مرّيش داخلياً
136	الشكل (5-19)	تأثير زيادة عدد الرّيش النصف قطريّة على نوع الجريان ضمن أنابيب المبادل....
137	الشكل (5-20)	تأثير زيادة عدد الرّيش النصف قطريّة على معامل انتقال الحرارة الكلّي للسّير...
138	الشكل (5-21)	تأثير زيادة عدد الرّيش النصف قطريّة على زمن نصف الدّورة
139	الشكل (5-22)	تأثير زيادة عدد الرّيش النصف قطريّة على هبوط الضغط في الأنابيب
140	الشكل (5-23)	تأثير زيادة عدد الرّيش النصف قطريّة على مؤشرات الأداء للدّارة
142	الشكل (5-24)	دورة التبريد الأساسيّة للزوج Busofit/Ammonia
142	الشكل (5-25)	دورة التبريد مع استرجاع حراري للزوج Busofit/Ammonia
145	الشكل (5-26)	دورة التبريد مع استرجاع كتلي للزوج Busofit/Ammonia
148	الشكل (5-27)	دورة التبريد مع استرجاع كتلي ثم حراري للزوج Busofit/Ammonia
152	الشكل (5-28)	تأثير عمليّات الاسترجاع HR و MR و MHR على M_{ice}
153	الشكل (5-29)	تأثير عمليّات الاسترجاع HR و MR و MHR على Q_D و $\Delta t_{1/2cycle}$
153	الشكل (5-30)	تأثير عمليّات الاسترجاع HR و MR و MHR على SCP و COP

154	الشكل (5-31) دورة التبريد مع استرجاع حراري ثم كتلي للزوج Busofit/Ammonia
159	الشكل (5-32) تأثير زيادة T_I في دورات مع HR و MR و MHR على M_{ref} و Q_D و COP
160	الشكل (5-33) ثلاث حالات مختلفة للاسترجاع الحراري ثم الكتلي

قائمة الجداول

الصفحة	الفصل الأول
25 - 33	الجدول (1-1) حتى الجدول (7-1) جداول تابعة للدراسة المرجعية
	الفصل الثاني
44	الجدول (1-2) الحرارة الناتجة عن الادمصاص تبعاً للزوج المستخدم
60	الجدول (2-2) الخواص الفيزيوقحرارية لبعض أنواع الكربون المنشط الحبيبي
62	الجدول (3-2) مقارنة خواص الكربون المنشط الحبيبي قبل وبعد التقسية
	الفصل الثالث
75	الجدول (1-3) بيانات تجربة الادمصاص عند 25 °C للزوج <i>ACG/R 134a</i>
78	الجدول (2-3) أبعاد وعاء الادمصاص
79	الجدول (3-3) حساب حجم الفراغ في وعاء الكربون
79	الجدول (4-3) حساب كتلة بخار وسيط التبريد التي تملأ فراغ وعاء الكربون
79	الجدول (5-3) نتائج تجارب الادمصاص للزوج <i>ACG/R 134a</i> عند ضغط 70 <i>psi</i>
80	الجدول (6-3) نتائج تجارب الادمصاص للزوج <i>ACG/R 407C</i> عند ضغط 70 <i>psi</i>
	الفصل الرابع
89	الجدول (1-4) البارامترات الترموديناميكية لنقاط الدورة الستة - الزوج العامل <i>ACG/R134a</i> ...
90	الجدول (2-4) الخواص الفيزيوقحرارية لبعض المعادن
92	الجدول (3-4) الأبعاد التصميمية المفروضة للنموذج الأولي لوعاء الادمصاص
95	الجدول (4-4) المواصفات الهندسية والفيزيوقحرارية للغلاف
96	الجدول (5-4) المواصفات الهندسية والفيزيوقحرارية للأنايب
96	الجدول (6-4) المواصفات الهندسية والفيزيوقحرارية للریش الخارجية
96	الجدول (7-4) المواصفات الهندسية والفيزيوقحرارية للكربون المنشط الحبيبي
100	الجدول (8-4) الخواص الفيزيوقحرارية لماء التسخين
103	الجدول (9-4) الخواص الفيزيوقحرارية لـ <i>R134a</i> عند درجة الحرارة الوسطية للتبريد 60.5 °C ...

الفصل الخامس

الجدول (5-1)	الخواص الفيزيوقحرارية للكربون المنشط <i>ACG</i>	114
الجدول (5-2)	معاملات $(D - A)$ للزوج <i>ACG/R 134a</i>	114
الجدول (5-3)	الخواص الفيزيوقحرارية للكربون المنشط $ACF(A - 20)$	114
الجدول (5-4)	معاملات $(D - A)$ للزوج $ACF(A - 20)/R 134a$	114
الجدول (5-5)	الخواص الفيزيوقحرارية للكربون المنشط <i>MaxsorbIII</i>	115
الجدول (5-6)	معاملات $(D - A)$ للزوج <i>MaxsorbIII/R 134a</i>	115
الجدول (5-7)	الخواص الفيزيوقحرارية للكربون المنشط <i>Busofit ATYM 055</i>	115
الجدول (5-8)	معاملات $(D - A)$ للزوج <i>Busofit ATYM 055/Ammonia</i>	115
الجدول (5-9)	مقارنة التغير في بارامترات الدورة التبريدية نتيجة تغيير الزوج العامل	117
الجدول (5-10)	مقارنة التغير في الحسابات التصميمية الحرارية للدائرة نتيجة تغيير الزوج العامل..	118
الجدول (5-11)	المواصفات الهندسية لكل من الريشة المسطحة والمتعرجة	125
الجدول (5-12)	التغير في الحسابات التصميمية عند استبدال الريشة المسطحة بريشة متعرجة ...	125
الجدول (5-13)	التغير في الحسابات التصميمية عند زيادة عدد الريش الخارجية	129
الجدول (5-14)	التغير في الحسابات التصميمية عند إضافة ريش نصف قطرية داخل الأنابيب...	135
الجدول (5-15)	المقارنة بين دورات 0R و HR و MR و MHR	150
الجدول (5-16)	ضغط التعادل بين الوعاءين نتيجة الاسترجاع الكتلي بعد عملية استرجاع حراري	155
الجدول (5-17)	الحالات الحدية الثلاثة للاسترجاع الحراري ثم الكتلي	157

الفصل السادس

الجدول (6-1)	تأثير تغيير الزوج العامل على مؤشرات الأداء لدارة التبريد الادمصاصية	164
الجدول (6-2)	تأثير زيادة مساحة سطوح التبادل الحراري على مؤشرات الأداء لدارة التبريد الادمصاصية	164
الجدول (6-3)	تأثير عمليات الاسترجاع على استطاعة التبريد ومعامل الأداء للدائرة	165
الجدول (6-4)	نتائج بحث Kulkarni& Kapatkar	166
الجدول (6-5)	مقارنة نتائج بحثنا مع نتائج بحث Kulkarni& Kapatkar	166

166	 نتائج بحث Shabir&Sultan	الجدول (6-6)
167	 مقارنة نتائج بحثنا مع نتائج Wang&Li	الجدول (7-6)
168	 مقارنة نتائج بحثنا بعد إجراء استرجاع كتلي وحراري مع نتائج Wang	الجدول (8-6)
168	Duong&Hong مقارنة نتائج بحثنا بعد إجراء استرجاع كتلي وحراري مع نتائج	الجدول (9-6)

قائمة الرموز والمصطلحات

الرموز	
n	معامل عدم تجانس توزع المسامات ذات الحجوم المختلفة
ω_o	الحجم الأعظمي للمادة المدمصة في واحدة الكتلة للمادة الادمصاصية..
D	معامل الجذب
β	معامل التشابه
E	الطاقة المميزة للادمصاص
E_0	طاقة الادمصاص المميزة لغاز مرجعي
x_{max}	التركيز الأعظمي للمادة المدمصة في المادة الادمصاصية
x_{min}	التركيز الأصغري للمادة المدمصة في المادة الادمصاصية
$\bar{x}$	متوسط تركيز المادة المدمصة في السّير
Δx	فرق تركيز المادة المدمصة في السّير
Δx^*	فرق تركيز المادة المدمصة في السّير بعد عملية استرجاع كتلي
ϑ_{pore}	الحجم النوعي للمسامات
ε_{ads}	مسامية المادة الادمصاصية
λ	معامل التوصيل الحراري
λ_{ads}	معامل التوصيل الحراري للمادة الادمصاصية
λ_{eff}	معامل التوصيل الحراري المكافئ أو الفعّال للمادة الادمصاصية
λ_v	معامل التوصيل الحراري لبخار وسيط التبريد
α_{int}	معامل انتقال الحرارة بالحمل من الماء إلى واحدة السطح الداخلي للمبادل
α_{ex}	معامل انتقال الحرارة بالحمل من واحدة السطح الخارجي للمبادل إلى وسيط التبريد المدمص في المادة المسامية
$(A\lambda)_{tub,tot}$	معامل انتقال الحرارة الكلي بالتوصيل عبر جدار أنابيب المبادل
$(A\lambda)_{ads,tot}$	معامل انتقال الحرارة الكلي بالتوصيل ضمن المادة الادمصاصية
$(A\alpha)_{int,tot}$	معامل انتقال الحرارة الكلي بالحمل إلى السطح الداخلي للمبادل

$W/^{\circ}C$	معامل انتقال الحرارة الكلي بالحمل من السطح الخارجي للمبادل	$(A\alpha)_{ex,tot}$
$W/^{\circ}C$	معامل انتقال الحرارة الكلي في وعاء الادمصاص في مرحلة التسخين...	$(AK)_{tot,h}$
$W/^{\circ}C$	معامل انتقال الحرارة الكلي في وعاء الادمصاص في مرحلة التبريد	$(AK)_{tot,c}$
mm	البُعد الداخلي للوعاء باتجاه X بدون فراغات انتقال الكتلة	X_o
mm	البُعد الداخلي للوعاء باتجاه X مع فراغات انتقال الكتلة	X_{in}
mm	البُعد الخارجي للوعاء باتجاه X	X_{ex}
mm	البُعد الداخلي للوعاء باتجاه Y	Y_{in}
mm	البُعد الخارجي للوعاء باتجاه Y	Y_{ex}
mm	الارتفاع الداخلي للوعاء قبل الترييش الخارجي وبدون الفراغ العلوي.....	Z_o
mm	الارتفاع الداخلي للوعاء بعد إضافة الريش الخارجية	Z_t
mm	الارتفاع الداخلي للوعاء بعد إضافة الريش وسماكة الفراغ العلوي	Z_{in}
mm	القطر الداخلي لأنابيب المبادل	$D_{tube,in}$
mm	القطر الخارجي لأنابيب المبادل	$D_{tube,ex}$
mm	القطر الهيدروليكي للأنبوب	D_h
mm	المسافة بين أنبوبين متتاليين	b_{tube}
mm	المسافة بين ريشتين متتاليتين	$b_{fin,ex}$
mm	خطوة الأنابيب	S_{tube}
mm	خطوة الترييش الخارجي	$S_{fin,ex}$
—	عدد صفوف الأنابيب	N_{row}
—	عدد الأنابيب في الصف الواحد	$N_{tube,row}$
—	عدد الأنابيب الكلي في الوعاء	$N_{tube,tot}$
—	عدد الريش النصف قطرية الداخلية في الأنبوب الواحد	$N_{fin,rad}$
—	عدد الريش الخارجية على الأنبوب الواحد	$N_{fin,ex}$
—	عدد التعرجات في الريشة	N_{zik}

—	 مردود الريشة الخارجية	$\eta_{fin,ex}$
—	 مردود الريشة النصف قطرية	$\eta_{fin,rad}$
—	 مردود السطح الخارجي للمبادل	η_{ex}
—	 مردود السطح الداخلي للمبادل	η_{int}
cm^2	 مساحة السطح الخارجي للمبادل	A_{ex}
cm^2	 مساحة السطح الداخلي للمبادل	A_{int}
cm^2	 مساحة مقطع الجريان لسائل نقل الحرارة (الماء)	A_{sec}
mm	 المحيط المبلى للأنبوب	U_{wet}
mm	 الطول المبلى للريشة النصف قطرية	L_{wet}
mm	 مسافة التوصيل الحراري ضمن المادة الادمصاصية	d_{ads}
kJ	 كمية الحرارة المقدمة للوعاء خلال فترة التسخين	Q_D
kJ	 كمية الحرارة المطروحة من الوعاء خلال فترة التبريد	Q_A
kJ	 قدرة المبخر (قدرة التبريد)	Q_{evap}
kJ	 قدرة المكثف	Q_{cond}
kJ	 كمية الحرارة المسترجعة في عملية استرجاع حراري	Q_{reg}
kW	 استطاعة المسخن	$\dot{Q}_D$
kW	 استطاعة المبرّد	$\dot{Q}_A$
kW	 استطاعة المبخر (استطاعة التبريد)	$\dot{Q}_{evap}$
kW	 استطاعة المكثف	$\dot{Q}_{cond}$
kW	 الطاقة الحرارية المسترجعة	$\dot{Q}_{reg}$
sec	 زمن تسخين الوعاء	Δt_D
sec	 زمن تبريد الوعاء	Δt_A
sec	 زمن نصف الدورة	$\Delta t_{1/2cycle}$
sec	 زمن عملية الاسترجاع الحراري	Δt_{reg-h}

Δt_{reg-m}	زمن عملية الاسترجاع الكتلي	sec
COP	معامل الأداء لدارة التبريد	—
SCP	معامل استطاعة التبريد النوعية	W/kg_{ads}
Re	عدد رينولدز	—
Pr	عدد براندل	—
Nu	عدد نوسيلت	—
f	معامل الاحتكاك للأنايب	—
$v1$	سرعة جريان الماء ضمن الأنايب	m/sec
g	تسارع الجاذبية الأرضية	m/sec^2
μ	اللزوجة الديناميكية للسائل	$Pa \cdot sec$
ϑ	الحجم النوعي	m^3/kg
ρ	الكثافة	kg/m^3
M	الكتلة	kg
$\dot{M}$	التدفق الكتلي	kg/sec
c_p	السعة الحرارية النوعية	$J/kg \cdot ^\circ C$
C	الكتلة الحرارية	$J/^\circ C$
δ	السماكة	mm
T	درجة الحرارة	$^\circ C, K$
P	الضغط	bar, Pa
h_l	انتالبي سائل وسيط التبريد	kJ/kg
h_v	انتالبي بخار وسيط التبريد	kJ/kg
h_{ads}	الحرارة النوعية الكامنة للادمصاص / فصل	kJ/kg
ΔP	فاقد الضغط في أنبوب المبادل	Pa
ΔT_{w-ads}	فرق درجة الحرارة بين الماء المتدفق في الأنايب والمادة الادمصاصية..	$^\circ C, K$

الرموز السفلية

نهاية عملية الادمصاص	<i>A</i>
بداية عملية الفصل	<i>B</i>
نهاية عملية الفصل	<i>D</i>
بداية عملية الادمصاص	<i>F</i>
نهاية عملية الاسترجاع الحراري في السرير البارد	<i>I</i>
نهاية عملية الاسترجاع الحراري في السرير الساخن	<i>J</i>
نهاية عملية الاسترجاع الكتلي في السرير الساخن	<i>M</i>
نهاية عملية الاسترجاع الكتلي في السرير البارد	<i>G</i>
تبخر	<i>evap</i>
تكاثف	<i>cond</i>
إشباع	<i>sat</i>
دخول الماء الساخن للمبادل	<i>w, h, 1</i>
خروج الماء الساخن من المبادل	<i>w, h, 2</i>
دخول الماء البارد للمبادل	<i>w, c, 1</i>
خروج الماء البارد من المبادل	<i>w, c, 2</i>
الغلاف	<i>shell</i>
الأنبوب	<i>tube</i>
السرير	<i>bed</i>
الريشة النصف قطرية	<i>fin, rad</i>
الريشة الخارجية	<i>fin, ex</i>
فراغ تجمّع البخار	<i>space</i>
المادة الادمصاصية (الكربون المنشط)	<i>ads</i>
وسيط التبريد	<i>ref</i>
الماء	<i>w</i>
جليد الماء	<i>ice</i>

الملخص

تمّ في هذا البحث دراسة طرق متعدّدة لرفع استطاعة التبريد ومعامل أداء دارة التبريد الادمصاصيّة. وتمّ إنجاز هذه الدراسة على ثلاث مراحل:

- I. تصنيع جهاز مخبري من أجل اختبار ساعات الادمصاص لأزواج عاملة مختلفة.
- II. تصميم نموذج أولي لسرير الادمصاص ليعمل في دارة تبريد لإنتاج الجليد ضمن شروط تشغيل محدّدة.
- III. تطوير سرير الادمصاص بهدف رفع معامل استطاعة التبريد النوعيّة ومعامل الأداء للدارة. (تمّت عمليّة تصميم السرير وتطويره حاسوبياً)

تبين من خلال التجارب المخبريّة أنّ استخدام R134a مع الكربون المنشط الحبيبي أعطى سعة ادمصاص أعلى مقارنة باستخدام R407C مع نفس الكربون عند كافة أنماط الادمصاص.

وتبين من خلال الدراسة التحليليّة والحاسوبيّة لتطوير السرير مايلي:

- إنّ استخدام الزوج (ألياف الكربون المنشط نوع Busofit مع Ammonia) حقق أعلى معامل أداء لدارة التبريد بقيمة 0.2093 وأعلى استطاعة تبريد بقيمة 433.64 W، وذلك مقارنة بالأزواج (كربون منشط مسحوق نوع MaxsorbIII مع R134a) و(ألياف الكربون المنشط نوع A20 مع R134) و(كربون منشط حبيبي مع R134a)، لذلك تمّ اختياره كزوج عامل في الدارة.
- إنّ استبدال الريشة الخارجيّة المسطّحة بريشة متعرّجة ومن ثمّ زيادة عدد الريش على أنابيب المبادل من 50 إلى 150 ريشة وإضافة ثلاث ريش نصف قطريّة ضمن أنابيب المبادل أدّى إلى زيادة استطاعة التبريد إلى 1992.7 W أي بنسبة 359.5%، وبالمقابل أدّى إلى نقص طفيف في معامل أداء الدارة إلى 0.1915 أي بنسبة 8.5% - (بمقدار -0.0178).
- إنّ استخدام تقنيّة الاسترجاع الكتلي ثمّ الحراري MHR بين السريّرين حققت أعلى زيادة في استطاعة التبريد ومعامل الأداء وذلك مقارنةً بتقنيّة الاسترجاع الحراري HR وتقنيّة الاسترجاع الكتلي MR. حيث زادت استطاعة التبريد إلى 3238 W أي بنسبة 62.5%، وزاد معامل الأداء إلى 0.436 أي بنسبة 127.7% (بمقدار 0.2445).

المقدمة

تكمّن مشكلة آلات التبريد الادمصاصيّة بأنها ذات استطاعة تبريد نوعي Specific Cooling Power (SCP) ومعامل أداء (COP) Coefficient Of Performance منخفضان، ويُعزى ذلك إلى الأسباب التالية:

1. انخفاض سعة ادمصاص المواد المساميّة الصلبة لوسائط التبريد وانخفاض تغيّر تركيز المادة المدمّصة ضمن المجال الحراري لعمل السّريّر يؤدي إلى انخفاض كميّة وسيط التبريد العاملة في الدّارة.
2. الموصليّة الحرارية السيئة للمواد المساميّة تُؤدي إلى انخفاض معامل انتقال الحرارة للسّريّر.
3. الحمل الحراري الكبير لمكونات وعاء الادمصاص (السّريّر) بما فيها المادة الادمصاصيّة يؤدي إلى زيادة كميّة الحرارة الواجب تقديمها للنظام.

■ اختبر Kulkarni & Kapatkar [1] (2016) الكربون المنشط الحبيبي ACG مع وسائط التبريد $R410a$ و $R134a$ في دارة تبريد ادمصاصيّة تجريبية، فوجد أنّ الزّوج $ACG/R134a$ حقق معاملات أداء أعلى مقارنة بالزّوج $ACG/R410a$ وذلك عند درجات حرارة فصل مختلفة، فعند درجة حرارة فصل $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ كانت معاملات الأداء للزّوجين $ACG/R134a$ و $ACG/R410a$ هي 0.2 و 0.11 على الترتيب.

■ اختبر Shabir & Sultan [2] (2018) نوعين من المواد الادمصاصيّة القائمة على الكربون المنشط (Supersorbon HS4 و Dezorex DB1) مع الميثانول في دارة تبريد عند شروط تشغيل محدّدة. حقق استخدام Supersorbon معامل أداء أعلى للدّارة مقارنةً باستخدام Dezorex وكانت القيم على الترتيب 0.64 و 0.57.

■ قدّم Wang & Li [3] (2003) ثلاثة نماذج لأوعية ادمصاص تحوي مبادلات حرارية أنبوبية مريّشة. تمّ اختبار كل نموذج في دارة تبريد تعمل على الميثانول وعند درجة حرارة فصل $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، ووجد أنّ استخدام الكربون المنشط المقسّى والتوزيع المنطقي لأفنية انتقال الغاز في الوعاء الثالث أدّى إلى الحصول على معامل أداء أعلى مقارنةً بالوعاءين 1 و 2 وكانت قيمته 0.074.

■ قام Duong&Hong [4] (2017) بإجراء محاكاة عددية لسرير ادمصاص يحوي مبادل حراري من النوع الأنبوبي المريش ويعمل في شيلر ادمصاصي يستخدم الزوج (سيليكاجيل/ ماء). عند درجة حرارة تكاثف 30°C ودرجة حرارة تبخر 15°C ودرجة حرارة فصل 60°C كان معامل الأداء للدورة الأساسية 0.437. تبين أنه بإجراء استرجاع حراري ومقارنةً بالدورة الأساسية زاد معامل الأداء بنسبة 12.56%، وبإجراء استرجاع كتلي زاد بنسبة 24.5%، وبإجراء استرجاع كتلي ثم حراري زاد بنسبة 31.7%. إذا تم الحصول على أعلى معامل أداء باستخدام تقنية الاسترجاع الكتلي ثم الحراري، وكان مقدار الزيادة أكبر عند درجة حرارة فصل أخفض.

تبين من الدراسة المرجعية أن الأبحاث ركزت على عدة نقاط من أجل تحسين عمليات انتقال الحرارة والكتلة في السرير بهدف رفع معامل أداء دارة التبريد الادمصاصية وهي:

- (1) اختبار أزواج عاملة جديدة.
 - (2) تصنيع مواد ادمصاصية جديدة واختبارها.
 - (3) تقديم تصاميم مختلفة للمبادلات الحرارية.
 - (4) استخدام تقنيات الاسترجاع الحراري والكتلي والدارات متعددة المراحل والتعاقبية.
- بناءً على ما سبق تم في هذه الأطروحة دراسة إمكانيات رفع كل من معامل الأداء ومعامل استطاعة التبريد النوعية بالتركيز على النقاط التالية:

- اختبار مجموعة من الأزواج الادمصاصية على دارة التبريد واختيار الزوج المناسب الذي يحقق الأداء الأفضل لها.
- زيادة معدل انتقال الحرارة في السرير عن طريق زيادة مساحة سطح التبادل الخارجي والداخلي للمبادل.
- تخفيض الاستهلاك الحراري في مرحلة التسخين باستخدام تقنية الاسترجاع الحراري بين السريرين، وزيادة كتلة وسيط التبريد العاملة في الدارة باستخدام تقنية الاسترجاع الكتلي بين السريرين.

فيما يلي عرض لمحتوى كل فصل من فصول هذه الأطروحة:

➤ الفصل الأول: عرض مشكلة البحث وأهميته وأهدافه، وتحديد أحد المناطق الصناعية في ريف دمشق من أجل تصميم دائرة تبريد ادمصاصية تعمل على طاقة الضياعات الصناعية وفقاً للشروط المناخية لهذه المنطقة، وإجراء دراسة مرجعية موسعة لأبحاث درست طرقاً مختلفة لتحسين استطاعة أنظمة التبريد الادمصاصية وأدائها.

➤ الفصل الثاني: شرح مفاهيم أساسية في الادمصاص والدارات الادمصاصية، وشرح معادلات انتقال الحرارة والكتلة في السّريّر، وإيزوتريمات الادمصاص، وتقنيات الاسترجاع الحراري والكتلي، والموصفات المطلوبة في المواد الادمصاصية والدمصّة، والخواص الفيزيائية للمواد الادمصاصية

➤ الفصل الثالث: شرح تفصيلي عن بناء منصّة اختبار في مخبر التبريد في كلية الهندسة وذلك من أجل اختبار ساعات الادمصاص لأزواج ادمصاصية مختلفة، وعرض نتائج التجارب المخبرية للكربون المنشط الحبيبي مع وسائط تبريد صديقة للبيئة R134a و R407C.

➤ الفصل الرابع: تصميم حاسوبي لنموذج أولي لسريّر الادمصاص واختباره على دائرة تبريد تعمل على طاقة الضياعات الصناعية ووفقاً للشروط المناخية لريف دمشق، وتستخدم الكربون المنشط الحبيبي و R134a كوسيط تبريد.

➤ الفصل الخامس: تطوير سريّر الادمصاص حاسوبياً بهدف زيادة معامل استطاعة التبريد النوعية ومعامل الأداء للدائرة.

➤ الفصل السادس: عرض نتائج البحث ومقارنتها مع نتائج لأبحاث سابقة، ثمّ تحديد الاستنتاجات والتوصيات.

الفصل

الأول

1-1 - مشكلة البحث وأهميته:

يحتل التبريد بمختلف تطبيقاته مكانة بالغة الأهمية من حيث الحاجة إليه في مختلف القطاعات ومن حيث استهلاكه للطاقة الكهربائية وبخاصة في فصل الصيف.

وفقاً للتقرير الصادر عن وكالة الطاقة الدولية عام 2018 فإن أنظمة التبريد وتكييف الهواء تستهلك حوالي 20% من متطلبات الكهرباء في المباني وحوالي 10% من الطلب العالمي على الكهرباء. وتشير توقعات وكالة الطاقة أنه في حال عدم العمل في مجال كفاءة الطاقة لإنتاج البرودة فإن حصة منشآت تكييف الهواء من الاستهلاك العالمي للكهرباء قد يزيد إلى أكثر من ثلاثة أضعاف بحلول عام 2050. [5]

تتميز أنظمة التبريد التقليدية الضاغطة البخارية العاملة على الطاقة الكهربائية بالوثوقية والاقتصادية وبمعامل أداء مرتفع. إلا أن تتبع الأثر البيئي للغازات الصادرة عن محطات التبريد (مركبات كلور فلور كربون CFC ومركبات هيدرو كلور فلور كربون HCFC) وللغازات الناتجة عن محطات توليد الطاقة الكهربائية (مركبات CO و CO₂) أظهر أن هذه المركبات تؤدي دوراً خطيراً في تلوث البيئة واستنزاف طبقة الأوزون وظاهرة الاحتباس الحراري.

قرر بروتوكول مونتريال 1988 ضرورة التخلص من مركبات CFC_s و HCFC_s، كما أقر بروتوكول كيوتو 1988 ضرورة الحد من انبعاثات بعض غازات الدفيئة (CO₂ ، HCFC ، PFC ، N₂O ، CH₄...). [6]

إن الحل لما سبق هو من خلال العمل ضمن مجال كفاءة الطاقة في إنتاج البرودة أو استخدام تكنولوجيا بديلة تلبي متطلبات النظام البيئي الراهن مثل أنظمة الامتصاص والادماصاص التي تعمل مباشرة بواسطة مصادر نظيفة ومستدامة للطاقة وتستخدم وسائط تبريد غير ضارة بيئياً، إلا أن كفاءتها الطاقية المنخفضة أدت إلى التأخير في تسويق هذه التكنولوجيا عالمياً، لكن العمل البحثي المتواصل لتطوير سريير الادمصاص سعياً للوصول إلى معاملات أداء عالية لأنظمة التبريد بالادمصاص، يمكن أن يؤهل هذه الأنظمة لأن تصبح رديفاً جيداً لآلات التبريد التقليدية.

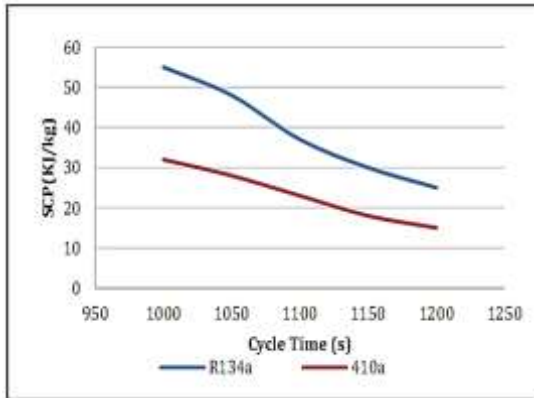
يُعدُّ استخدام طاقة الضياعات الصناعيّة للحصول على الأثر التبريدي من التطبيقات الفعّالة في مجال التبريد وتكييف الهواء وذلك في المناطق الصناعيّة، حيث يمكن إنشاء محطات تبريد ادمصاصية تعمل مباشرة على الطاقة الحرارية لغازات العوادم للمصانع، كما يمكن تكييف المصنع نفسه أو السكن العمالي المجاور، وبذلك يتم المساهمة في تخفيض التلوث البيئي وتخفيض استهلاك الطاقة الكهربائية.

1-2- الدراسة المرجعية:

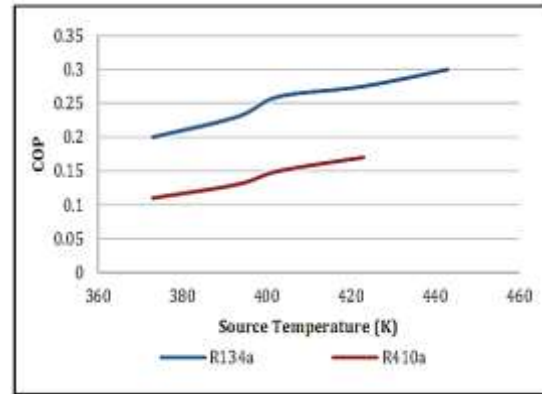
■ قام Kulkarni & Kapatkar [1] (2016) باختبار الكربون المنشط الحبيبي مع وسائط التبريد R410a و R134a في دارة تبريد ادمصاصية تجريبية من أجل اختيار الزوج الذي يُحقّق الأداء الأفضل.

وُجِدَ أنّه من أجل درجة حرارة ادمصاص 30°C أعطى R134a سعة ادمصاص أعلى من R410a عند الضغط نفسه 8.5 bar وكانت السعات على الترتيب 1.4 kg/kg و 1.2 kg/kg. عند إجراء الاختبار من أجل درجة حرارة 45°C كانت سعة الادمصااص لكلّ من R410a و R134a عند الضغط السابق نفسه تساوي إلى 1.22 kg/kg و 1.18 kg/kg. أي أنّه بزيادة درجة حرارة الادمصااص عند الضغط نفسه تنقص سعة الادمصااص للزوج العامل.

يزداد COP بازدياد درجة حرارة المصدر. وينقص SCP بزيادة زمن الدورة. كما أعطى استخدام R134a قيمة أعلى لكلّ من COP و SCP كما هو موضّح في الشكل (1-1) والشكل (2-1).



الشكل (2-1) SCP عند أزمنة مختلفة للدورة.



الشكل (1-1) COP للدارة عند درجات حرارة مختلفة.

■ درس Shabir & Sultan [2] (2018) تأثير خواص الزوج العامل المستخدم على أداء نظام تبريد ادمصاصي عند شروط تشغيل محددة (درجة حرارة فصل 100°C ، درجة حرارة ادمصاص 30°C ، ودرجة حرارة التبخر 5°C).

تمّ اختبار مواد ادمصاصيّة جديدة قائمة على الكربون مع وسيط تبريد هو الإيثانول وهذه المواد هي Supersorbon HS4 و Dezorex DB1.

أعطى النظام قدرة تبريد نوعية SCE أعلى من أجل Supersorbon HS4 تساوي 180.1 kJ/kg، بينما أعطى قيمةً منخفضة نسبياً من أجل Dezorex DB1 تساوي 128.8 kJ/kg. بشكل مشابه كان معامل الأداء COP من أجل Supersorbon HS4 أعلى منه من أجل Dezorex DB1 ويساوي 0.64 و 0.57 على الترتيب .

■ قام Shabir& Sultan [7] (2018) بدراسة توازن الادمصاص للعديد من المواد الادمصاصيّة مثل (الكربونات المنشّطة، السيليكا جيل، المركبات العضويّة المعدنيّة، الزيوليتات والمواد الادمصاصيّة المركّبة) مع أنواع مختلفة من وسائط التبريد مثل (الماء، الإيثانول، الميثانول وثاني أكسيد الكربون). وتمّ إجراء مقارنة بين أزواج عاملة مختلفة على أساس إيزوتيرمات الادمصاص. كما تمّ مراجعة الخواص الفيزيائية للمواد الادمصاصيّة مثل (مساحة السطح، حجم المسام، ومسح الصور المجهرية الالكترونية) من أجل الاختيار الأمثل للأزواج العاملة.

وأظهرت نتائج المراجعة أنّ الكربون المنشّط يمتلك خصائص ممتازة لتطوير نظام التبريد الادمصاصي. بالإضافة إلى ذلك تبيّن أنّ الكربون المنشّط من نوع MaxsorbIII هو المرشّح الأفضل نسبياً بين المواد الادمصاصيّة التي تمّت دراستها حيث يمكن أن يعطي طاقة تبريد نوعيّة عظمى عندما يُستخدم معه الميثانول كمادة مدمصّة كما هو موضّح في الجدول (1-1).

الجدول (1-1) مؤشرات الأداء لدارة تبريد باستخدام أزواج ادمصاصيّة مختلفة.

Adsorbent-refrigerant pairs	COP (-)	SCE (kJ/kg)	SCP (W/kg)	Cooling capacity (kW)
Maxsorb III-Ethanol	0.72	420	-	-
Maxsorb III-Methanol	0.78	640	-	-
Tsurumi activate charcoal (HC-20C) -Methanol	0.76	371	-	-
FX-400-Methanol	0.67	425	-	-
KF-1000-Methanol	0.6	295	-	-
ACF (A-20)-R134a	0.15	34.63	-	-
SRD1532/3-R134a	0.09	16.38	-	-
RD type-Water	0.55	-	-	14.8
13X-Water	0.42	-	-	10
(SWS-1L) -Water	0.45	-	-	10.7
(SWS-1L) -Water	0.65	-	-	11.3
SG/LiBr-Ethanol	0.72	-	-	-
AC/silica gel/CaCl ₂ -Water	0.70	-	378	-

■ قدّم Shmroukh&Abel-Rahman [8] (2015) دراسة تهدف إلى تطوير سرير ادمصاص ذي مقاومة أصغرية لانتقال الحرارة. لهذا الغرض استُخدم مبادل حراري أنبوبي مريّش وتم تركيبه في مركز وعاء الادمصاص وألصقت المادة الادمصاصية بين الريّش باستخدام لاصق خاص وتم وصل الوعاء إلى منصة اختبار تجريبية من أجل اختبار مجموعة من الأزواج العاملة بهدف الحصول على بيانات سعة ادمصاص قابلة للتطبيق عملياً.

حيث تم اختبار الكربون المنشط الحبيبي ACG والكربون المنشط المسحوق ACP مع ثلاث وسائط تبريد. وكانت الأزواج الناتجة هي:

ACG/R 134a , ACG/R 407C , ACG/R 507A.

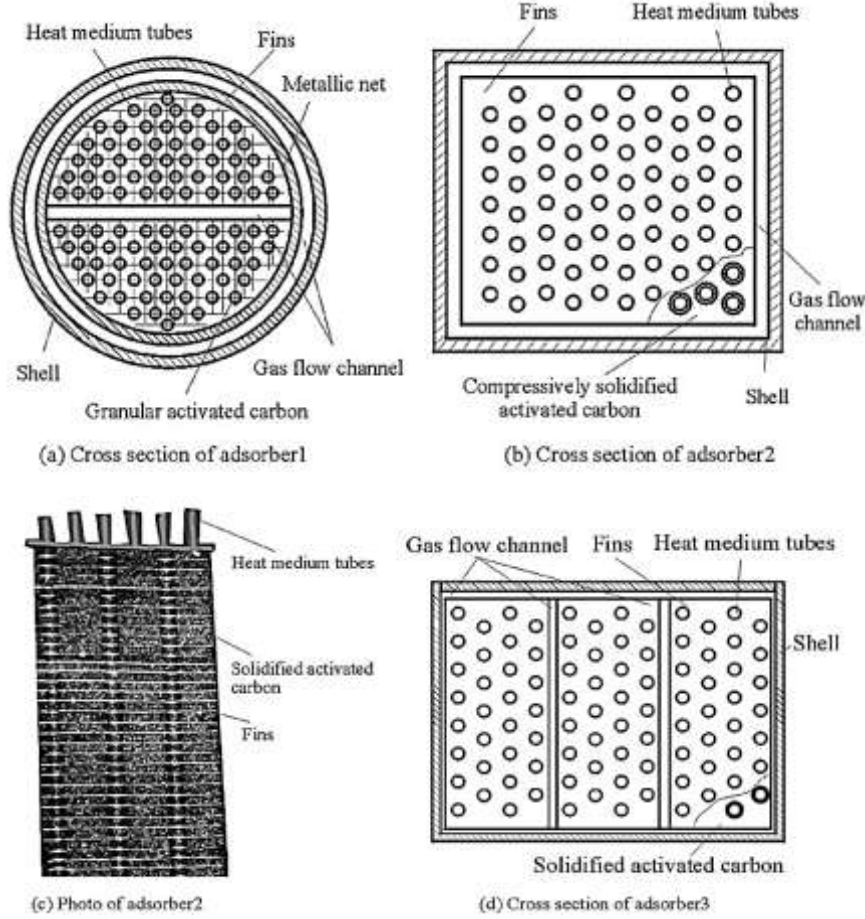
ACP/R 134a , ACP/R 407C , ACP/R 507A.

تبين أنه بازياد درجة حرارة الادمصاص تنقص سعة الادمصاص للزوج العامل، فعند درجة حرارة ادمصاص 25°C كانت أكبر سعة ادمصاص هي 0.8352 kg/kg للزوج ACP/R134a ، وأصغر سعة ادمصاص هي 0.1583 kg/kg للزوج ACG/R407C. وعند درجة حرارة ادمصاص 50°C كانت أكبر سعة ادمصاص هي 0.3207 kg/kg للزوج ACP/R134a ، وأصغر سعة ادمصاص هي 0.0609 kg/kg للزوج ACG/R407C. لذلك يُنصح باستخدام الزوج ACP/R134a في التبريد الادمصاصي بسبب سعة ادمصاصه الكبيرة مقارنةً بالأزواج المختبرة الأخرى.

■ قام Astina&Zidni [9] (2018) بإجراء بحثٍ عن تعديل الكربون المنشط بهدف تحسين عملية انتقال الحرارة والكتلة في سرير الادمصاص وبالتالي رفع أداء النظام. تم اختيار كربون منشط محلي كمادة ادمصاصية نظراً لتوفره في السوق من أجل تصنيع نموذجين معدّلين هما:

(1) كربون منشط معدّل بحمض الكبريتيك (H_2SO_4) (2) كربون منشط معدّل بحمض النتريك HNO_3 واستُخدم وسيط التبريد فلوروميتان R32 كمادة مدمّصة. تم اختبار هذين الزوجين في نظام تبريد ادمصاصي بسريرين وأظهرت النتائج أنّ هذين الحمضين قد حسّنا خواص الكربون المنشط مقارنةً بالكربون المنشط النقي، وهذا أدّى إلى زيادة متوسط قدرة التبريد للنظام بنسبة 6.6% مع كلا النموذجين، وزاد متوسط معامل الأداء بنسبة 9.8% في حالة الكربون المعدّل بحمض النتريك وبنسبة 5.1% في حالة الكربون المعدّل بحمض الكبريتيك.

■ قام Wang&Li [3] (2003) بدراسة تجريبية على ثلاثة نماذج لأوعية ادمصاص تحوي مبادلات حرارية نوع shell and tube. الأسرة الثلاثة تختلف من حيث التصميم وأقنية تدفق الغاز والخلائط المعدنية ونوع الكربون المستخدم والحجم كما هو موضح في الشكل (3-1) والجدول (2-1).



الشكل (3-1) مقاطع عرضية لثلاثة أوعية ادمصاص مختلفة.

الجدول (2-1) مواصفات الأوعية الثلاثة.

Adsorber	Item	Material	Mass (kg)	Heat capacity (kJ/°C)
Adsorber1	Thermal fluid tubes	Copper	22.5	8.686
	Fins	Aluminum	5.4	4.907
	Adsorbent	Activated carbon made by the shell of coconut	26	25.6
	Thermal fluid	Water (two-flow circuit)	10	41.8
	Metal of adsorber	Stainless steel	79.1	37.90
Adsorber2	Thermal fluid tubes	Steel	37.6	14.162
	Fins	Steel	9.1	4.205
	Adsorbent	Solidified activated carbon	41	38.13
	Thermal fluid	Water (two-flow circuit)	10.26	42.89
	Metal of adsorber	Carbon steel	111	46.9
Adsorber3	Heat medium tubes	Steel	81.52	30.733
	Fins	Steel	5.71	2.152
	Adsorbent	Solidified activated carbon	60	55.8
	Thermal fluid	Water (four-flow circuit)	14.8	62.08
	Metal of adsorber	Carbon steel	158.51	66.384

إنَّ تقسية الكربون المنشط الحبيبي أدّى إلى تحسين خواصه الفيزيوجرافية حيث زادت كثافته ومعامل التوصيل الحراري وسعة ادمصاصه كما هو موضّح في الجدول (3-1).

الجدول (3-1) الخواص الفيزيائية للكربون الحبيبي والكربون المقسّى.

Parameters	Granular activated carbon bed	Solidified activated carbon bed
Density of adsorbent, kg/m ³	360	600
Heat conductivity of adsorbent, W/(m °C)	0.017	0.27-0.34
Limiting adsorption capacity x_0 , kg/kg	0.284	0.367

تمَّ اختبار أوعية الادمصاص الثلاثة ضمن نظام تبريد بسريرين وبدون استرجاع للحرارة والكتلة وباستخدام الميثانول كوسيط تبريد وتبيّن مايلي:

إنَّ معامل التوصيل الحراري للكربون المنشط المقسّى أعلى منه للكربون الحبيبي وبالتالي وُجِد أنَّ معامل انتقال الحرارة الكلي للوعاءين 2 و 3 أعلى منه للوعاء 1.

إنَّ تصميم أفنية تدفق غاز التبريد مهم جداً لتحسين أداء الأوعية ويظهر ذلك أكثر وضوحاً في الأوعية التي تستخدم الكربون المقسّى، وبالتالي كانت استطاعة التبريد ومعامل الأداء للدّارة التي تستخدم الوعاء 3 أعلى منه في الدّارة التي تستخدم الوعاء 1 أو 2 وذلك بسبب منطقية توزيع أفنية انتقال الغاز. والنتائج موضّحة في الجدول (4-1).

الجدول (4-1) نتائج اختبار الأوعية الثلاث.

Adsorber	Average temperature of glycol/ice (°C)	Heating temperature (°C)	Cycle time (min)	Desorption and adsorption time (min)	Heat transfer coefficient (W/(m ² °C))	Cooling power (kW)	Average heating power (kW)	COP	SCP (W/kg)
Adsorber1	-7 (glycol)	110	30	15	25.4	0.53	12.59	0.042	10.2
Adsorber2	-4 (ice)	62-100			99.6	0.42	19.49	0.022	10.2
Adsorber3	-4 (ice)	62-100			86.3	1.43	22.75	0.063	11.9
Adsorber1	-7 (glycol)	110	40	20	19.1	0.55	9.22	0.059	10.6
Adsorber2	-5.5 (ice)	67-114			82.2	0.43	14.78	0.029	10.5
Adsorber3	-5.5 (ice)	67-114			121.5	1.46	22.23	0.065	12.2
Adsorber1	-7 (glycol)	110	50	25	20.1	0.57	9.98	0.057	11.0
Adsorber2	-5.5 (ice)	65-118			92.4	0.48	15.73	0.031	11.7
Adsorber3	-5.5 (ice)	65-118			81.2	1.58	21.34	0.074	13.2

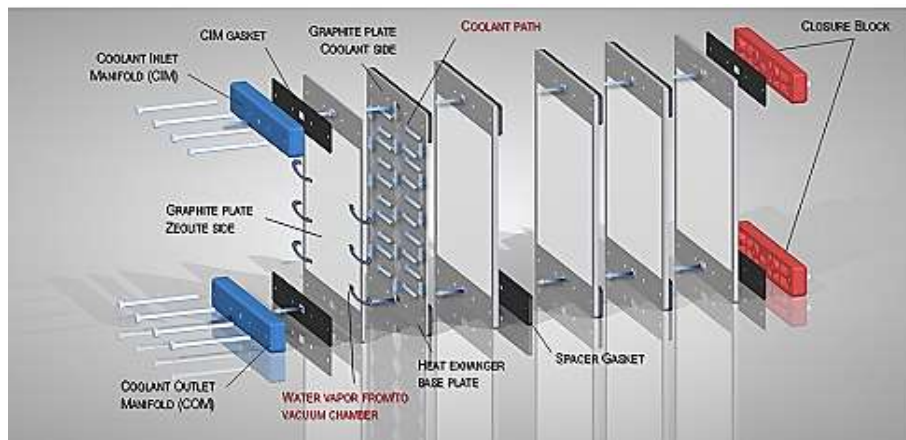
تمَّ اختبار الأوعية 1 و 3 في نظام بسريرين مع استرجاع كتلي وحراري فأدّى ذلك إلى ازدياد استطاعة التبريد بسبب عملية الاسترجاع الكتلي، وانخفاض استطاعة التسخين بسبب عملية الاسترجاع الحراري، وبالنتيجة زاد معامل الأداء COP بشكل ملحوظ كما زاد معامل استطاعة التبريد النوعية SCP. ونتائج اختبار الوعاء 1 موضّحة في الجدول (5-1).

الجدول (5-1) نتائج اختبار الوعاء 1 في نظام تبريد بسريرين مع استرجاع حراري وكتلي.

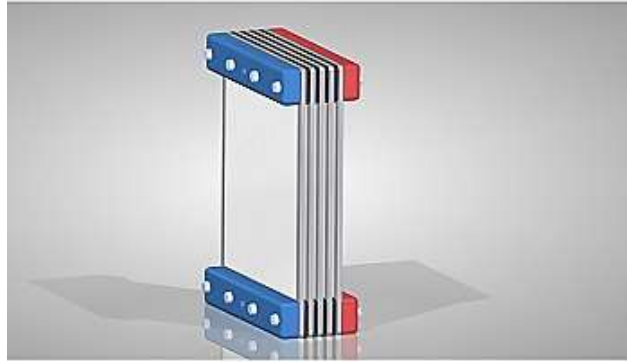
Experiments	Temperature of glycol (°C)	Heating temperature (°C)	Cycle time (min)	Desorption and adsorption time (min)	Recovery time of heat and mass (min)	Cooling power (kW)	Average heating power (kW)	COP	SCP (W/kg)
1	-7	110	36	16	2	0.59	8.76	0.067	11.4
2	-7	110	40	18	2	0.61	7.68	0.080	11.8
3	-7	110	44	20	2	0.63	7.10	0.089	12.1
4	-7	110	48	22	2	0.67	7.00	0.096	12.9
5	-7	110	52	24	2	0.68	6.51	0.104	13.1

■ عرض Palomba&Vasta [10] (2015) تصميماً جديداً لوعاء ادمصاص صفائحي يتألف من 5 صفائح من الغرافيت المقسّى، يتوضّع الزيوليت على أحد جانبي الصفيحة وعلى الجانب الآخر يتدفق سائل نقل الحرارة، وإنّ وسيط التبريد المستخدم هو الماء. تمّ تصميم هذا المبادل على برنامج النمذجة 3D-CAD ليعطي استطاعة تبريد 0.5-1 kW واستطاعة تبريد نوعية 1-2 kW/kg_{ads}. إنّ معامل التوصيل الحراري المنخفض للزيوليت له تأثير سلبي على فعالية انتقال الحرارة في السرير. تمّ في هذا البحث ترسيب مادة الزيوليت نوع SAPO-34 على صفائح الغرافيت المقسّى، وقد حققت صفيحة زيوليت-غرافيت تركيبة مثالية بكثافة منخفضة وسعة حرارية منخفضة ومعامل توصيل حراري عالٍ لركائز الغرافيت 55-60 W/m.K. يبين الشكل (4-1) وعاء الادمصااص الصفائحي قبل ربط الصفائح وبعد ربطها.

وعاء الادمصااص الناتج كان ذا خواص جذابة من ناحية الوزن والحجم المنخفض وإحكام الضغط واستطاعة تبريد نوعية عالية. إنّ النمذجة والاختبارات التجريبية التي تمّ تنفيذها شجعت على تنفيذ النموذج الأولي التمهيدي الذي لازال قيد التجريب والاختبار لاكتشاف العيوب التصميمية.



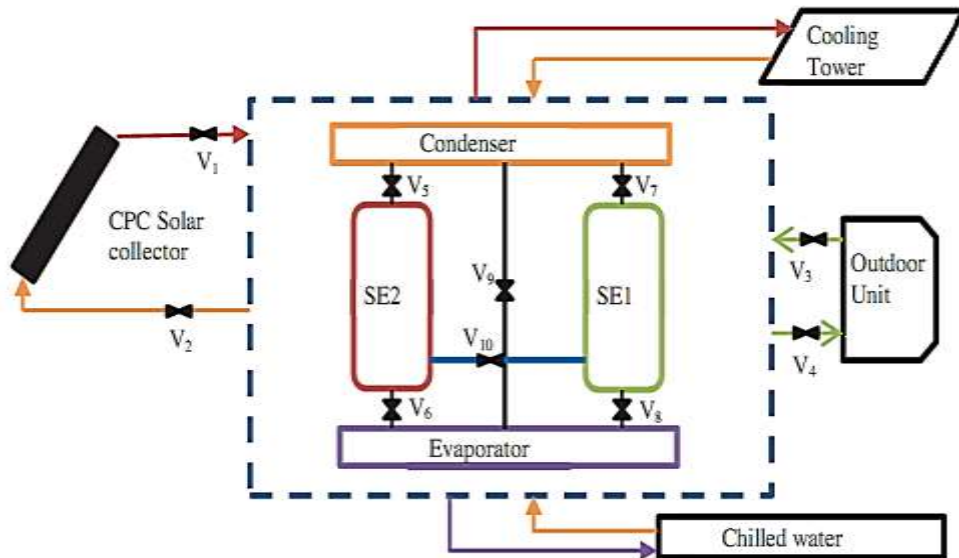
الشكل (4-1-a) وعاء الادمصااص الصفائحي قبل ربط الصفائح.



الشكل (4-1-b) وعاء الادمصاص الصفائحي بعد ربط الصفائح.

■ قام kabir&Alam [11] (2015) بإجراء دراسة عددية لنظام تبريد ادمصاصي بسريرين مفاد مباشرة بالطاقة الشمسية، والزوج العامل المستخدم هو (السيليكا جيل/ ماء). كان هناك حاجة لـ 14 مجمّع شمسي على الأقل مع زمن دورة 1000 sec من أجل الظروف المناخية لمدينة دكا. تمّ إجراء عملية استرجاع داخلي لبخار وسيط التبريد من أجل تحسين أداء هذه الدارة.

يُبين الشكل (5-1) سريري ادمصاص (SE1, SE2) موصولين بالتعاقب إلى المجمّع الشمسي من أجل عملية (تسخين السرير - فصل - تكاثف)، وموصولين بالتعاقب إلى برج التبريد من أجل عملية (تبريد السرير - ادمصاص - تبخر). المصدر الحراري للنظام في النهار هو المجمّعات الشمسية وفي الليل هو وحدة تسخين خارجية. برج التبريد يعمل في النهار والليل.



الشكل (5-1) نظام تبريد ادمصاصي مفاد بالطاقة الشمسية مع استرجاع كتلي.

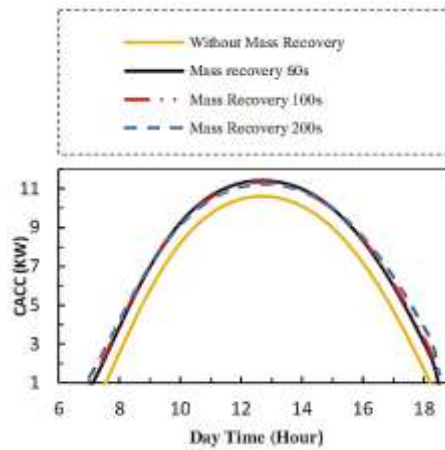
أظهرت الدراسة النتائج التالية:

(1) إنّ إجراء عملية استرجاع كتلي وزيادة زمن الاسترجاع الكتلي (من أجل زمن الدورة نفسه) يؤدي إلى تخفيض درجة حرارة الوعاء الساخن. وصلت درجة حرارة السرير إلى 87°C في دورة بدون استرجاع كتلي، ومع زمن استرجاع 200 sec وصلت إلى 72°C .

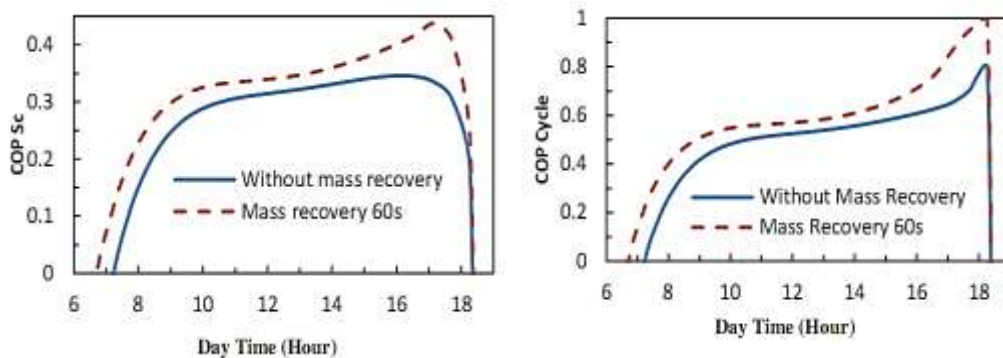
(2) إنّ زمن الاسترجاع الكتلي لا يؤثر على استطاعة التبريد لأنّ هناك سعة ادمصاص محدّدة للزوج العامل وبالتالي يوجد زمن أمثلي لعملية استرجاع الكتلة يصل عنده سرير الادمصاص لحالة الإشباع وهو هنا 60 sec .

(3) إنّ عملية استرجاع الكتلة أدّت إلى زيادة متوسط استطاعة التبريد CACC من 10.5 kW إلى 11.5 kW والشكل (6-1) يوضّح ذلك.

(4) إنّ استرجاع الكتلة يحسّن معامل الأداء الشمسي COP_s ومعامل الأداء الحراري COP للدارة كما هو موضّح في الشكل (7-1).



الشكل (6-1) تأثير زمن الاسترجاع الحراري على متوسط استطاعة التبريد.

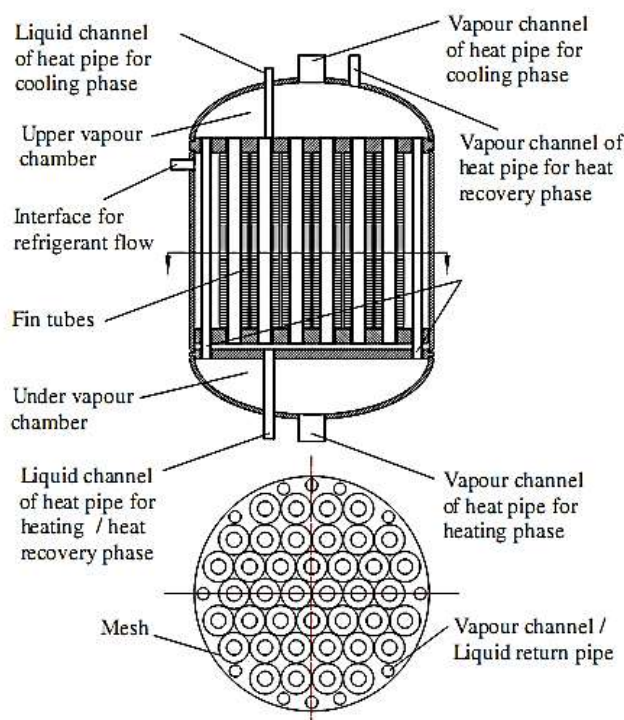


الشكل (7-1) تأثير الاسترجاع الكتلي على معامل الأداء الحراري والشمسي لدارة التبريد.

■ تابع kabir&Alam [12] (2016) الدراسة العددية لنظام التبريد الادمصاصي الشمسي السابق ودرسوا تأثير عملية استرجاع الكتلة على الاختيار الأمثلي لعدد المجمّعات والزمن الأمثلي للاسترجاع.

حيث تؤدي عملية الاسترجاع الكتلي إلى زيادة استطاعة التبريد للدارة وهذا يؤدي إلى إمكانية تقليل مساحة المجمّعات الشمسية بما يُعادل 16.67% من المساحة قبل الاسترجاع، وبعبارة أخرى تقليل عدد المجمّعات، حيث أن متوسط استطاعة التبريد في حالة 12 مجّمع مع استرجاع كتلي تكافئ متوسط استطاعة التبريد مع 14 مجّمع بدون استرجاع كتلي.

■ درس Li&Wang [13] (2008) تأثير الاسترجاع الحراري والكتلي على أداء نظام تبريد ادمصاصي يستخدم الأمونيا وسيطاً للتبريد ومادة ادمصاصية مركّبة مؤلفة من الكربون المنشط وملح $CaCl_2$ وذلك لتحسين أداء انتقال الحرارة والكتلة في سرير الادمصاص. المبادل الحراري من نوع shell and tube ويتألف من 40 أنبوب مريّش ويتم حشو الكربون المنشط بين ريش الأنبوب. كتلة المادة ادمصاصية في كل سرير 7.4 kg والتي تتضمن 5.9 kg من $CaCl_2$. يُبين الشكل (8-1) مقطعاً طولياً وعرضياً في سرير الادمصاص.



الشكل (8-1) مقطع طولي وعرضي في سرير الادمصاص والمبادل أنبوبي مريّش.

وتمّت المقارنة بين أربع دورات عند الشروط التجريبية المبينة في الجدول (6-1):

الجدول (6-1) الشروط التجريبية للدورات الأربعة.

The flow rate of cooling water (kg/s)	The cooling water temperature (°C)	Generation temperature (°C)	Mass recovery time (s)	Heat recovery time (s)
0.98	30	145	40	120

(1) دورة بدون استرجاع كتلي (MR0) Mass Recovery Zero

(2) دورة مع استرجاع كتلي (MR) Mass Recovery

(3) دورة مع استرجاع حراري ثم كتلي (HMR) Heat Mass Recovery

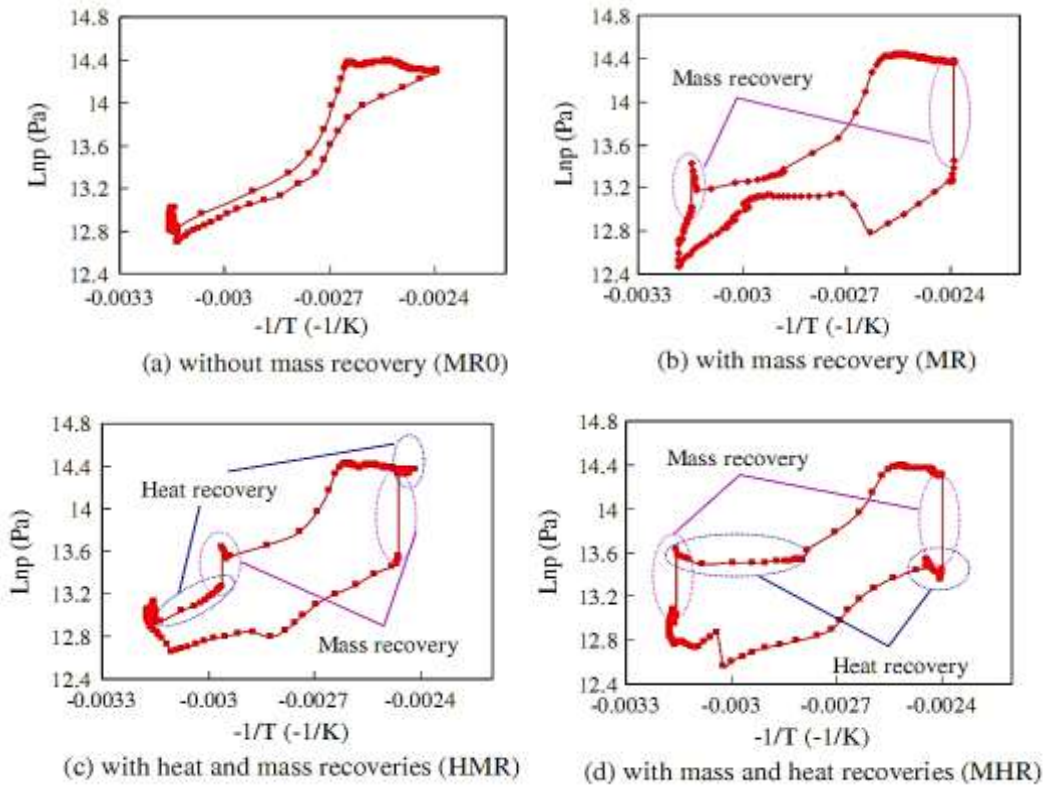
(4) دورة مع استرجاع كتلي ثم حراري (MHR) Mass Heat Recovery.

وُجِدَ أنَّ الاستهلاك الحراري في الدورات مع HMR و MHR انخفض بسبب الاسترجاع الحراري، وزادت الإنتاجية التبريدية في الدورات مع MR و HMR و MHR نتيجة الاسترجاع الكتلي، وحقت الدورة مع MHR أعلى قيمة للمعاملات COP و SCP مقارنةً بعمليات الاسترجاع الأخرى. هذه النتائج موضحة بالأرقام في الجدول (7-1):

الجدول (7-1) المقارنة بين الدورات الأربعة.

Mass recovery type	Heating power (kW)	Ice production (kg h ⁻¹)	Cooling power (kW)	COP		SCP (W kg ⁻¹)	
				Value	Δ (%)	Value	Δ (%)
MR0	11.04	11.7	1.69	0.15	—	286.4	—
MR	11.04	13.8	1.98	0.18	20	335.6	17.2
HMR	9.93	13.5	1.96	0.20	33.3	332.2	16
MHR	9.93	15.2	2.17	0.22	46.7	367.8	28.4

يُبيّن الشكل (9-1) دورة التبريد الأساسية ودورات التبريد مع حالات الاسترجاع الثلاثة، والمساحة الأكبر تعني معامل أداء أعلى للدورة.



الشكل (9-1) مخططات كلايرون التجريبية للدورات الأربعة.

■ قام Duong&Hong [4] (2017) بإجراء محاكاة عددية لسرير ادمصاص يحوي مبادلاً حرارياً من النوع الأنبوبي المريش ويعمل في شيلر ادمصاصي يستخدم الزوج (سيليكاجيل/ ماء) وعند شروط التشغيل التالية: درجة حرارة التكاثف والتبخر $T_{evap} = 15^{\circ}\text{C}$, $T_{cond} = 30^{\circ}\text{C}$. من أجل رفع كل من COP و SCP تم دراسة ثلاثة نماذج من الدورات HR و MR و MHR عند درجات حرارة فصل مختلفة وكانت النتائج التالية:

(1) دورة مع استرجاع كتلي MR: كانت دورة استرجاع الكتلة أكثر تأثيراً عند درجة حرارة منخفضة نسبياً. حيث تحسّن كل من COP و SCP بنسبة 24.4% و 37.5% بالترتيب عند درجة حرارة تسخين 60°C . بينما كان التحسّن في COP و SCP بنسبة 5% و 16% بالترتيب عند درجة حرارة تسخين 90°C .

(2) دورة استرجاع حراري HR: إنّ الاسترجاع الحراري عند درجة حرارة 60°C أدّى إلى زيادة COP بنسبة 12.56% لكنّه خفّض SCP بنسبة 10.84%. بينما عند درجة حرارة 90°C أدّى إلى زيادة COP بنسبة 11.83% وخفّض SCP بنسبة 5.96%. لذلك فإنّ دورة الاسترجاع الحراري ليست دائماً الخيار الأفضل تبعاً للنقص في SCP.

(3) دورة استرجاع حراري وكتلي مشتركة MHR: وُجِدَ أنّ هذه الدورة تتغلّب على مساوئ نظام التبريد الادمصاصي حيث تؤديّ إلى تحسّن معتبر في COP (خاصةً عند درجة حرارة منخفضة للماء الساخن) دون أن تُخفّض من قيمة SCP. عند درجة حرارة ماء ساخن منخفضة نسبياً تأتي الحصّة الرئيسيّة في زيادة COP نتيجة الاسترجاع الكتلي، بينما عند درجة حرارة ماء ساخن مرتفعة نسبياً فإنّ زيادة COP تأتي بشكل رئيسي نتيجة الاسترجاع الحراري.

1-3- هدف البحث:

بعد إجراء الدراسة المرجعية الموسعة تمّ تحديد هدف البحث وخطواته كمايلي:

- 1- تصنيع منصّة اختبار تحوي سرير ادمصاص ودارة فريون ودارة لتدوير سائل نقل الحرارة (الماء) في المبادل الحراري للسرير، والهدف من هذه المنصة إجراء اختبارات لأزواج ادمصاصية مختلفة للحصول على سعة الادمصاص للزوج العامل ومن ثمّ اختيار الزوج الأفضل.
- 2- تصميم نموذج أولي لسرير ادمصاص يعمل في دارة تبريد وفق شروط حرارية معينة، هذه الدارة تعمل على طاقة الضياعات الصناعية ووفقاً للشروط المناخية لريف دمشق، وتستخدم الزوج العامل (كربون منشط حبيبي / R134a)، ومن ثمّ حساب معامل استطاعة التبريد النوعية SCP ومعامل الأداء التبريدي COP لهذه الدارة.
- 3- تطوير سرير الادمصاص بهدف زيادة معامل استطاعة التبريد النوعية ومعامل الأداء للدارة. وذلك وفق الخطوات التالية:
 - تغيير الزوج العامل واختبار ثلاثة أزواج ادمصاصية أخرى.
 - زيادة مساحة سطح التبادل الخارجي للمبادل الحراري من جهة المادة الادمصاصية الصلبة وذلك عن طريق تبديل الريش الخارجية المركبة على أنابيب المبادل من مسطحة إلى متعرجة ثمّ زيادة عدد هذه الريش.
 - زيادة مساحة سطح التبادل الداخلي للمبادل الحراري من جهة سائل نقل الحرارة (الماء) وذلك بإضافة عدداً من الريش النصف قطرية داخل الأنابيب.
 - استخدام تقنيات الاسترجاع بين السريرين (استرجاع حراري، استرجاع كتلي، استرجاع حراري ثمّ كتلي، استرجاع كتلي ثمّ حراري).

1-4- الجديد في بحثنا

1. تحسين عملية انتقال الحرارة من جهة المادة الادمصاصية الصلبة (الكربون المنشط) وذلك عن طريق تغيير الريشة الخارجية للمبادل من مسطحة إلى متعرجة ومن ثم زيادة عدد الريش، ودراسة تأثير ذلك على معامل انتقال الحرارة الكلي لوعاء الادمصاص وزمن الدّورة واستطاعة التبريد ومعامل أداء الدارة.
2. تحسين عملية انتقال الحرارة من جهة سائل نقل الحرارة (الماء) وذلك عن طريق إضافة ريش نصف قطرية ضمن أنابيب المبادل وزيادة عددها، ودراسة تأثير ذلك على معامل انتقال الحرارة الكلي لوعاء الادمصاص وزمن الدّورة واستطاعة التبريد ومعامل أداء الدارة.
3. الدراسة التحليلية لعملية الاسترجاع الحراري HR والاسترجاع الكتلي MR والاسترجاع المشترك MHR و HMR، وحساب أزمنة الاسترجاع باستخدام معادلات التوازن الحراري والكتلي للسّير.
4. دراسة تأثير درجة حرارة السّير البارد T_I في نهاية عملية الاسترجاع الحراري على استطاعة التبريد ومعامل الأداء لدارة التبريد، وتمّت المقارنة بين ثلاث أنواع من دورات الاسترجاع (دورة مع استرجاع حراري HR ، ودورة مع استرجاع كتلي ثم حراري MHR ، ودورة مع استرجاع حراري ثم كتلي HMR).

الفصل الثاني

الاد مصاص ودارات التبريد الاد مصاصية

2-1- لمحة تاريخية عن الأنظمة الادمصاصية

- بدأ تصميم وتطوير أنظمة التبريد بالادمصاص في عشرينات القرن الماضي 1920s باستخدام السيليكا جيل وثاني أكسيد الكبريت كزوج ادمصاصي من قبل Miller عام 1929. ومع تطوير آلات التبريد الضاغطة البخارية وإدخال مركبات كلور فلور كربون CFCs كوسائط تبريد انحسر استخدام تقنية التبريد بالادمصاص حتى سبعينات القرن الماضي 1970s. إلا أن ظهور التأثيرات البيئية الضارة لمركبات CFCs ومحدودية مصادر الطاقة التقليدية أعاد إلى الواجهة ضرورة العمل على أنظمة التبريد العاملة مباشرة على الطاقة الحرارية.

- قام المعهد التقني للغاز (Institute of Gas Technology IGT) عام 1972 بإجراء دراسة عن جدوى نظام التبريد بادمصاص بخار الماء. بدأ الاهتمام بهذه التقنية ينمو بسرعة في الثمانينات 1980s مع العديد من الباحثين في هذا المجال والذين عملوا على أنظمة ادمصاص وأزواج ادمصاصية متنوعة. [14]

- قامت شركة نيشيودو (Nnishiyodo Kuchou) في اليابان عام 1986 بتصنيع أول نظام تبريد صناعي ادمصاصي. منذ ذلك الحين تم استخدام الشيلر الادمصاصي وتقييمه في مجال واسع من التطبيقات في اليابان وأوروبا والولايات المتحدة الأمريكية. [14]

- أشار Gritof إلى أن براد حفظ اللقاح الشمسي المدروس في مختبره أوائل التسعينات 1990s والذي يستخدم الكربون المنشط/أمونيا زوجاً عاملاً يمكن أن يحافظ على درجة حرارة الصندوق البارد عند 0°C خلال النهار، بعد دورة ادمصاص واحدة خلال الليلة السابقة. [15]

- قام شركة EG-Solar في ألمانيا بتصنيع ثلاجة شمسية عام 1991 تستخدم الماء كوسيط تبريد والزيوليت كمادة ادمصاصية، غرفة التبريد بحجم 4 liter من أجل حفظ الطعام واللقاحات. الأبعاد الخارجية لغرفة التبريد 0.49*0.56*0.71 m. تم التبرع بنموذج من هذه الثلاجة لمركز الطاقة المتجددة الوطني في جامعة ليما (Lima) من أجل اختباره في المناطق الريفية في البيرو حيث لا تتوفر شبكة كهربائية. [16]

- قام Dr.Hans Martin من معهد فرانهور (Fraunhofer) لأنظمة الطاقة الشمسية في مدينة فريبورغ (Freiburg) في ألمانيا بنشر بحث عام 2000 عرض فيه شيلرات ادمصاصية متوفرة في

الأسواق تقوم بطرحها شركات يابانية. مجال استطاعة التبريد لها 400-70 kW، درجة حرارة القيادة تبدأ من 55°C، معامل الأداء التصميمي COP لها بحدود 0.65. كما عرض شيلر ادمصاصي شمسي تمّ استخدامه لتكييف الهواء للمشفى الجامعي في فريبورغ حيث مساحة اللواقط الشمسية المفرغة 90m². [17]

- حصل Xia.et.al عام 2004 على براءة اختراع لشيلر ادمصاصي، يعمل هذا الشيلر حالياً في معهد شنغهاي (Shanghai) للعلوم كجزء من نظام تكييف الهواء بالطاقة الشمسية في الصين. حيث يتألف النظام من مجمعات شمسية أنبوبية مفرغة بمساحة 150 m²، وشيلرين ادمصاصيين باستطاعة اسمية 8.5 kW لكل واحد، والزوج العامل هو السيليكا جيل/ماء. يعمل هذا النظام بشكل فعّال ضمن المجال 55 – 95°C. واستُخدم هذا الشيلر أيضاً في مقاطعة جيانغسو (Jiangsu) في الصين لتبريد مستودعات الحبوب خلال فصل الصيف. وقد وافقت الشركة المصنعة لتجهيزات تكييف الهواء شوانغليانغ (Shuangliang) في مقاطعة جيانغسو على التعاون مع فريق البحث على إنتاج وحدات باستطاعة 5, 20, 50, 100, 200 kW. [15]

- قام Dr.Hans Martin من معهد فرانهورفر (Fraunhofer) لأنظمة الطاقة الشمسية في مدينة فريبورغ (Freiburg) في ألمانيا بعرض مجموعة أنظمة تبريد حرارية، ومن ضمنها قام بعرض أكبر نظام تكييف تمّ إنشاؤه حتى تاريخ 2006 وهو في مدينة إينوفيتا (Inofita) في أثينا من أجل تكييف مصنع لإنتاج مستحضرات التجميل. يتكون نظام التكييف من حقل المجمعات الشمسية المسطحة بمساحة 2700 m²، وشيلران ادمصاصيان باستطاعة تبريد 350 kW لكل واحد، وثلاث شيلرات ضاغطة بخارية باستطاعة 350 kW للواحد. [18]

- قدّم Roberto Best عام 2008 من مركز الطاقة في المكسيك بحثاً عن تطوير أنظمة الادمصاص والشركات العاملة في هذا المجال. حيث بيّن أنّ هناك نظامان تجاريان معروفان في اليابان هما شركة نيشيودو (Nishiyodo) وشركة مايكاوا (Mayekawa) ينتجان آلات تبريد ادمصاصية استطاعتها التبريدية ضمن المجال 50-70 kW وتستخدم هذه الأنظمة أزواج الزيوليت/ماء والسيليكا جيل/ماء. [19]

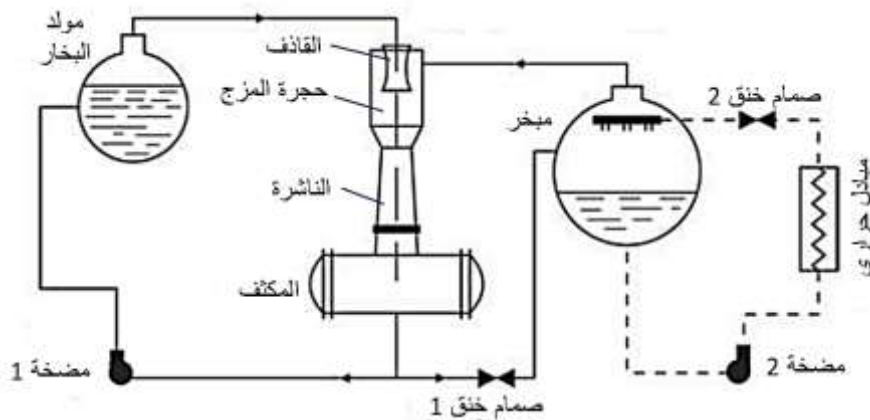
- قام مركز أبحاث الطاقة في هولندا (Energy research Center of the Netherlands) بتصنيع شيلر ادمصاصي يستخدم الزوج سيليكيا جيل/ماء باستطاعة 2.5 kW ، وإنَّ أخفض درجة حرارة يمكن أن يُبرَّد الماء إليها 4°C ، أبعاد الآلة 60*60*100 cm . [20]

- تمَّ تصنيع شيلر ادمصاصي من قبل (New Energy Transfer NET) في وارسو - بولندا 2015، استطاعة التبريد الإسمية له 90 kW ، يحوي الشيلر 3 أسرة، يتم تشغيله بواسطة الماء الساخن بواسطة مبادل حراري، ويتم تأمين الماء البارد بواسطة برج تبريد مفتوح، الزوج المستخدم سيليكيا جيل/ماء. [21]

2-2- آلات التبريد الحرارية

2-2-1- آلات التبريد القاذفة للبخر:

تتنسب آلات التبريد القاذفة للبخر إلى مجموعة آلات التبريد التي تستخدم القدرة الحرارية، إلاَّ أنَّه من أجل تحقيق الدارة العكسية في الآلة يتم تحويل القدرة الحرارية إلى عمل ميكانيكي، وبهذا الشكل تتضمن الآلة القاذفة للبخر مجموعة متسلسلة من الإجراءات المباشرة والعكوسة. غالباً ما يكون الماء هو الجسم العامل في الآلة، إلاَّ أنَّه عندما يُراد الحصول على درجات حرارة منخفضة يتم استخدام الفريونات كوسائط تبريد لأنَّ استخدام الماء في هذه الحالة يتطلب ضغوط تخلخل عالية في المبخر. يوضَّح الشكل (2-1) أجزاء آلة التبريد القاذفة للبخر وآليَّة عملها.



الشكل (2-1) أجزاء آلة التبريد القاذفة للبخر.

- يتجه البخار العامل من مولد البخار إلى نفثة القاذف حيث تتحول ضمنها الطاقة الكامنة للبخر إلى طاقة حركية ذات سرعة عالية.

- تسبب هذه السرعة ضمن البوق توليد ضغط سالب (تخلخل) يؤدي إلى جذب الأبخرة الباردة القادمة من المبخر، ويتم اختلاط البخار العامل والبارد في حجرة المزج.
- يتجه خليط البخار إلى الديفيوزر (بوق ناشر) حيث يرتفع فيه ضغط البخار على حساب انخفاض سرعته وبالتالي تتحقق عملية انضغاط البخار من ضغط التبخر إلى قيمة الضغط في المكثف.
- تتم عملية تكاثف البخار في المكثف باستعمال الماء كسائل تبريد.
- تنقسم كمية الماء المتكاثفة في المكثف إلى جزأين يُضخ الجزء الأول بواسطة المضخة 1 إلى مولد البخار، أما الجزء الآخر فيوجه إلى المبخر مروراً بصمام الخنق 1.
- تتم عملية تبريد كتلة الماء الموجودة ضمن المبخر على حساب تشكل البخار، وإن كمية الماء الموجودة ضمن المبخر والجاهزة للاستعمال لأغراض التبريد تُسمى الماء العامل.
- يتم سحب الماء العامل من المبخر إلى المبادل الحراري (مستهلك البرودة) بواسطة المضخة 2، ومن ثمَّ يعود الماء إلى المبخر عبر صمام الخنق 2. [22]

2-2-2- آلات التبريد الادمصاصية:

يتم في هذه الآلة نقل الحرارة من الوسط المبرد ذي درجة الحرارة المنخفضة إلى الوسط الخارجي ذي درجة الحرارة المرتفعة بصرف طاقة حرارية فقط.

إنَّ الآلات الأكثر انتشاراً هي الآلات التي تعمل على محلول ثنائي (وسيط التبريد/مادة ماصة). أكثر المحاليل انتشاراً هي محلول (الأمونيا: وسيط تبريد/الماء: المادة الماصة) ومحلول (الماء: وسيط تبريد/بروميد الليثيوم: مادة ماصة). يوضّح الشكل (2-2) أجزاء آلة التبريد الادمصاصية وآلية عملها.

دورة التبريد لآلة التبريد الادمصاصية:

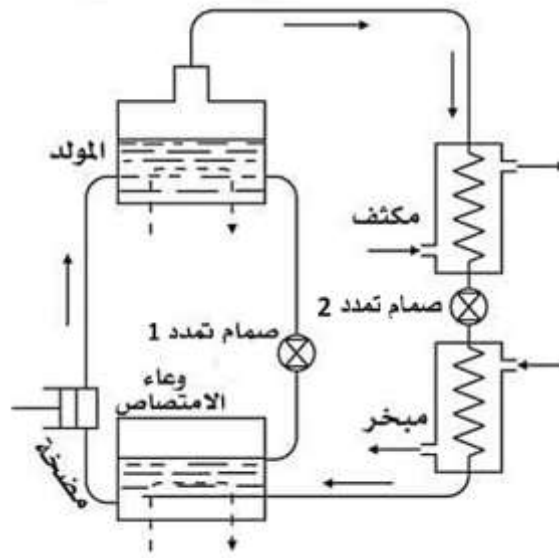
إذا كان محتوى وسيط التبريد في المحلول الثنائي عالياً يسمى محلولاً غنياً، وإذا كان قليلاً يسمى محلولاً فقيراً.

• دورة المحلول الثنائي:

- يتم ضخ المحلول الغني من وعاء الادمصاص إلى المولد.
- يتبخر جزء من وسيط التبريد في المولد عند درجة حرارة T_H ويصبح المحلول فقير التركيز.
- يعود المحلول فقير التركيز من المولد إلى وعاء الادمصاص عبر صمام الخنق 1 ، وبالتالي ينخفض الضغط من ضغط المكثف إلى ضغط المبخر.

• دورة وسيط التبريد الصرف:

- يتجه بخار وسيط التبريد من المولد إلى المكثف حيث يتكاثف عند درجة حرارة T_C .
- يمر سائل وسيط التبريد المتكاثف عبر صمام الخنق 2 فينخفض الضغط من ضغط التكاثف إلى ضغط التبخر.
- يتبخر سائل وسيط التبريد في المبخر عند درجة حرارة T_E منجزاً بذلك الأثر التبريدي.
- ثم يتدفق بخار وسيط التبريد إلى وعاء الامتصاص حيث يتم امتصاصه من قبل المحلول الفقير العائد من المولد عند درجة حرارة T_A . [22]



الشكل (2-2) أجزاء آلة التبريد الادمصاصية.

الميزات المشتركة بين آلات التبريد القاذفة للبخار وآلات التبريد الادمصاصية وآلات التبريد الادمصاصية:

1. يتم الحصول على الأثر التبريدي باستخدام الطاقة الحرارية فقط ولا حاجة لاستهلاك طاقة ميكانيكية.
2. يمكن استخدام مصادر الطاقة المتجددة (الشمسية والجيوحرارية وطاقة الضياعات الصناعية) لتشغيل هذه الآلات.
3. لاتحوي هذه الآلات أجزاء متحركة باستثناء المضخات وبالتالي فإن أعمال الصيانة محدودة عند مقارنتها بالآلات الضاغطة البخارية.
4. يمكن استخدام الماء كوسيط تبريد في حال كان الهدف هو تكييف الهواء.

مميزات آلات التبريد الادمصاصية عند مقارنتها بآلات التبريد الامتصاصية وآلات التبريد القاذفة للبخر:

1. يُعتبر تصميم آلة التبريد الامتصاصية أبسط من آلة التبريد الادمصاصية، بينما تصميم آلة التبريد القاذفة للبخر هو الأكثر تعقيداً.
2. دورة حياة الآلة الامتصاصية أقصر منها مقارنة بآلة التبريد الادمصاصية بسبب مشاكل التآكل بالأملح.
3. في حال استخدام بروميد الليثيوم كمادة ماصة في الآلة الامتصاصية عنها يجب تغييرها كل 5 سنوات وسطياً. في حين يمكن أن تعمل المواد الادمصاصية الصلبة (الكربون المنشط، السيليكا جيل، الزيوليت) لفترة زمنية طويلة قد تدوم لـ 30 عاماً.

2-3 - ظاهرة الادمصاص: Adsorption Phenomenon

الادمصاص هو انفصال الجزيئات من الطور الغازي أو السائل لتتراكم أو تتركز على سطح المادة الصلبة والتي تُسمى الطبقة القاعدية الصلبة. تُسمى المادة الصلبة بالمادة الادمصاصية Adsorbent. والمادة التي تراكمت أو تركزت على سطح المادة الصلبة بالمادة المدمصة Adsorbate. [23],[24]

2-3-1 - الادمصاص الفيزيائي: Physical Adsorption

عندما تتواجد المادة الصلبة ذات السطح غير المشبع مع الطور الغازي عندئذٍ فإن جزيئات الغاز سوف تُشكل روابط مع الجزيئات السطحية للمادة الصلبة، وتُصنّف قوى الارتباط Binding Forces إلى مجموعتين: (1) قوى فاندرفالس (2) قوى الكترولستانية مثل تفاعلات الاستقطاب. إن هذه العملية لا تسبب تشويهاً أو تغييراً في البنية المرئية للمادة الصلبة.

حيث تعبر معادلة فاندرفالس عن حالة الغاز الحقيقي وهي على الشكل التالي:

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right) (v - b) = RT$$

تم إضافة العنصر $\frac{a}{v^2}$ إلى ضغط الغاز ليعبر عن قوى الترابط بين جزيئات الغاز.

تم طرح الثابت b من الحجم النوعي ليعبر عن الحجم الذي تملؤه الجزيئات ضمن الحيز المدروس.

تترافق عملية الادمصاص الفيزيائي من الطّور الغازي أو السائل بإطلاق حرارة وهي تعتمد على طبيعة الزوج الادمصاصي المستخدم. وإنَّ حرارة الادمصاص التي يتمَّ تحريرها تتألف من طاقة الارتباط نتيجة قوى فاندرفالس والقوى الالكتروستاتية وذلك في حالة الادمصاص من الطّور السائل، وفي حالة الادمصاص من الطّور الغازي تُضاف الحرارة الكامنة (للتبخّر/ تكاثف) نتيجة التغير الطّوري من غاز إلى سائل.

يتم إرجاع المادة الادمصاصية إلى وضعها الأصلي بواسطة عملية الفصل (التحرير) Desorption ولتحقيقها يلزم تطبيق حرارة. [24],[25]

الحرارة الناتجة عن عملية الادمصاص أعلى بحوالي 30-100% من الحرارة الناتجة عن عملية تكاثف المادة المدمصة [26]. الجدول (1-2) يُبين الحرارة الناتجة عن الادمصاص وسعة الادمصاص العظمى تبعاً للزوج المستخدم. [27]

الجدول (1-2) الحرارة الناتجة عن الادمصاص تبعاً للزوج المستخدم. [27]

Adsorbate-adsorbent	Maximum adsorbate capacity (kg/kg) ^a	Average heat of adsorption (kJ/kg adsorbate) ^a	Adsorbent specific heat (kJ/kg) ^a	Energy density (kJ/kg adsorbate)	Temperature range (°C)
Water-zeolite 4A	0.22	4400	1.05	1250	30-350
Water-zeolite 5A	0.22	4180	1.05	1200	30-350
Water-zeolite MgA	0.29	3400	1.06	800	60-250
Water-zeolite 13X	0.30	4400	0.92	1290	30-350
Water-zeolite 13X	0.27		0.84	930	20-300
Water-zeolite 10A	0.20	4000		897	50-250
Water-zeolite 13X	0.27	3400	1.06	1200	30-350
Water-clinoptilolite	0.12	3000	1.11	480	20-240
Water-mordenite	0.11	4000		419	30-350
Water-chabazite	0.17	3000	1.08	700	30-250
Water-charcoal	0.40	2320	1.09	1200	30-250
Water-ac. alumina	0.19	2480	1.00	660	30-250
Water-silica gel	0.37	2560	0.88	1000	30-150
Water-silica gel	0.20	2500	1.045	600	20-130
Methanol-zeolite 13X	0.20	2400	1.07		
Methanol-zeolite 4A	0.16	2300	1.07		
Methanol-zeolite 5A	0.17	2300	1.07		
Methanol-zeolite 5A	0.17	2300	1.07		
Methanol-ac. carbon	0.32	1400	0.9	590	20-140

2-3-2- الادمصاص الكيميائي: Chemical Adsorption

عندما تُشكّل جزيئات الغاز رابطة كيميائية (مشاركة أو شاردية) مع سطح المادة الصلبة عندئذٍ تُسمّى هذه الظاهرة بالادمصاص الكيميائي، حيث تتشارك جزيئات المادة المدمصة والجزيئات السطحية

للمادة الادمصاصية الصلبة بالإلكترونات ويشكلان مركباً ذا سطح معقد. نتيجة هذه العملية يتغير حجم المادة الادمصاصية الصلبة بشكل كبير.

إنَّ قوى الروابط الكيميائية أكبر من قوى فاندرالس لذلك ولإجراء عملية الفصل يجب إمداد وعاء الادمصاص بحرارة أكبر بكثير منها في الادمصاص الفيزيائي لتحقيق حركات سريعة للتفاعل من أجل تحطيم الروابط الكيميائية القوية. [24],[25]

2-4- الأزواج العاملة (مادة ادمصاصية/مدمصة): Working Pairs

- في حالة الادمصاص الفيزيائي: تُصنع المواد الادمصاصية النموذجية غالباً من السيليكا جيل، الزيوليت، الكربون المنشط.

المواد المدمصة (وسائط التبريد) يمكن أن تكون الماء، الأمونيا، الميثانول، الإيثانول، والفريونات الصديقة للبيئة مثل $R 134a$ و $R 507A$ و $R 407C$ و $R 410a$.

- الأزواج الفيزيائية الشائعة والمستخدمة تجارياً هي:

- زيوليت/ماء (Zeolite/ H_2O) لدرجات حرارة تبخر فوق الصفر.
- جيل السيليكا/ماء (Silica Gel / H_2O) لدرجات حرارة تبخر فوق الصفر.
- كربون منشط/ميثانول (Activated Carbon/ Methanol) لدرجات حرارة تبخر تحت الصفر.
- كربون منشط/أمونيا (Activated Carbon / Ammonia) لدرجات حرارة تبخر تحت الصفر.

[28], [29]

- في حالة الادمصاص الكيميائي: هناك ثلاث مجموعات رئيسية للأزواج العاملة:

- الأمونيا مع كلوريد المعدن Metal chlorides/ammonia مثل: $BaCl_2$, $MnCl_2$, $SrCl_2$.
- الهيدروجين مع هيدريد المعدن Metal hydrides/Hydrogen مثل: $LaNi_5$, $LaNi_{4.5}Al_{0.5}$.
- الماء مع أكسيد المعدن Metal oxides/water مثل MnO_2 .

[25], [29]

2-5- دارة التبريد الادمصاصية:

2-5-1- مبدأ دارة التبريد الادمصاصية:

في دورة التبريد الادمصاصية لا يتم ضغط بخار وسيط التبريد إلى ضغط ودرجة حرارة عالية بواسطة ضاغط بل يتم ادمصاصه بواسطة أجسام صلبة ذات مسامية مجهريّة عالية وبالتالي تتطلب هذه الدورة طاقة حرارية فقط ما يعني أنّ عملية الادمصاص والفصل تؤدي دور الطّاقة الميكانيكيّة.

تعمل آلة التبريد الادمصاصية بين ثلاث مستويات لدرجات الحرارة:

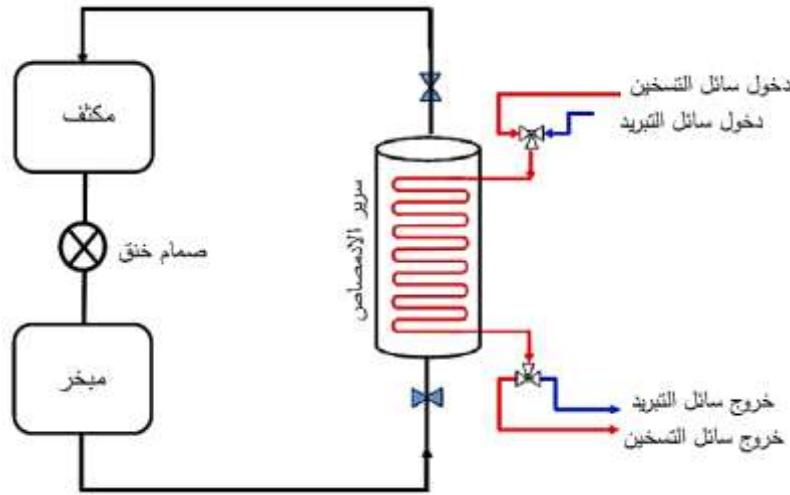
- مستوى عالي: درجة الحرارة التي يتم عندها الفصل أو التحرير T_D .
- مستوى متوسط: درجة حرارة التكاثف T_{cond} ودرجة حرارة الادمصاص T_A .
- مستوى منخفض: درجة حرارة التبخر T_{evap} .

بينما تعمل الآلة الضاغطة البخاريّة بين مستويين لدرجة الحرارة وتحتاج لطاقة ميكانيكيّة. [27]

2-5-2- الأجزاء الرئيسيّة لدارة تبريد ادمصاصية:

تتألف دارة التبريد الادمصاصية كما هو موضّح في الشكل (2-3) من الأجزاء التالية:

- (1) وعاء المادة الادمصاصية أو السّيرير: وهو عبارة عن وعاء مغلق ومعزول يحوي على مبادل حراري تنتشر على سطحه المادة الادمصاصية مع تأمين أفضية (فراغات) لتسهيل انتقال بخار وسيط التبريد من وإلى السّيرير. يمر في المبادل سائل نقل الحرارة القادم من المسخّن وذلك في فترة تسخين السّيرير، وفي فترة التبريد يمر فيه سائل نقل الحرارة القادم من المبرّد. يُبيّن الشكل (3-1) مقطعاً عرضياً في ثلاثة أوعية ادمصاص تحوي مبادلات حرارية من النوع الأنبوبي المريّش، ويبيّن الشكل (4-1) وعاء ادمصاص يحوي مبادل حراري صفائحي، ويبيّن الشكل (8-1) مقطعاً طولياً وعرضياً لوعاء ادمصاص وفيه المبادل الحراري أنبوبي مريّش.
- (2) مبخّر يحوي وشيعة الماء المراد تبريده أو صندوق تشكّل الجليد تبعاً لنوعيّة الاستثمار.
- (3) مكثّف مائي أو هوائي.
- (4) صمّام خنق.
- (5) مبرّد ومسخّن لسائل نقل الحرارة. [30]



الشكل (2-3) الأجزاء الرئيسية لدارة تبريد ادمصاصية.

2-5-3- الدورة الترموديناميكية وآلية عمل الدارة:

تتألف الدورة الترموديناميكية لآلة تبريد ادمصاصية من أربع مراحل، وتمّ تمثيل الدورة على مخطط كلايرون ($P - T - x$) كما هو مبين في الشكل (2-4).

المرحلة الأولى $A \rightarrow B$ تسخين بثبات التركيز (تسخين إيزوستيري):

تكون الصّمامات بين السّرير وكلاً من المكثّف والمبخر مغلقة. يتم تسخين سرير المادة ادمصاصية حتى ترتفع درجة حرارته من T_A إلى T_B ويرتفع الضغط في السّرير من ضغط التبخر P_{evap} إلى ضغط التكاثف P_{cond} مع بقاء تركيز المادة المدمصة في السّرير x_{max} ثابتاً.

المرحلة الثانية $B \rightarrow D$ فصل عند ضغط ثابت (فصل إيزوباري):

عندما تبلغ درجة حرارة السّرير القيمة T_B يفتح الصّمام بين السّرير والمكثّف. يستمر تسخين السّرير وتبدأ عملية تحرير (فصل) جزيئات المادة المدمصة من المادة المسامية على شكل بخار وبالتالي ينقص تركيزها في السّرير، ويتجه البخار إلى المكثّف ويتكاثف فيه مطلقاً طاقة حراريّة إلى الوسط المحيط (النقطة C)، وتستمر درجة حرارة السّرير بالارتفاع حتى تبلغ قيمتها العظمى T_D ويستمر التركيز بالانخفاض حتى يبلغ قيمته الدنيا x_{min} . تتم هذه المرحلة عند ضغط ثابت P_{cond} .

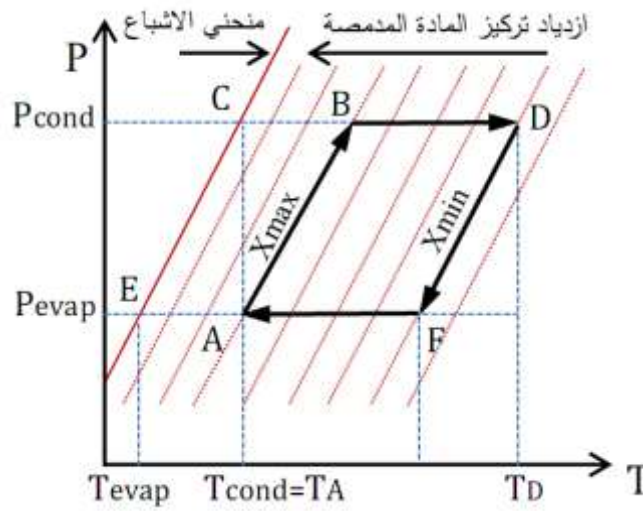
المرحلة الثالثة $D \rightarrow F$ تبريد مع ثبات التركيز (تبريد إيزوستيري):

عندما تبلغ درجة حرارة السّرير القيمة T_D يُغلق الصّمام بين السّرير والمكثّف، ويتم إرسال وسيط التبريد المتكاثف إلى المبخر عبر صمام الخنق فتتخفض درجة حرارة وضغط وسيط التبريد إلى درجة

حرارة وضغط التبخر P_{evap} (العملية $C \rightarrow E$). ويبدأ تبريد السّير حتى تنخفض درجة حرارته من T_D إلى T_F وينخفض الضغط في السّير من P_{cond} إلى P_{evap} مع بقاء تركيز المادة المدمصة في السّير x_{min} ثابتاً.

المرحلة الرابعة $F \rightarrow A$ ادمصاص عند ضغط ثابت (ادمصاص إيزوباري):

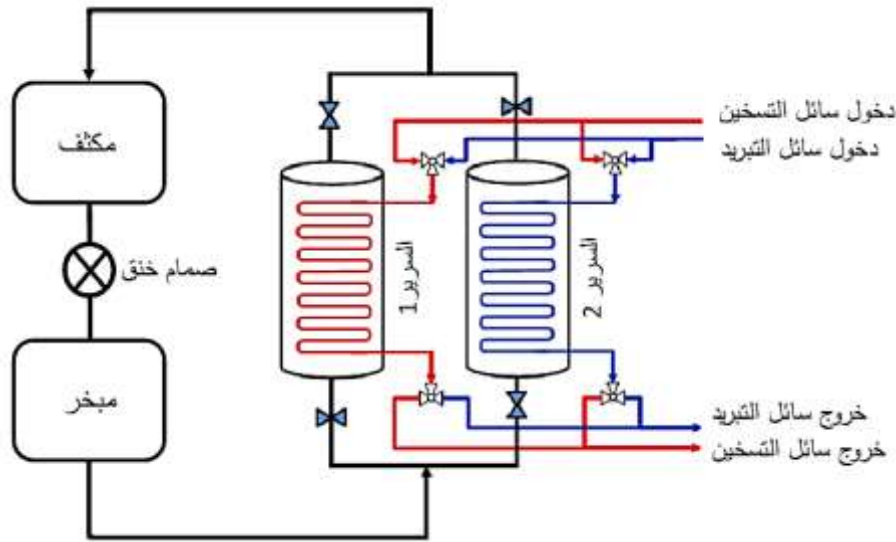
عندما تبلغ درجة حرارة السّير القيمة T_F يفتح الصّمام بين السّير والمبخر. يستمر تبريد السّير وبالمقابل يتبخّر سائل وسيط التبريد في المبخر ويمتص الحرارة اللازمة لتبخره من الماء المراد تبريده أو تجميده (النقطة E). وينتج بخار وسيط التبريد إلى السّير حيث يتم ادمصاصه، وتترافق عملية الادمصاص بإطلاق حرارة. ويزداد تركيز المادة المدمصة في السّير إلى القيمة العظمى x_{max} ، وتبلغ درجة حرارة السّير قيمة دنيا T_A . تتم هذه المرحلة عند ضغط ثابت P_{evap} . [27]



الشكل (2-4) الدّورة الترموديناميكية لدارة تبريد ادمصاصية.

إنّ دارة تبريد بسير واحد والموضّحة في الشكل (2-3) تُعدّ ذات إنتاج تبريدي متقطّع، حيث يتم في الطّور الأول (تسخين السّير - فصل - تكاثف)، ويتم في الطّور الثاني (تبريد السّير - تبخّر - ادمصاص)، وبالتالي ينتج الأثر التبريدي في الطور الثاني فقط.

لكي تكون الدّارة ذات إنتاج تبريدي مستمر يجب أن تحوي سريرين على الأقل كما في الشكل (2-5)، حيث يتم في الطّور الأول (تسخين السّير 1 - فصل - تكاثف) و(تبريد السّير 2 - تبخّر - ادمصاص)، وفي الطّور الثاني يتم تبادل الأدوار بين السّيرين، وبالتالي فإنّ الأثر التبريدي ينتج في كلا الطّورين. [2]



الشكل (2-5) دورة تبريد ادمصاصية بسريرين ذات إنتاج تبريدي مستمر.

2-5-4- معادلات التوازن الحراري والكتلي:

تُحسب كمية الحرارة المقدمة للسرير خلال طور التسخين وكمية الحرارة المطروحة منه خلال طور التبريد باستخدام معادلات التوازن الحراري والكتلي لكل مرحلة من المراحل الأربعة للدورة الترموديناميكية الموضحة في الشكل (2-4) كمايلي:

كمية الحرارة المقدمة للسرير خلال الإجراء AB هي عبارة عن حرارة محسوسة ترفع درجة حرارته من T_A إلى T_B وتُعطى بالعلاقة:

$$Q_{AB} = \int_{T_A}^{T_B} [M_{ads}(C_{p,ads} + x_{max} \cdot C_{p,ref}) + M_{bed} \cdot C_{p,bed}] dT \dots\dots\dots(1-2)$$

كمية الحرارة المقدمة للسرير خلال الإجراء BD هي عبارة عن حرارة محسوسة ترفع درجة حرارته من T_B إلى T_D ، وحرارة كامنة تؤدي إلى تحرير وسيط التبريد المدمص فيه وتُعطى بالعلاقة:

$$Q_{BD} = \int_{T_B}^{T_D} [M_{ads}(C_{p,ads} + x \cdot C_{p,ref}) + M_{bed} \cdot C_{p,bed}] dT + \int_{x_{min}}^{x_{max}} M_{ads} \cdot h_{ads} \cdot dx \dots\dots\dots(2-2)$$

كمية الحرارة المطروحة من السرير خلال الإجراء DF هي عبارة عن حرارة محسوسة تُخفّض درجة حرارته من T_D إلى T_F وتُعطى بالعلاقة:

$$Q_{DF} = \int_{T_F}^{T_D} [M_{ads}(C_{p,ads} + x_{min} \cdot C_{p,ref}) + M_{bed} \cdot C_{p,bed}] dT \dots\dots\dots(3-2)$$

كمية الحرارة المطروحة من السّير خلال الإجراء FA هي عبارة عن حرارة محسوسة تُخفّض درجة حرارته من T_F إلى T_A ، وحرارة كامنة ناتجة عن عملية ادمصاص وسيط التبريد فيه وتُعطى بالعلاقة:

$$Q_{FA} = \int_{T_A}^{T_F} [M_{ads}(C_{p,ads} + x \cdot C_{p,ref}) + M_{bed} \cdot C_{p,bed}] dT + \int_{x_{min}}^{x_{max}} M_{ads} \cdot h_{ads} \cdot dx \quad (4-2)$$

h_{ads} هي عبارة الحرارة النوعية الكامنة للادمصاص / فصل.

وبالتالي فإنّ كمية الحرارة المقدمة خلال طور التسخين هي:

$$Q_D = Q_{AB} + Q_{BD} \quad (5-2)$$

وكمية الحرارة المطروحة خلال طور التبريد هي:

$$Q_A = Q_{DF} + Q_{FA} \quad (6-2)$$

ويجب أن تتحقق معادلة التوازن الحراري خلال دورة عمل واحدة:

$$Q_D + Q_{evap} = Q_A + Q_{cond} \quad (7-2)$$

Q_{evap} هي قدرة المبخر (قدرة التبريد) خلال دورة عمل واحدة ، Q_{cond} هي قدرة المكثف.

ويُحسب معامل الأداء التبريدي للدارة من العلاقة:

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_D} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_D} \quad (8-2)$$

وتُحسب استطاعة التبريد النوعية من العلاقة:

$$SCP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{M_{ads}} \quad (9-2)$$

حيث M_{ads} هي كتلة المادة الادمصاصية في السّير. [27]

2-6- توازن الادمصاص: Adsorption Equilibrium

توازن الادمصاص هي الحالة التي يتساوى فيها معدّل الادمصاص ومعدّل الفصل. ويُعتبر توازن الادمصاص هو الحاسم في تقرير حدود الأداء لدورات التبريد الادمصاصية. يُوصف توازن الادمصاص للزوج العامل بإيزوتيرمات الادمصاص Adsorption Isotherm.

والإيزوتيرم هو علاقة تربط بين كمية المادة المدمصة والضغط بثبوت درجة الحرارة، ويمكن تحديد إيزوتيرمات الادمصاص بعدة صيغ رياضية تعتمد بشكل بحت على المعادلات التجريبية والنصف تجريبية. [24]

قام Dubinin&Astakhov بتحديد المعادلات النصف تجريبية لادمصاص الغازات على المواد الصلبة ذات المسام المجهرية غير المنتظمة (توزع غير متجانس للمسامات ذات الحجوم المختلفة) كمايلي:

$$\omega = \omega_0 \cdot \exp \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right] \dots\dots\dots (10-2)$$

ω هو حجم وسيط التبريد المدمص في واحدة الكتلة من المادة الادمصاصية (cm^3/g_{ads})
 ω_0 هو الحجم الأعظمي الممكن ادمصاصه في واحدة الكتلة (cm^3/g_{ads})
 ويمكن التعويض عنهما بالعلاقة:

$$\omega = x \cdot v, \omega_0 = x_0 \cdot v \dots\dots\dots (11-2)$$

x هو تركيز المادة المدمصة في المادة الصلبة (g_{ref}/g_{ads})
 x_0 هو التركيز الأعظمي للمادة المدمصة في المادة الصلبة (سعة الادمصاص العظمي)
 v هو الحجم النوعي لوسيط التبريد في الحالة السائلة (cm^3/g)_{ref}
 بالتعويض نجد:

$$x = x_0 \exp \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right] \dots\dots\dots (12-2)$$

E الطاقة المميّزة للادمصاص Characteristic Energy of Adsorption أو طاقة التفاعل بين المادة الصلبة والجزيء المدمص وواحدتها ($J/mole$) وتُعطى بالعلاقة:

$$E = \beta \cdot E_0 \dots\dots\dots (13-2)$$

E_0 طاقة الادمصاص المميّزة لغاز مرجعي Characteristic Energy of Reference Vapor
 وعادةً ما يكون هذا الغاز هو البنزين.

β معامل التشابه Similarity Coefficient، ويساوي نسبة الحجم المولي للغاز إلى الحجم المولي للغاز المرجعي.

A ($J/mole$) هو إمكانية الادمصاص Adsorption Potential ويُعطى بالعلاقة:

$$A = R T \ln \left(\frac{P}{P_{sat}} \right) \dots\dots\dots(14-2)$$

R ثابت الغازات العام وقيمتة $8.314 [J/mol.K]$

T درجة حرارة المادة الادمصاصية $[K]$

P ضغط الإشباع تبعاً لدرجة حرارة الادمصاص / فصل $[bar]$

P_{sat} ضغط الإشباع تبعاً لدرجة حرارة الإشباع تبخر / تكاثف $[bar]$

بتعويض (13-2) و (14-2) في (12-2) نجد :

$$x = x_0 \exp \left[-\frac{R T \ln(P/P_{sat})}{\beta \cdot E_0} \right]^n \dots\dots\dots(15-2)$$

باستخدام مفهوم معامل الجذب Coefficient of Affinity والذي نرمزه D :

$$D = \left(\frac{R}{\beta \cdot E_0} \right)^n = \left(\frac{R}{E} \right)^n \dots\dots\dots(16-2)$$

$$x = x_0 \exp \left[-D \left(T \ln \left(\frac{P}{P_{sat}} \right) \right)^n \right] \dots\dots\dots(17-2)$$

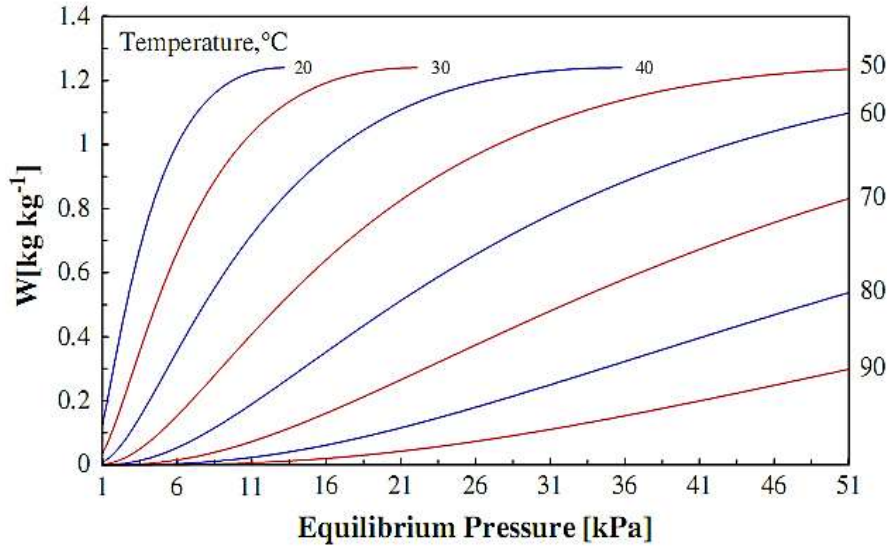
n معامل عدم التجانس Heterogeneity Factor، ويتعلق بعدم تجانس توزع المسام ذات الحجم المختلفة، وبالتالي ستختلف طاقة ادمصاص الغاز باختلاف المنطقة على المادة الادمصاصية. لأجل المواد الادمصاصية الكربونية $n \approx 2$ وللزئوليتات $n \approx 4 \div 6$.

هناك حالة خاصة يمكن استخراجها من معادلة Dubinin&Astakhov (D-A) وهي معادلة Dubinin&Radushkevich (D-R) وفيها $n = 2$ ، وتستخدم في حال المواد الادمصاصية التي تتميز بتوزع متجانس للمسامات ذات الحجم المختلفة:

$$x = x_0 \exp \left[-D \left(T \ln \left(\frac{P}{P_{sat}} \right) \right)^2 \right] \dots\dots\dots(18-2)$$

علماً أنّ المعاملات x_0 و D و n تعتمد على نوع الزوج العامل. [24],[31]

يُبين الشكل (2-6) إيزوتيرمات الادمصاص للزوج (MaxsorbIII/methanol) محسوبة وفق معادلة (D - R). [32]



الشكل (2-6) إيزوتريمات الادمصاص للزوج (MaxsorbIII/methanol) عند درجات حرارة مختلفة.

2-7- تقنيات التبريد الادمصاصي:

2-7-1- دورة تبريد ادمصاصية مع استرجاع حراري:

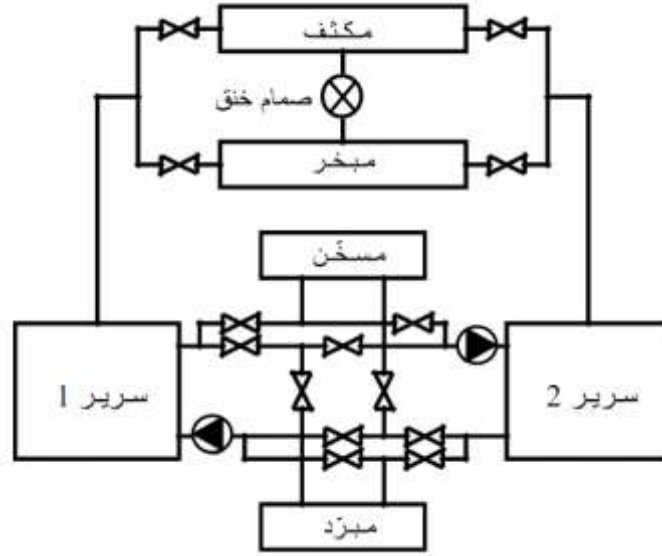
Heat Recovery Adsorption Refrigeration Cycle

يُوضَح الشكل (2-7) نظام تبريد ادمصاصي مستمر بسريرين مع استرجاع حراري، حيث يتم نقل جزءاً من حرارة السريير الواجب تبريده إلى السريير الواجب تسخينه. عملية استرجاع الحرارة هذه تُؤدِّي إلى معامل أداء COP أعلى للنظام، لكن التشغيل العملي للنظام يكون معقداً.

بينما يُبرَّد السريير 1 الموصول إلى المبخر لتحقيق عملية (تبريد - ادمصاص - تبخر)، بالمقابل يُسخَّن السريير 2 الموصول إلى المكثف للحصول على (تسخين - فصل - تكاثف)، وينتدفع سائل وسيط التبريد المتكاثف إلى المبخر عبر صمام الخنق.

قبل تغيير طور التشغيل يُمكن إجراء عملية استرجاع حراري، حيث يتم إغلاق الصمامات إلى المسخن والمبرد وتقوم مضختان بتدوير السائل الحراري في الدارة بين السريرين.

الاسترجاع الحراري الممكن لنظام بسريري ادمصاص هو عبارة عن جزء هام من الحرارة المحسوسة وحرارة الادمصاص كما هو مُوضَح في الشكل (2-8) [33].



الشكل (2-7): نظام التبريد الادمصاصي المستمر بسريـرين مع استرجاع حراري.

يُحسب معامل الأداء للدورة بدون استرجاع حراري COP من العلاقة (2-8)

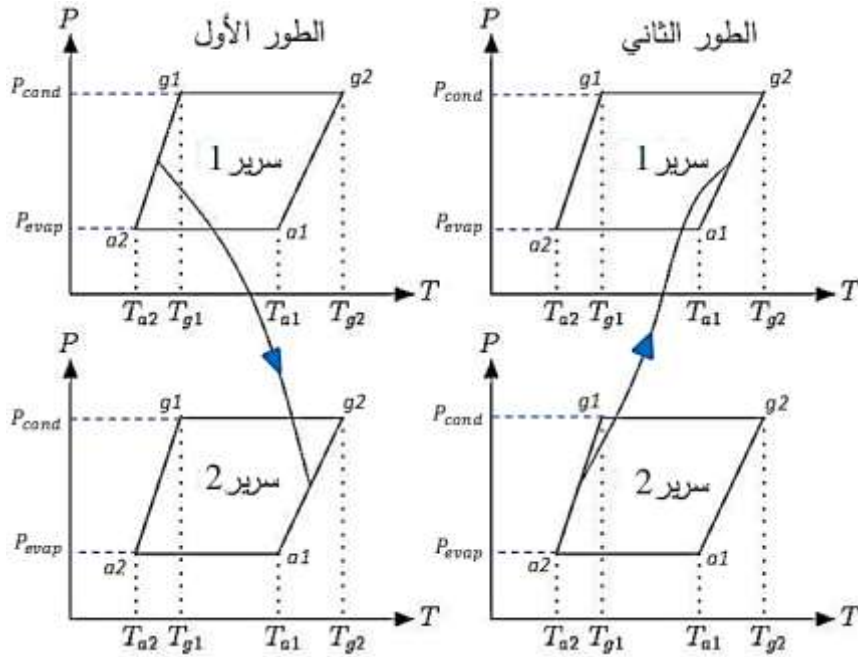
$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_D} \quad (2-8)$$

ويُحسب معامل الأداء مع استرجاع حراري ونرمزه COP_r كمايلي:

$$COP_r = \frac{Q_{evap}}{Q_D - Q_{reg}} \quad (2-19)$$

Q_{reg} هي كمية الحرارة المسترجعة. واضح أن معامل الأداء زاد نتيجة الاسترجاع الحراري.

[26],[34]



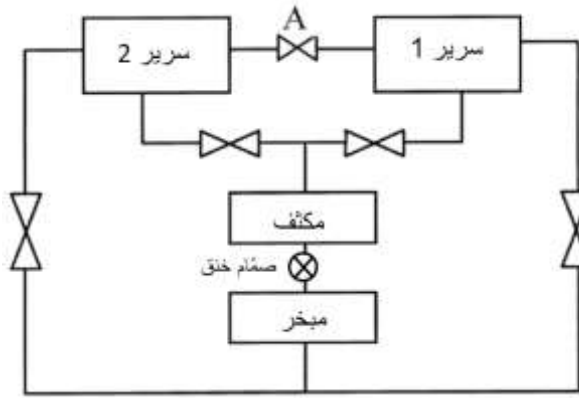
الشكل (2-8) الدورة الترموديناميكية لنظام ادمصاص بسريـرين مع استرجاع حراري. [25]

2-7-2- دورة تبريد ادمصاصية مع استرجاع للكتلة والحرارة:

Mass and Heat Recovery Adsorption Refrigeration

في دورة تبريد ادمصاصية بسريري ادمصاص وبدون استرجاع كتلي أو حراري والموضحة على الشكل (9-2) بالنقاط $(a_2 - g_1 - g_2 - a_1 - a_2)$ ، عندما يعمل السرير 1 كمولد في الطور الأول وتبلغ درجة حرارة التوليد T_{g2} عند ضغط التكاثف P_{cond} ، فإن هذا السرير يجب تبريده في الطور الثاني ليعمل كوعاء ادمصاص (يجب أن ينخفض الضغط فيه من P_{cond} إلى P_{evap} ودرجة الحرارة من T_{g2} إلى T_{a2}).

بينما السرير 2 يعمل كوعاء ادمصاص وتبلغ درجة حرارة الادمصاص T_{a2} عند ضغط تبخر P_{evap} ، فإن هذا الوعاء يجب تسخينه ليعمل كمولد (يجب أن يرتفع الضغط فيه من P_{evap} إلى P_{cond} ودرجة الحرارة من T_{a2} إلى T_{g2}).

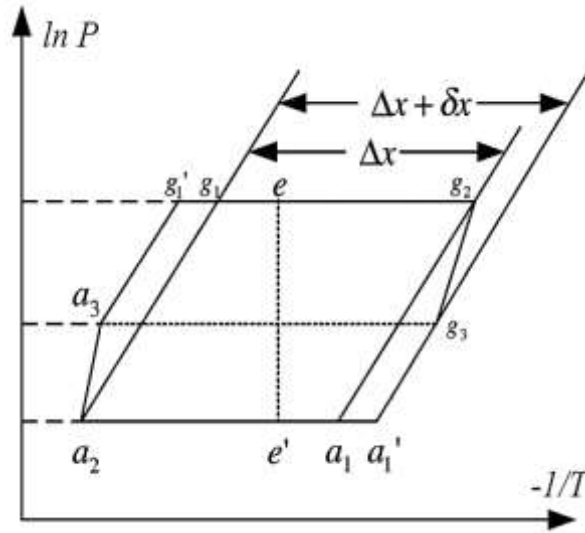


الشكل (9-2) نظام التبريد الادمصاصي المستمر بسريرين مع استرجاع كتلي.

يُمكن توليد كمية أكبر من بخار وسيط التبريد وذلك بتخفيض الضغط في السرير 1، ويُمكن ادمصاص كمية أكبر من وسيط التبريد بزيادة الضغط في السرير 2. يتم تحقيق ذلك بواسطة أنبوب وصمام بخار A يصل بين السريرين كما هو موضح في الشكل (9-2)، وبفتح هذا الصمام تنتقل كمية من البخار من السرير الساخن إلى السرير البارد نتيجة فرق الضغط بينهما وهذا ما يُسمى بعملية استرجاع الكتلة أو استرجاع البخار الداخلي، وبنتيجة هذه العملية يتساوى الضغط في كلا السريرين ويُسمى بضغط التّعادل والذي يساوي إلى: $P_m = (P_{evap} + P_{cond})/2$.

العملية المشروحة آنفاً تتطلب فقط نقل كتلة، لهذا السبب تكون هذه العملية سريعة. للحصول على تأثير مضاعف فإن استرجاع الكتلة يكون متبوعاً باسترجاع حراري. ويُمكن تمثيل دورة التبريد مع استرجاع كتلي ثم حراري على مخطط كلايرون كما هو موضح في الشكل (10-2).

- دورة بسريرين بدون استرجاع كتلي أو حراري $(a_2 - g_1 - g_2 - a_1 - a_2)$
- دورة بسريرين مع استرجاع حراري، حيث تمّ توضيح عملية الاسترجاع الحراري في الدورة $(a_2 - g_1 - g_2 - a_1 - a_2)$ بواسطة نقاط الحالة $e - e'$.
- دورة بسريرين مع استرجاع كتلي $(a_2 - a_3 - g'_1 - g_1 - g_2 - g_3 - a'_1 - a_1 - a_2)$.
- دورة بسريرين مع استرجاع كتلي ثمّ حراري، وهي الدّورة نفسها مع استرجاع كتلي ويتم تمثيل عملية الاسترجاع الحراري فيها بواسطة النقاط $e - e'$.
- إنّ نظام الاسترجاع الكتلي أدّى إلى زيادة كتلة وسيط التبريد العاملة في الدّارة من Δx إلى $\Delta x + \delta x$ وهذا أدّى إلى زيادة الأثر التبريدي، وبالتالي زيادة معامل الأداء COP .



الشكل (10-2) دورة تبريد ادمصاصية مع استرجاع كتلي وحراري.

- يُمكن شرح دورة التبريد مع استرجاع كتلي وحراري اعتماداً على الشكل (10-2) كمايلي:
- تبدأ كل نصف دورة بعملية استرجاع الكتلة بين السريرين (المسار $g_2 - g_3$ و $a_2 - a_3$)، وبعد ذلك تُكمل عملية الاسترجاع الحراري حيث يتم نقل الحرارة من السّيرير الساخن 1 إلى السّيرير البارد 2 وبالتالي تنخفض درجة حرارة السّيرير الساخن 1 (المسار $e' - a'_1 - g_3$) وترتفع درجة حرارة السّيرير البارد 2 (المسار $e - g'_1 - a_3$).
- نظرياً، تستمر عملية استرجاع الحرارة حتّى يصل السّيريران إلى درجة الحرارة نفسها $T_e = T'_e$ فعلياً، يبقى هناك اختلاف بدرجة الحرارة بين السّيريرين في نهاية عملية الاسترجاع الحراري. وأخيراً لإغلاق كل نصف دورة يتم وصل السّيريرين إلى المُبرّد والمُسخّن بعد تبديل الأدوار بينهما (المسار $e' - a_2$ و $e - g_2$). وتسلك نصف الدّورة الثانية الطريق نفسه.

تبعاً لهذه العملية، فإنه يُمكن أن نستعيد داخلياً حوالي 35% من الطاقة الكلية المُرسلة لكل سرير متضمنةً جزءاً من الحرارة الكامنة للادمصاص. [26],[34]

وهناك تقنيات متطورة أخرى تُحسن معامل الأداء لدارة التبريد بشكلٍ معتبر [26] وهي:

الدورة الموجية الحرارية Thermal Wave Cycle

الدورة متعددة المراحل Multi-Stage Cycle

الدورة التعاقبية Cascading Cycle

2-8- المواد الادمصاصية:

2-8-1- العوامل المؤثرة في اختيار المادة الادمصاصية:

- (1) امتلاك مقدرة ادمصاص عالية عند درجة حرارة الوسط المحيط وضغوط منخفضة.
- (2) تحرير معظم المادة المدمصة عند تعريضها للحرارة.
- (3) لا يوجد تلف تدريجي مع الاستخدام ومرور الزمن، وبالتالي هناك قابلية لعكس عملية الادمصاص لعدة دورات.
- (4) ليست مادة سامة، ولا تتفاعل مع معدن الآلة.
- (5) كلفتها منخفضة ومتوفرة بشكلٍ واسع.
- (6) موصلية حرارية جيدة لاختصار زمن الدورة.
- (7) سعة حرارية نوعية منخفضة مقارنةً بالسعة الحرارية لوسيط التبريد.

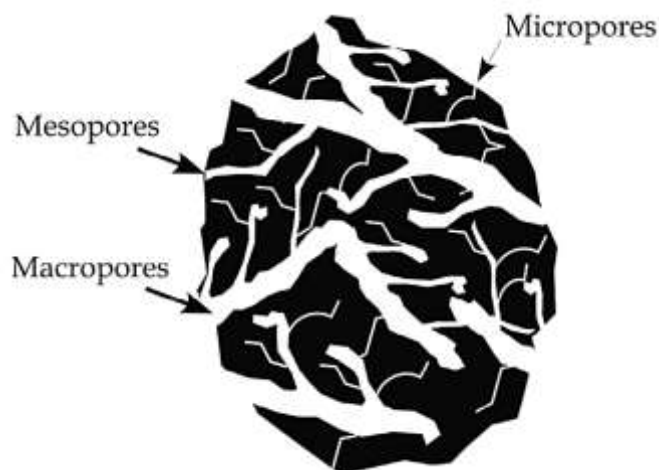
[26],[35]

2-8-2- الخواص السطحية للمواد الادمصاصية:

تختلف المواد الادمصاصية عن بعضها بسبب اختلاف الخواص السطحية لجزيئات المادة وتتمثل هذه الخواص في: المسامية التي تُحدّد مساحة السطح الفعّال، والاستقطاب. إنّ مساحة سطحٍ نوعية كبيرة في المادة الادمصاصية تكون مرغوبة لتأمين سعة ادمصاص كبيرة، لكنّ الحصول على مساحة نوعية كبيرة في حجمٍ محدود يؤدي حتماً إلى زيادة كبيرة في عدد المسامات بين كل سطحي ادمصاص.

إنَّ حجم المسام المجهرى Micropores هو الذي يُحدّد إمكانية وصول جزيئات المادة المدمصّة إلى سطح الادمصاص، وبالتالي يكون التوزيع الحجمي للمسامات المجهرية هو خاصية مهمة أخرى لتمييز المواد الادمصاصية.

كما أنَّ بعض المواد الادمصاصية تمتلك مسامات ذات حجم أكبر بالإضافة للمسامات المجهرية والتي تنتج أثناء التحضير أو تكون موجودة بشكل أصلي في بنية المادة الخام وتُسمّى بالمسامات المرئية Macropores وحجمها يُقدّر بعدّة ميكرومترات. وتُعدّ المسامات الأكبر حجماً بمثابة طرق لانتشار جزيئات المادة المدمصّة من خارج الحبيبة إلى المسامات المجهرية في المساحيق والبلّورات الناعمة. المادة الادمصاصية التي تحتوي مسامات مرئية ومسامات مجهرية تُوصف بأنّها ذات بنية مسامية ثنائية الانتشار. يُبيّن الشكل (2-11) هيكلية المسام في حبيبة مادة ادمصاصية.



الشكل (2-11) هيكلية المسام في حبيبة مادة ادمصاصية. [30]

الاستقطاب السطحي يعني قابلية الارتباط مع المواد القطبية مثل الماء. لذلك فإنّ المواد الادمصاصية القطبية Polar Adsorbents تُسمّى ماصّة للماء Hydrophilic. وأمثلة على المواد الادمصاصية من هذا النوع: الزيوليت والسيليكا جيل.

من ناحية أخرى المواد الادمصاصية اللاقطبية Non Polar Adsorbents هي عموماً كارهة (طاردة) للماء Hydrophobic. ومن المواد الادمصاصية اللاقطبية النموذجية: المواد الادمصاصية الغنيّة بالكربون Carbonaceous Adsorbents والمواد الادمصاصية البوليميرية Polymer Adsorbents ، وهذه المواد تملك قابلية أكبر للارتباط مع الزيت منه مع الماء. [24],[36]

المواد الادمصاصية الأكثر شيوعاً: الزيوليت، السيليكا جيل، أكسيد الألمنيوم المنشط، والكربونات المنشطة ولها عدة أشكال (الكربون المنشط الحبيبي، المسحوق، الليفي). ولكل مادة من المواد الادمصاصية الآنف الذكر أنواع كثيرة ويتم تصنيع كل منها باستخدام مواد خام مختلفة وعند شروط تحضير خاصة. يوجد شرح لتحضير بعض أنواع المواد الادمصاصية في المراجع [24], [36], [37]

2-8-3- الخواص الفيزيوجحرارية للمواد الادمصاصية:

2-8-3-1- كثافة المادة الادمصاصية:

يمكن صياغة التعاريف التالية:

(1) حجم المسامات الكلّي في عينة من مادة ادمصاصية يساوي إلى مجموع كل من حجم المسامات المجهرية والمسامات المرئية

$$V_{pore} = V_{mic,pore} + V_{mac,pore} \dots\dots\dots(20-2)$$

(2) المسامية ε_{ads} : هي حجم الفراغ (حجم المسام الكلّي) في $1cm^3$ من المادة الادمصاصية وواحدتها $[cm^3_{pore}/cm^3_{ads}] = [-]$.

(3) الحجم النوعي للمسام ϑ_{pore} : هي حجم المسام الكلّي في $1g$ من المادة الادمصاصية وواحدتها $[cm^3_{pore}/g_{ads}]$.

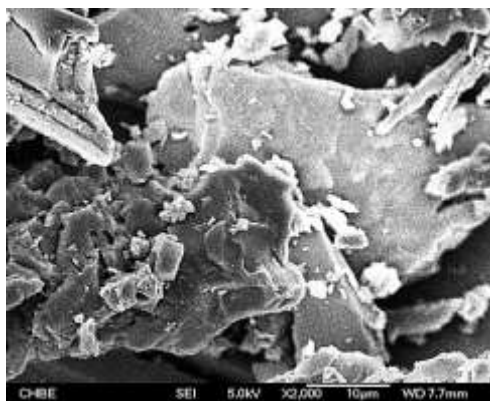
(4) كثافة المادة الادمصاصية ρ_{ads} : هي كتلة $1cm^3$ من المادة الادمصاصية وواحدتها هي $[g_{ads}/cm^3_{ads}]$.

وبالتالي يمكن حساب مسامية المادة الادمصاصية من العلاقة التالية:

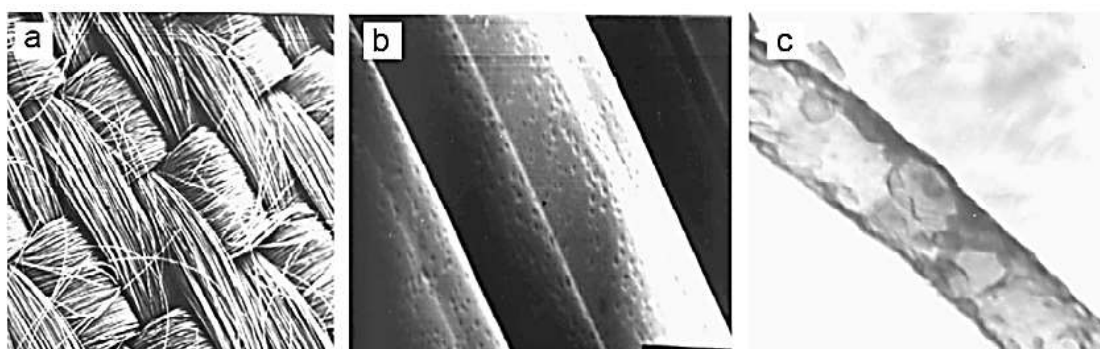
$$\varepsilon_{ads} = \rho_{ads} \cdot \vartheta_{pore} \dots\dots\dots(21-2)$$

يُبين الشكل (2-12) صورة مجهرية إلكترونية للكربون المنشط المسحوق نوع Maxsorb III [38].

ويُبين الشكل (2-13) صور مجهرية إلكترونية للكربون المنشط الليفي نوع Busofit [38].



الشكل (2-12) صورة مجهرية إلكترونية للكربون المنشط المسحوق نوع Maxsorb III [38].



الشكل (2-13) الكربون المنشط الليفي نوع Busofit (a) صورة مكبرة 50 مرة ، (b) صورة مكبرة 1000 مرة ، (c) صورة مكبرة 50000 مرة. [38]

يُبين الجدول (2-2) الخواص الفيزيوكيميائية لبعض أنواع الكربون المنشط الحبيبي [39].

الجدول (2-2) الخواص الفيزيوكيميائية لبعض أنواع الكربون المنشط الحبيبي. [39]

نوع الكربون المنشط	السعة الحرارية النوعية Cp		الكثافة ρ	المسامية ϵ
	$T/^{\circ}C$	$kJ/kg^{\circ}C$	g/cm^3	-
RUTGERS CG1-3	40	0.84	0.37	0.87
	80	0.95		
	120	1.05		
Norit R 1 Extra	40	0.88	0.42	0.84
	80	0.95		
	120	1.04		
Norit RX 3 Extra	40	0.83	0.37	0.75
	80	0.97		
	120	1.04		
CarboTech C40/1	40	0.78	0.38	0.82
	80	1.0		
	120	1.06		
Carbotech A35/1	40	0.86	0.33	0.88
	80	0.95		
	120	1.05		

2-3-8-2- الموصلية الحرارية للمادة الادمصاصية λ_{ads} :

إنَّ المسامية العالية للمواد الادمصاصية تُحسِّن عملية انتقال الكتلة، إلّا أنَّها من جهة ثانية تُسبِّب لعملية انتقال الحرارة. فالمسامية العالية تجعل المواد الادمصاصية ذات موصلية حرارية ضعيفة وبالتالي فإنَّ الحرارة تنتقل ببطءٍ داخل السَّرير وتُصبح مدَّة عمليَّات الادمصاص والفصل أطول، بعبارة أخرى يُصبح زمن الدورة أطول. لذلك تمَّ إجراء دراسات عديدة حول تعديل وتطوير المواد الادمصاصية بهدف تحسين انتقال الحرارة والكتلة داخل السَّرير وبالتالي تحسين كفاءته [23]. وتمَّ التطرُّق إلى نوعين من المواد الادمصاصية المطوَّرة وهي:

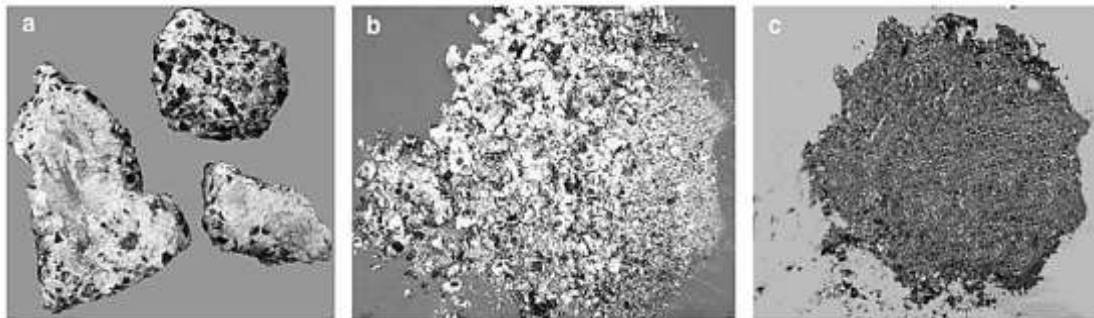
1) المواد الادمصاصية المركَّبة: Composite Adsorbent

هي مواد ذات مكونين، وبالتالي تعتمد خصائصها على كلٍّ من منشأ المُضيف المسامي وعلى الملح اللاعضوي المتشرب داخل المسامات.

هناك تنوع كبير لكلٍّ من مناشئ المُضيف مثل (السيليكا جيل ذو المسامية المجهرية والمتوسطة، أكسيدات الألمنيوم، الكربونات المسامية، البوليميرات...) والأملاح مثل (CaCl_2 ، LiBr ، MgCl_2 ، $\text{LiCl} \dots$). إنَّ هذا التنوع يُعطي إمكانيةً واسعة لتغيير الخواص الفيزيائية للمادة الادمصاصية في مجال واسع لتلائم متطلَّبات التطبيقات الخاصة. [23]

مثال : سرير الكربون المنشَّط المركَّب: Composite Activated Carbon Bed

يتمَّ إضافة كلوريد الكالسيوم CaCl_2 إلى الكربون المنشَّط بهدف زيادة المادة المألئة وبالتالي تحسين الكثافة وانتقال الحرارة. لاختيار النسبة الأفضل تمَّ دراسة ثلاث نسب كتلية بين ($\text{CaCl}_2 : \text{AC}$) (النموذج a) 5 : 1 ، (النموذج b) 4 : 1 ، (النموذج c) 3 : 1 . تمَّ المقارنة بين هذه النماذج الثلاث بعد الادمصاص، كما هو موضح في الشكل (2-14).



الشكل (2-14) النماذج الثلاث للكربون المنشَّط المركَّب بعد الادمصاص. [40]

إنَّ حدوث ظاهرة التكتُّل في المادة الادمصاصية الحاوية على نسبة صغيرة من الكربون (النموذج a) تُخفِّض فعالية انتقال الكتلة، بينما حدوث ظاهرة الانتفاخ في (النموذج c) الذي يحوي على النسبة الأكبر من الكربون تُخفِّض فعالية انتقال الحرارة، وبالنتيجة وُجِدَ أنَّ (النموذج b) هو الأفضل حيث كمية المادة المألثة من CaCl_2 في المادة الادمصاصية هي فقط 75%. [40]

(2) المواد الادمصاصية المقسّاة: Consolidated Adsorbent

يتم تقسية حبيبات المادة الادمصاصية عن طريق مزجهم وضغطهم مع مادة رابطة تساعد على التماسك والالتحام. تُستخدم المادة الرابطة لجزيئات المادة الادمصاصية بعد اختبار خواصها الفيزيائية والكيميائية بحيث تزيد الموصلية الحرارية للسريـر ولا تُشكِّل عائقاً أمام انتقال الكتلة فيه. [40]

مثال: سريـر الكربون المنشّط المقسّى: Consolidated Activated Carbon Bed

يتم تقسية حبيبات الكربون المنشّطة عن طريق مزجهم وضغطهم مع مادة رابطة. نتيجة تقسية الكربون المنشّط الحبيبي تحسّنت كثافته بنسبة 30% و أصبحت الموصلية الحرارية أعلى بنسبة 173%. والنتائج معروضة في الجدول (2-3). [40]

الجدول (2-3) مقارنة خواص الكربون المنشّط الحبيبي قبل وبعد التقسية. [40]

الخواص	الكربون المنشّط الحبيبي	الكربون المنشّط المقسّى
الكثافة	460 kg/m ³	600 kg/m ³
الموصلية الحرارية الوسطية	0.11 W/m.K	0.30 W/m.K
السعة الحرارية النوعية	0.93 kJ/kg.K	0.93 kJ/kg.K

2-3-8-3- الموصليّة الحرارية المكافئة أو الفعّالة للمادة الادمصاصية λ_{eff} :

عندما تنتشر المادة الادمصاصية بوسيط التبريد العامل عندئذٍ يجب حساب معامل التوصيل الحراري المكافئ أو الفعّال والذي تتعلّق قيمته بالعوامل التالية:

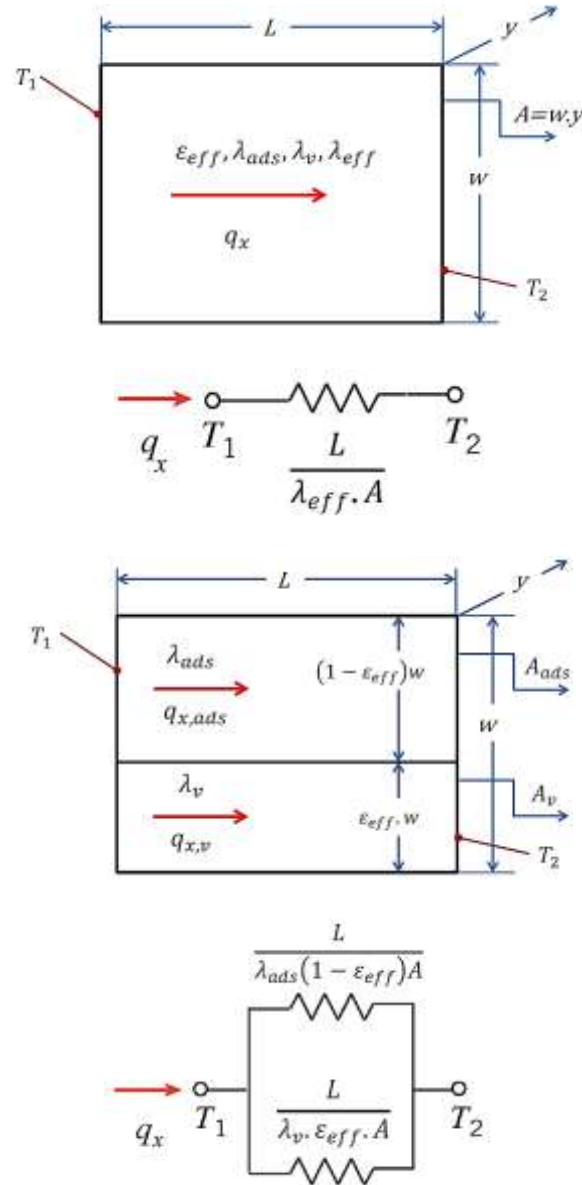
(1) معامل التوصيل الحراري للمادة الادمصاصية λ_{ads} .

(2) مسامية المادة الادمصاصية ε_{ads} .

(3) معامل التوصيل الحراري لبخار وسيط التبريد λ_v في مسامات المادة الادمصاصية.

تمّ نمذجة الوسط المسامي على أنّه مكافئ لجدار مركب متوازي يتكوّن من منطقة مائع (بخار) بعرض

εw ومنطقة صلب بعرض $(1 - \varepsilon)w$ كما هو مبين في الشكل (2-15). [39],[41]



الشكل (2-15) نمذجة الوسط المسامي.

$$Q_x = \frac{\lambda_{eff} \cdot A}{L} \cdot \Delta T \dots\dots\dots(22-2)$$

$$Q_x = Q_{x,ads} + Q_{x,v} \dots\dots\dots(23-2)$$

$$Q_{x,ads} = \frac{\lambda_{ads}}{L} \cdot A_{ads} \cdot \Delta T = \frac{\lambda_{ads}}{L} \cdot (1 - \varepsilon) w \cdot y \cdot \Delta T \dots\dots\dots(24-2)$$

$$Q_{x,v} = \frac{\lambda_v}{L} \cdot A_v \cdot \Delta T = \frac{\lambda_v}{L} \cdot \varepsilon \cdot w \cdot y \cdot \Delta T \dots\dots\dots(25-2)$$

بجمع العلاقتين (24-2) و (25-2) :

$$Q_x = \frac{w \cdot y}{L} [\lambda_{ads} (1 - \varepsilon) + \lambda_v \cdot \varepsilon] \Delta T \dots\dots\dots(26-2)$$

$$Q_x = \frac{A}{L} [\lambda_{ads}(1 - \varepsilon) + \lambda_v \cdot \varepsilon] \Delta T \dots\dots\dots(27-2)$$

بالمساواة بين (22-2) و (27-2) نحصل على الموصلية الحرارية المكافئة:

$$\lambda_{eff} = \lambda_{ads}(1 - \varepsilon) + \lambda_v \cdot \varepsilon \dots\dots\dots(28-2)$$

2-9- المواد المدمصة (وسائط التبريد):

عند اختيار وسيط التبريد العامل في الدارة يجب مراعاة الآتي:

- (1) ضرر بيئي منخفض.
 - (2) درجة حرارة التبخر التصميمية.
 - (3) سعة حرارية منخفضة لواحدة الحجم.
 - (4) حرارة كامنة عالية لتبخر واحدة الحجم. لأنه كلما زادت حرارة التبخر كلما نقصت كمية وسيط التبريد المطلوبة للحصول على الحمل التبريدي المطلوب.
 - (5) درجة حرارة تجمد منخفضة. لأنها تُحدّد أخفض درجة حرارة تبخر يمكن الوصول إليها.
 - (6) درجة الحرارة الحرجة عالية. لأنها تمكّن من إجراء عملية التكاثف عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط.
 - (7) الأبعاد الجزيئية يجب أن تكون صغيرة كافية لتسمح بادمصاص سهل.
 - (8) غير سامة، غير قابلة للاشتعال، وغير قابلة للتفاعل مع معادن الآلة. [26],[35]
- كما يجب أن يُحقّق الزوج العامل مايلي:

- (1) تغيير واسع في تركيز المادة المدمصة ضمن المجال الحراري لعمل السّرير.
- (2) استقرار حراري للمادة المدمصة مع المادة الادمصاصية ضمن المجال الحراري لعمل السّرير.

2-10- محاسن نظام التبريد الادمصاصي ومساوئه:

• محاسن نظام التبريد الادمصاصي:

1. يعمل على مصادر نظيفة ومستدامة للطاقة (الطاقة الشمسية، الطاقة الجيوحرارية، طاقة الضياعات الصناعية، الغاز الطبيعي....).

2. يستخدم وسائط تبريد غير ضارة بيئياً (الماء، الأمونيا، الميثانول، الإيثانول، الفريونات صديقة البيئة).

3. لا يحتوي أجزاء متحركة باستثناء مضخات تدوير سائل نقل الحرارة، وبالتالي فهو يعمل بدون ضجيج أو اهتزاز ويتطلب صيانة قليلة.

4. يمكن الحصول على درجات حرارة تبخر منخفضة.

[25],[27]

• مساوئ نظام التبريد الادمصاصي:

1. انطلاق كمية كبيرة من الحرارة إلى الوسط المحيط .

2. الوزن الكبير للمادة الادمصاصية غير مناسب في الاستطاعات العالية.

3. الموصلية الحرارية الضعيفة للمادة الادمصاصية والتي تؤدي إلى زيادة زمن الدورة.

4. عمل النظام عند ضغط تشغيل منخفض يتطلب تدابير وتصاميم خاصة لمنع تسرب الهواء

إلى داخل النظام. لحالة (الكربون المنشط 35/ميثانول) ضغط التشغيل حوالي 50 mbar ،

ولحالة (الزيت/ماء) ضغط التشغيل حوالي 6 mbar.

5. إنتاج تبريدي منخفض ومعامل أداء منخفض.

6. بالنسبة للدورة التي تعتمد مبدأ الادمصاص الكيميائي فإن تصميم النظام يكون معقداً وذلك

نتيجة التغيرات في حجم المادة الادمصاصية عند حدوث التفاعلات الكيميائية.

[25],[27]

تمّ في هذه الأطروحة التعامل مع وسائط التبريد ($R134a$, $R407C$, $Ammonia$)، بالإضافة للماء الذي استُخدم كسائل نقل للحرارة في عمليات تسخين وتبريد السّيرير. وقد تمّ الحصول على الخواص الفيزيولوجية لكل وسيط من جداول الإشباع ومخططات ($\log P - h$) الخاصة به ملحق(1).

تمّ في هذا الفصل تقديم القاعدة النظرية العلمية والمعادلات الرياضية والعلاقات التجريبية التي سيتم على أساسها تصميم النموذج الأولي لوعاء الادمصاص.

الفصل

الثالث

**تصنيع منصّة الاختبار
والتجارب الخبريّة**

3-1- الهدف من جهاز الاختبار:

إنَّ الهدف من جهاز الاختبار الذي تمَّ تصنيعه هو:
اختبار سعة الادمصاص لزوج ادمصاصي عند ضغط ثابت ودرجات حرارة مختلفة لدخول سائل نقل الحرارة إلى مبادل السرير (الماء).
اختبار سعة الادمصاص لزوج ادمصاصي عند ضغوط مختلفة ودرجة حرارة ثابتة لدخول الماء.
تمَّ في هذا البحث اختبار سعة الادمصاص لأحد أنواع الكربون المنشَّط الحبيبي ACG مع كلاً من وسيطي التبريد $R134a$ و $R407C$.

3-2- أجزاء جهاز الاختبار:

يُبيِّن الشكل (3-1) المخطَّط الرمزي لجهاز الاختبار والمكوّن من دارتين أساسيتين:
1- دائرة وسيط التبريد وتتألّف من: وعاء الادمصاص، وعاء وسيط التبريد، بالإضافة إلى عبوة وسيط التبريد ومضخة التخلية.
2- دائرة الماء وتتألّف من: مبادل حراري، خزان ماء بارد، خزائين للماء الساخن كل منهما مزوّد بسخان كهربائي، بالإضافة إلى مضخة تدوير الماء البارد ومضخة تدوير الماء الساخن.

3-3- تصنيع جهاز الاختبار: الشكل (3-1).

1) وعاء الادمصاص:

يُصنع من الحديد الصب بشكل أسطوانة قطرها الداخلي 10 cm وارتفاعها الداخلي 19 cm وسماكة جدارها 8 mm . يحوي وعاء الادمصاص على مبادل حراري يمكن أن يُصنَّع بأشكال مختلفة وينتشر الكربون المنشَّط على السطح الخارجي للمبادل. يتكوّن المبادل الحراري في هذا البحث من ملف أنبوبي نحاسي، القطر الخارجي للأنبوب 8 mm ، ويتوضّع الملف بين سطحين أسطوانيين من الشبك، ويتم ملء الحيز ما بين الملف والشبك بحبيبات الكربون المنشَّط حتى غمر كامل الملف حيث يسمح الشبك بانتقال بخار وسيط التبريد من وإلى الكربون المنشَّط.

يحتوي غطاء الوعاء على مدخل ومخرج الماء للمبادل، وفتحة لإدخال حساس حرارة إلى الكربون المنشط ويجب إحكام هذه الفتحة لمنع التسريبات، وفتحة لتركيب مقياس الضغط، وفتحة لوصلة وعاء الادمصاص مع وعاء وسيط التبريد. ويوضع بين الوعاء والغطاء جوان لمنع التسرب.

الوعاء معزول كاملاً بعزل حراري من النوع الإسفنجي سماكة 1 cm ومن ثم بلاصق العزل. ويوضح الشكل (3-2) مراحل تصنيع سرير الكربون المنشط وتركيبه ضمن الوعاء.

(2) وعاء وسيط التبريد:

يُصنع من الحديد الصلب بشكل أسطوانة قطرها الداخلي 12 cm وارتفاعها الداخلي 20 cm وسماكة جدارها 8 mm . يحوي غطاء وعاء وسيط التبريد فتحة لوصلة مع وعاء الادمصاص، وفتحة من أجل تخلية النظام من الهواء والفتحة نفسها تُستخدم لشحن الوعاء بوسيط التبريد. يتصل الوعاء عن طريق أنبوب وصمامين B و E للسماح بانتقال بخار وسيط التبريد بينهما. يتم وصل وعاء وسيط التبريد إلى مضخة التخلية P-V أو إلى أسطوانة وسيط التبريد بواسطة أنبوب وصمام (شحن وتفريغ) A. الوعاء معزول كاملاً بعزل حراري من النوع الإسفنجي سماكة 1 cm ومن ثم بلاصق العزل.

(3) خزان الماء الساخن(1):

عبارة عن خزان مغلق مسبق الصنع أسطواني الشكل سعته 20 l ، ومزود بسخان استطاعته 1 kW وتيرموستات تعبير.

(4) خزان التمدد المفتوح(2):

وهو أيضاً خزان للماء الساخن مصنوع من الصاج المغلف بشكل مكعب طول ضلعه 30 cm . يُزود الخزان بغطاء وأنبوب شفاف لتحديد مستوى الماء فيه، ومزود بسخان 1 kW وتيرموستات تعبير. الخزان معزول بعازل إسفنجي سماكته 1 cm ثم بلاصق عزل.

(5) خزان الماء البارد(3):

مصنوع بنفس طريقة تصنيع خزان الماء الساخن(2). يتم تدوير الماء بين الخزانات والمبادل الحراري في وعاء الكربون بواسطة إحدى المضختين (مضخة الماء البارد P-C أو مضخة الماء الساخن P-H).

(6) المقاييس وتوزيعها في الدّارة:

- مقياس ضغط زائد مجاله (0 ÷ 500 psi) أي (1 bar ÷ 34.5 bar) .
- مقياس ضغط تخلخل مجاله (0 ÷ 30 inHg vac) أي (0 ÷ 1 bar) .
- مقاييس حرارة ديجيتال + حساس: يتم توزيعها لتقيس درجة الحرارة في النقاط التالية من الدّارة: في خزاني الماء الساخن، في خزان الماء البارد، على مدخل ومخرج الماء للمبادل الحراري، في وعاء وسيط التبريد، وضمن الكربون المنشط.
- ميزان إلكتروني: الوزن الأعظمي الذي يزنه $\pm 0.5g$ هو $15kg$.
- أنبوب مدرّج حتى [250 ml] ، وميقاتيّته لحساب تدفق كلّ من مضختي الماء البارد والساخن.

(7) أنابيب التوصيل:

- الأنابيب المستخدمة في دارة الفريون هي أنابيب مرنة (ضغط عالي) خاصّة بالفريونات.
- الأنابيب المستخدمة في دارة الماء هي أنابيب مرنة نوع pex وأنابيب نوع ppr.

(8) الصّمّات (يدوية):

- تمّ استخدام صّمّات تبريد ضغط عالي نوع on/off نحاسية A,B,C,D,E في دارة الفريون.
- تمّ استخدام صّمّات صحيّة نوع on/off دحلة فولاذية 1,2,3,12 في دارة الماء.

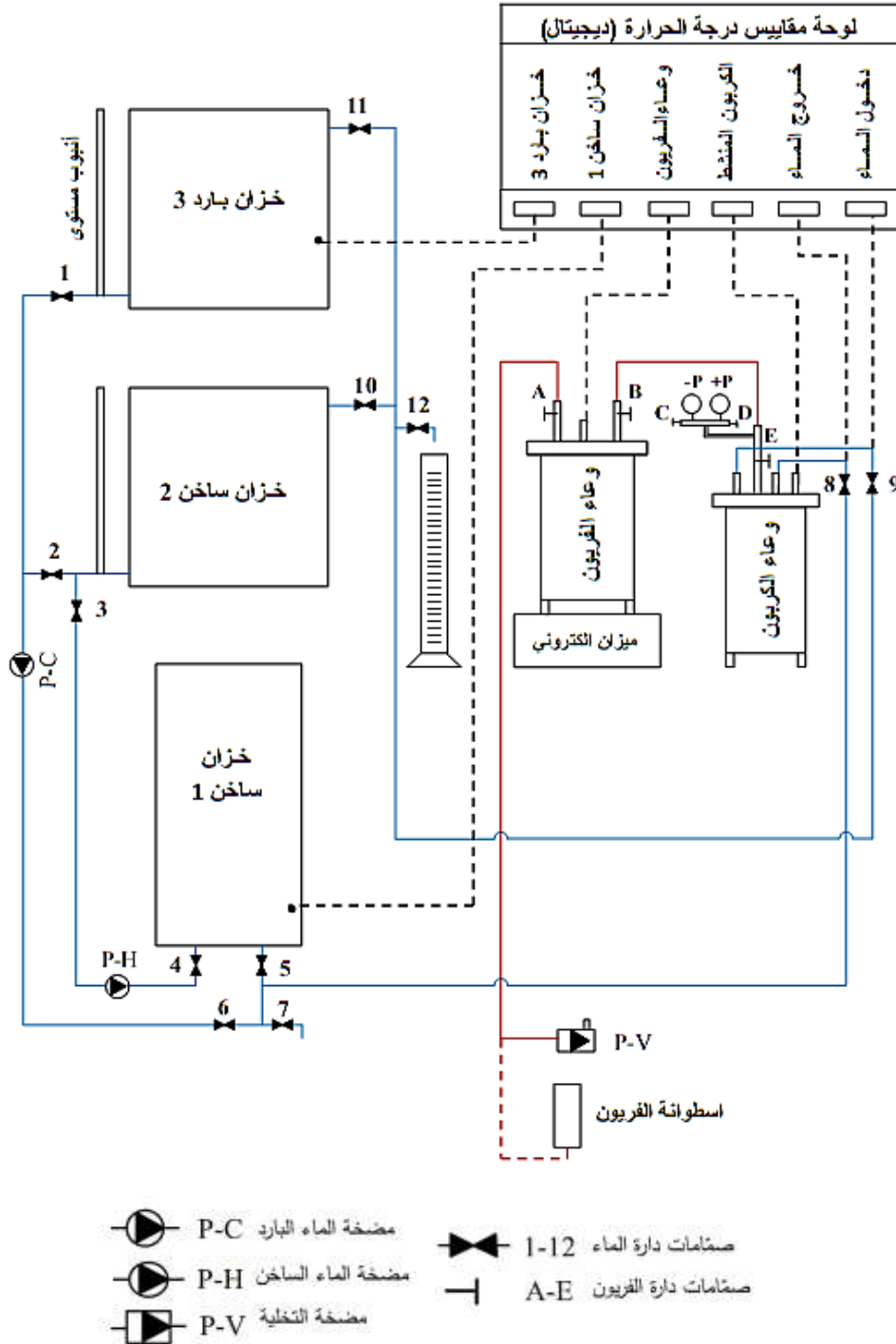
(9) اللوحة الكهربائية:

- تحتوي على قاطع ثنائي رئيسي، قواطع أحاديّة مع كبسات مضيئة للدلالة على عمل التجهيزات، وريليه تحكّم وكونتكتور ABB. يُبيّن الشكل (3-3) أجزاء جهاز الاختبار المصنّع.

3-4- آلية تشغيل جهاز الاختبار: الشكل (3-1).

- دارة تبريد سرير الكربون: تقوم مضخّة الماء البارد P-C بسحب الماء من الخزان 3 عبر الصّمّام 1، ثمّ تدفعه عبر الصّمّام 6 ثمّ 8 إلى مدخل المبادل في وعاء الكربون حيث يطرح الكربون كمية من الحرارة إلى الماء، ثمّ إلى مخرج المبادل عبر الصّمّام 9، ثمّ إلى الخزان 3 عبر الصّمّام 11، مع الانتباه أنّ باقي الصّمّات في الدارة يجب أن تكون مغلقة. يتم قياس التدفق الحجمي للمضخّة P-C بالترتيب السابق نفسه مع إغلاق الصّمّام 11 وفتح الصّمّام 12 ونقيس الزمن اللازم لامتلاء 250 ml من الأنبوب المدرّج.

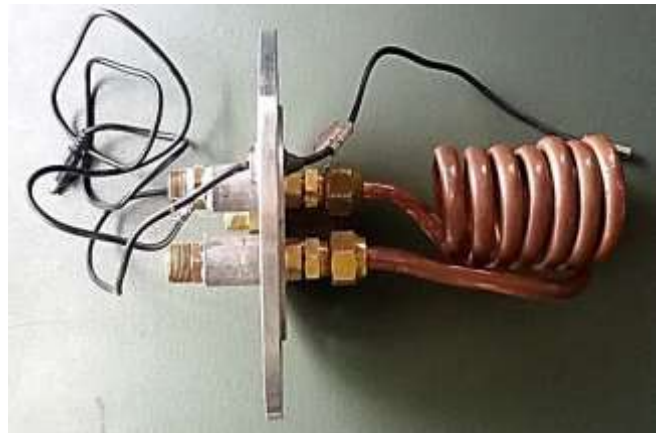
- دارة تسخين سرير الكربون: تقوم مضخة الماء الساخن P-H بسحب الماء من الخزان 2 عبر الصمام 3، ثم تدفعه إلى الخزان 1 عبر الصمام 4 ثم 5، ثم إلى مدخل ومخرج المبادل عبر الصمامين 8 و 9، ثم إلى الخزان 2 عبر الصمام 10، مع الانتباه أن باقي الصمامات في الدارة مغلقة. يتم قياس التدفق الحجمي للمضخة P-H بالترتيب السابق نفسه مع إغلاق الصمام 10 وفتح الصمام 12 ونقيس الزمن اللازم لامتلاء 250 ml من الأنبوب المدرج.



الشكل (1-3) المخطط الرمزي لجهاز الاختبار.



الشكل (d-2-3)



الشكل (a-2-3)



الشكل (b-2-3)



الشكل (e-2-3)



الشكل (f-2-3)



الشكل (c-2-3)

الشكل (2-3) مراحل تصنيع وتركيب سرير الكربون المنشط.



الشكل (b-3-3) صورة خلفية لجهاز الاختبار



الشكل (a-3-3) صورة أمامية لجهاز الاختبار

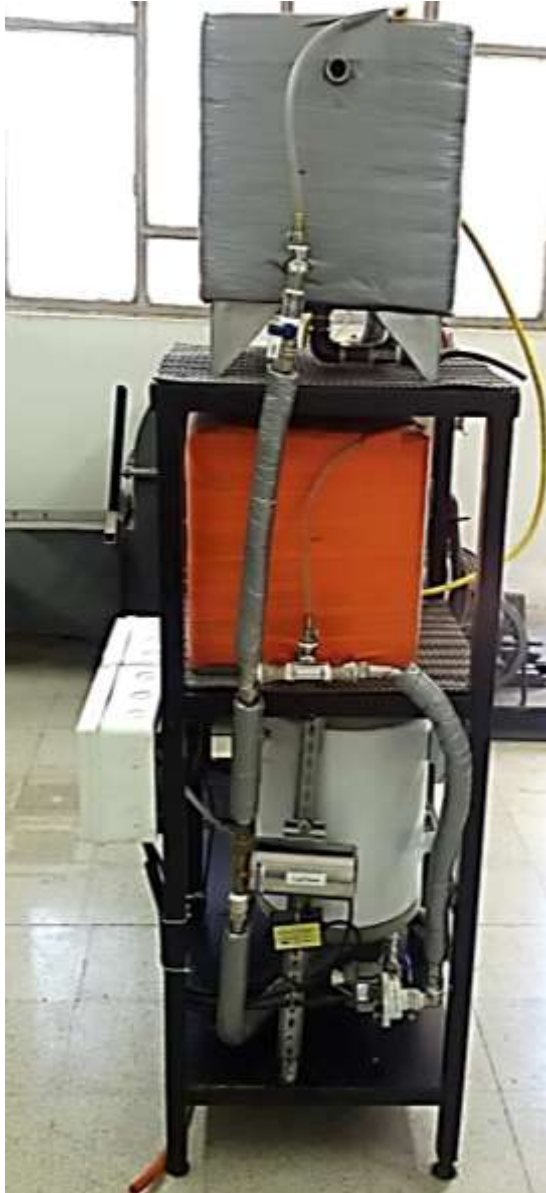


الشكل (d-3-3) أنبوب مدرج لقياس تدفق المضخات



الشكل (c-3-3) توصيلات وعائي الكربون والفرغون

الشكل (3-3) أجزاء جهاز الاختبار المصنوع.



الشكل (f-3-3) خزانات الماء ومضخات التدوير



الشكل (e-3-3) مضخات تدوير الماء



الشكل (g-3-3) مقاييس الضغط



الشكل (i-3-3) لوحة القواطع الكهربائية



الشكل (h-3-3) مقاييس درجة الحرارة

الشكل (3-3) أجزاء جهاز الاختبار المصنَّع.

3-5- الإجراءات التجريبية:

- تمّ تعبئة السّرير بكمية من الكربون المنشّط الحبيبي حتى غمر كامل ملف المبادل الحراري

$$M_{ads} = 160 \text{ g}$$

الأزواج المختبرة : $ACG/R134a$ و $ACG/R407C$.

3-5-1- اختبار سعة ادمصاص الزوج العامل عند ضغط ثابت ودرجات حرارة

مختلفة:

تمّ إجراء تجارب الادمصاص لكلا الزوجين العاملين عند ضغط إشباع $70 \text{ psi} = 4.826 \text{ bar}$ ودرجات حرارة مختلفة للماء المار ضمن مبادل السرير ($25, 35, 45, 55^\circ \text{C}$) وذلك لإمكانية التحكم بدرجة حرارة تسخين الماء ولم نتمكن من إجراء التجارب عند درجات حرارة أخفض من 25°C لعدم توفر إمكانية التحكم بدرجة حرارة تبريد الماء.

3-5-1-1- تجارب الادمصاص (خطوات التجربة - تحليل النتائج):

* تجربة الادمصاص للزوج $ACG/R134a$ عند درجة حرارة 25°C وضغط 70 psi

تتم وفق الخطوات التالية وبالمتابعة على الشكل (3-1):

- (1) تسخين الماء في الخزائين 1 و 2 إلى درجة حرارة 25°C (لأنّ التجربة كانت في الشتاء).
- (2) يُوضع وعاء الفريون الفارغ على الميزان. تُشير مقاييس الضغط إلى الصفر (ضغط مقياس).
- (3) تفريغ وعائي الفريون والكربون من الهواء، حيث تُفتح الصّمامات E,B بين الوعاءين، ويوصل أنبوب الشحن والتفريغ إلى مضخة التخلية، ويُفتح الصّمام A وتُشغل مضخة التخلية حتى يشير مقياس الضغط إلى ضغط الخلاء ، ثم يُغلق الصّمام A وتُوقف مضخة التخلية.
- (4) شحن كمية من الفريون إلى وعاء وسيط التبريد حتى يصل الضغط في الوعاء إلى القيمة 70 psi ، حيث يُغلق الصّمام E لفصل الوعاءين، ويوصل أنبوب الشحن إلى عبوة الفريون وتُقلب العبوة من أجل شحن الوعاء بسائل الفريون، ويُصقّر الميزان، ويُفتح الصّمام A ثمّ صمّام العبوة وتتم عملية الشحن حتى يشير مقياس الضغط إلى ضغط الشحن المطلوب، وتُشير قراءة الميزان إلى وزن الفريون المشحون 143 g .

(5) تُفْتَح الصمّامات 3,4,5,8,9,10 (باقي الصمّامات مغلقة) وتُشغّل مضخة الماء الساخن وتستمر عملية تسخين سرير الكربون حتى تصل درجة حرارته إلى القيمة المطلوبة 25°C .

(6) عند البدء بتجربة الادمصاص، يُصَفَّر الميزان ويُفْتَح الصمام E بين الوعاءين فتحة صغيرة وبالتالي يبدأ بخار الفريون بالانتقال من وعاء الفريون إلى وعاء الكربون، ويتم أخذ القراءات كل دقيقة إلى أن تصل قراءة الميزان إلى قيمة ثابتة وهذا يعني توقف الادمصاص، عندها يتم إغلاق الصمّام E وتُسجّل كمية الفريون المنتقل وتساوي إلى 89.5 g . يُلاحظ أنّ الضغط في نهاية عملية الادمصاص يساوي إلى ضغط الشّحن 70 psi .

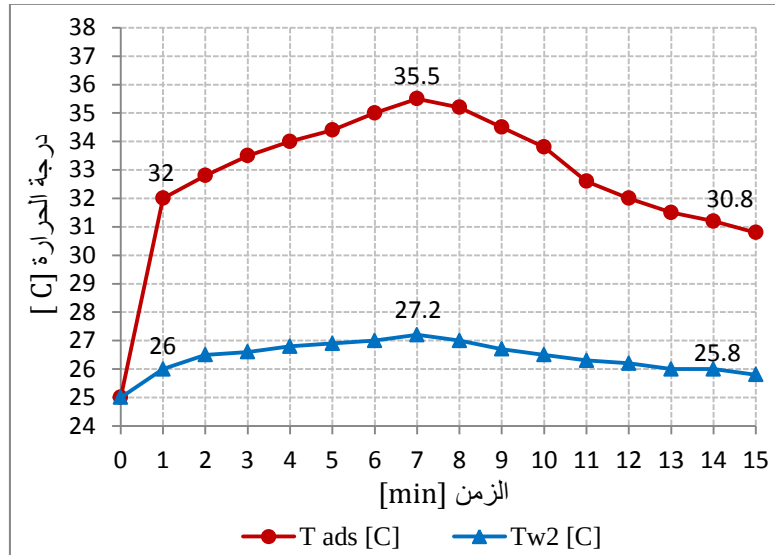
تغيّر درجة حرارة الكربون ودرجة حرارة خروج الماء من المبادل خلال عملية الادمصاص:

تمّ أخذ درجة حرارة الكربون المنشط T_{ads} ودرجة حرارة خروج ماء التبريد من المبادل T_{w2} كل دقيقة خلال زمن التجربة (علماً أنّ درجة حرارة دخول الماء إلى المبادل تساوي 25°C) كما هو موضح في الجدول (1-3)، وتمّ رسم المنحنيات البيانيّة لكلّ من T_{w2} و T_{ads} كتابع للزمن t وهي موضّحة في الشكل (3-4).

الجدول (1-3) بيانات تجربة الادمصاص عند 25°C للزوج $ACG/R\ 134a$.

t [min]	T_{ads} [C]	T_{w2} [C]
0	25	25
1	32	26
2	32.8	26.5
3	33.5	26.6
4	34	26.8
5	34.4	26.9
6	35	27
7	35.5	27.2
8	35.2	27
9	34.5	26.7
10	33.8	26.5
11	32.6	26.3
12	32	26.2
13	31.5	26
14	31.2	26
15	30.8	25.8

في بداية التجربة تكون درجة حرارة الكربون المنشط مساوية لدرجة حرارة خروج الماء من المبادل، بعد ذلك تزداد درجة حرارة الكربون المنشط نتيجة بدء عملية الادمصاص، حيث تترافق عملية الادمصاص بإطلاق حرارة هي عبارة عن مجموع الحرارة الناتجة عن تكوّن روابط بين جزيئات المادة المدمصة والجزيئات السطحية للكربون مضافاً لها الحرارة الناتجة عن تكاثف بخار الفريون ضمن مسامات الكربون المنشط، وكما تزداد درجة حرارة خروج الماء من المبادل بسبب امتصاصه جزءاً من حرارة الادمصاص وبالتالي يزداد الفرق بين درجة حرارة دخول وخروج الماء. بعد زمن مقداره 7 min تقريباً تبلغ درجة حرارة الكربون قيمتها العظمى 35.5°C وبعدها تبدأ بالانخفاض وكذلك تنخفض درجة حرارة خروج الماء من المبادل وينقص الفرق بين درجة حرارة دخول وخروج الماء ما يدل على انتهاء عملية الادمصاص.



الشكل (3-4) تغير T_{ads} و $Tw2$ كتابع للزمن عند نمط ادمصاص 25°C للزوج $ACG/R134a$.

* تجربة الادمصاص للزوج $ACG/R134a$ عند درجة حرارة 35°C وضغط 70 psi

يُوضّح الشكل (3-5) تغير T_{ads} و $Tw2$ كتابع لزمن التجربة حيث تزداد درجة حرارة الكربون كما تزداد درجة حرارة خروج الماء من المبادل بسبب الحرارة الناتجة عن الادمصاص. تصل درجة حرارة الكربون إلى قيمة عظمى 43.2°C بعد زمن قدره 4 min ثم تبدأ بالانخفاض ما يدل على انتهاء عملية الادمصاص.

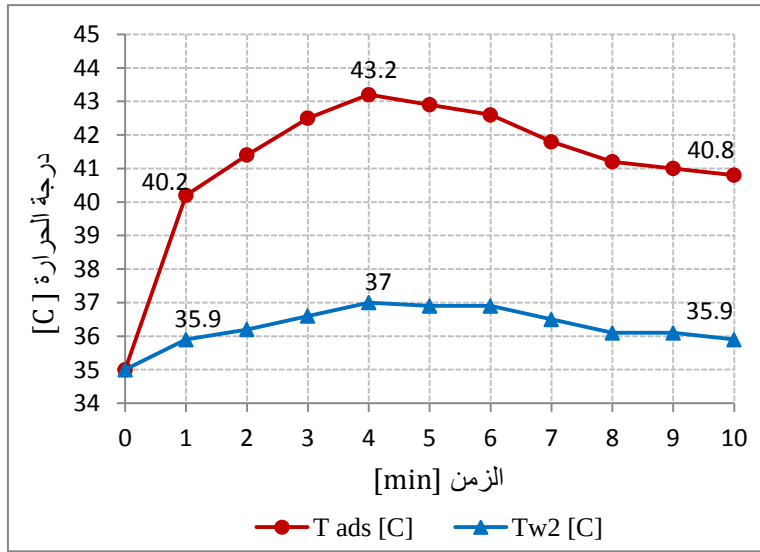
- الضغط في نهاية عملية الادمصاص يساوي ضغط الشحن 70 psi .

- كمية الفريون المنتقلة إلى وعاء الكربون هي 72 g .

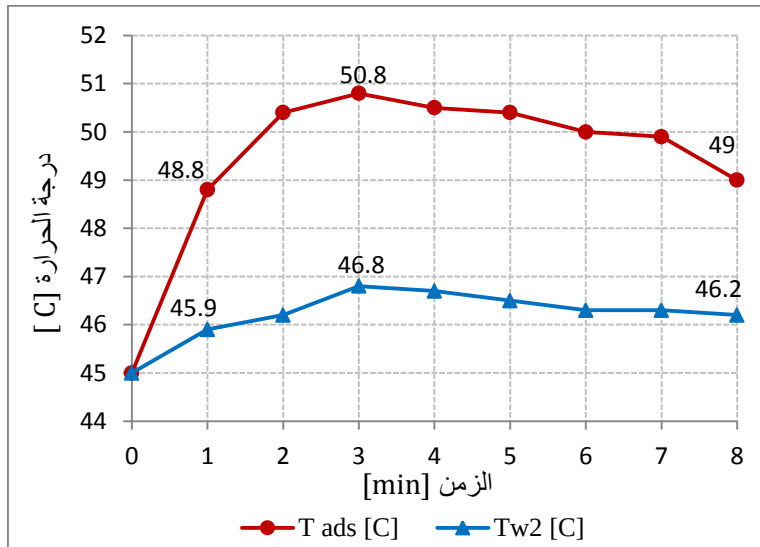
*** تجربة الادمصاص للزوج $ACG/R134a$ عند درجة حرارة $45^\circ C$ وضغط 70 psi**

يوضح الشكل (3-6) تغير T_{ads} و $T_{w,2}$ كتابع لزمن التجربة حيث تصل درجة حرارة الكربون إلى قيمة عظمى $50.8^\circ C$ بعد زمن قدره 3 min بعدها تأخذ بالانخفاض ما يعني انتهاء عملية الادمصاص.

- الضغط في نهاية عملية الادمصاص يساوي ضغط الشحن 70 psi .
- كمية الفريون المنتقلة إلى وعاء الكربون هي 52.5 g .



الشكل (3-5) تغير T_{ads} و T_{w2} كتابع للزمن عند نمط ادمصاص $ACG/R134a$ $35^\circ C$ للزوج $ACG/R134a$.



الشكل (3-6) تغير T_{ads} و T_{w2} كتابع للزمن عند نمط ادمصاص $ACG/R134a$ $45^\circ C$ للزوج $ACG/R134a$.

3-5-1-2- حساب سعة الادمصاص للزوج المُختَبَر تبعاً لنمط الادمصاص:

تمَّ إجراء تجارب الادمصاص للزوجين $ACG/R 134a$ و $ACG/R 407C$ ، عند درجات الحرارة $25, 35, 45, 55^{\circ}C$ وعند الضغط نفسه 70 psi ، وتمَّ تسجيل كمية الفريون المنتقلة في كل تجربة. علماً أنَّ كمية الكربون المنشَّط الحبيبي التي تملأ السَّيرير $M_{ads} = 160\text{ g}$ نفسها في كل التجارب. تمَّ حساب سعة الادمصاص للزوج المختبر من العلاقة التالية:

سعة ادمصاص الزوج العامل = كتلة وسيط التبريد المدمصة / كتلة المادة الادمصاصية....(3-1)

إنَّ كتلة الفريون المدمصة في الكربون المنشَّط = كتلة الفريون المنتقلة إلى وعاء الكربون - كتلة بخار الفريون التي تملأ الفراغ في الوعاء....(3-2)

حجم الفراغ في وعاء الكربون = الحجم الداخلي الكلي لوعاء الكربون - حجم الوعاء الشبكي المملوء بالكربون - حجم أنبوب المبادل الداخل والخارج من سطح الكربون.....(3-3)

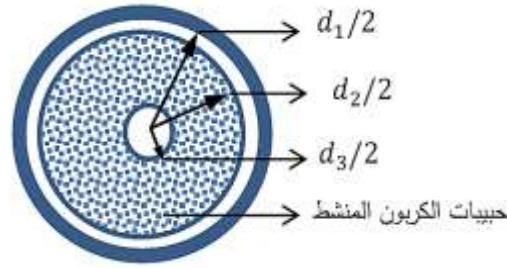
كتلة بخار الفريون التي تملأ فراغ وعاء الكربون = حجم الفراغ في وعاء الكربون / الحجم النوعي لبخار الفريون عند ضغط الإشباع السائد في وعاء الكربون.....(3-4)

حيث تمَّ إهمال الفراغ بين حبيبات الكربون في العلاقة (3-3).

تمَّ إدراج أبعاد وعاء الادمصاص في الجدول (3-2)، ويوضَّح الشكل (3-7) مقطع عرضي في وعاء الكربون، وتمَّ حساب حجم الفراغ في وعاء الكربون في الجدول (3-3).

الجدول (3-2) أبعاد وعاء الادمصاص.

الواحدة	القيمة	الرمز	
cm	10	d_1	القطر الداخلي لوعاء الكربون
cm	8.5	d_2	القطر الخارجي لوعاء الشبك
cm	1.8	d_3	القطر الداخلي لوعاء الشبك
cm	19	Z_1	عمق وعاء الكربون
cm	10	Z_2	عمق وعاء الشبك
cm	9	Z_3	ارتفاع الكربون في وعاء الشبك
cm	0.8	d_{tube}	القطر الخارجي لأنبوب المبادل
cm	9	L	طول أنبوب المبادل الداخل والخارج من الكربون



الشكل (7-3) مقطع عرضي في وعاء الكربون.

الجدول (3-3) حساب حجم الفراغ في وعاء الكربون .

الواحدة	القيمة	العلاقة	
cm^3	1492.26	$V_1 = \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 \cdot Z_1$	الحجم الداخلي لوعاء الكربون
cm^3	487.8	$V_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_2^2 - d_3^2) \cdot Z_3$	حجم الوعاء الشبكي المملوء بالكربون
cm^3	9.05	$V_3 = 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{tube}^2 \cdot L$	حجم أنبوب المبادل الخارج والداخل من وإلى الكربون
cm^3	995.41	$V = V_1 - V_2 - V_3$	حجم الفراغ في وعاء الكربون

تمّ حساب كتلة بخار وسيط التبريد التي تملأ فراغ الوعاء عند ضغط الإشباع السائد في الوعاء والقيم موضّحة في الجدول (4-3):

الجدول (4-3) حساب كتلة بخار وسيط التبريد التي تملأ فراغ وعاء الكربون .

وسيط التبريد	الحجم النوعي لبخار وسيط التبريد عند ضغط الإشباع $70 \text{ psi} = 4.826 \text{ bar}$ من جدول الإشباع	كتلة بخار وسيط التبريد التي تملأ فراغ الوعاء. من العلاقة (3-4)
R 134a	42.623 [cm^3/g]	23.5
R 407C	48.54 [cm^3/g]	20.5

يُوضّح الجدول (5-3) نتائج تجارب الادمصاص للزوج ACG/R 134a ، ويُوضّح الجدول (6-3) نتائج تجارب الادمصاص للزوج ACG/R 407C .

الجدول (5-3) نتائج تجارب الادمصاص للزوج ACG/R 134a عند ضغط 70 psi

الزوج المختبر	ACG/R134a				
درجة حرارة الادمصاص	°C	25	35	45	55
كتلة بخار الفريون التي تملأ الفراغ في وعاء الكربون	g	23.5	23.5	23.5	23.5
كمية الفريون التي انتقلت إلى وعاء الكربون	g	89.5	72	52.5	44
كمية الفريون المدمصة فعلياً في الكربون المنشط	g	66	48.5	29	20.5
سعة الادمصاص. من العلاقة (1-3)	g/g	0.4125	0.3031	0.1813	0.1281
زمن الادمصاص	min	7	4	3	3

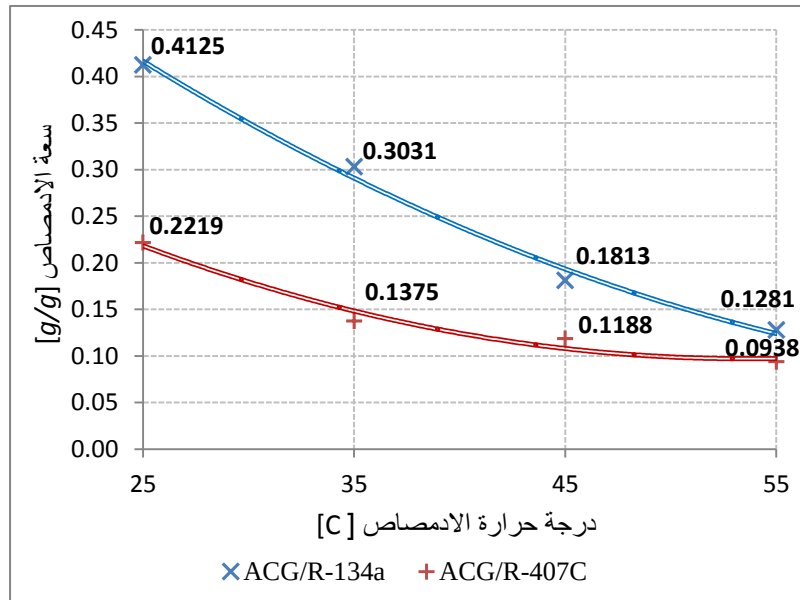
الجدول (3-6) نتائج تجارب الادمصاص للزوج ACG/R 407C عند ضغط 70 psi

الزوج المختبر	ACG/R134a				
درجة حرارة الادمصاص	°C	25	35	45	55
كتلة بخار الفريون التي تملأ الفراغ في وعاء الكربون	g	20.5	20.5	20.5	20.5
كمية الفريون التي انتقلت إلى وعاء الكربون	g	56	42.5	39.5	35.5
كمية الفريون المدمصة فعلياً في الكربون المنشط	g	35.5	22	19	15
سعة الادمصاص. من العلاقة (3-1)	g/g	0.2219	0.1375	0.1188	0.0938

النتيجة: كلما انخفضت درجة حرارة الادمصاص زادت قابلية المادة الادمصاصية لامتصاص كميات أكبر من وسيط التبريد، وبالتالي يزداد زمن الادمصاص ويزداد تركيز المادة المدمصة في المادة المسامية.

أخيراً: يمكن رسم المنحني البياني الذي يُمثل تغيّر سعة ادمصاص الزوج المُختبر بازياد درجة الحرارة وعند ضغط ثابت (إيزوبارات الادمصاص).

يُبين الشكل (3-8) تغيّر سعة ادمصاص الكربون المنشط الحبيبي لكل من وسيط التبريد R 134a و R 407C عند درجات حرارة ادمصاص [25 ÷ 55 °C] وعند ضغط إشباع ثابت 70 psi.



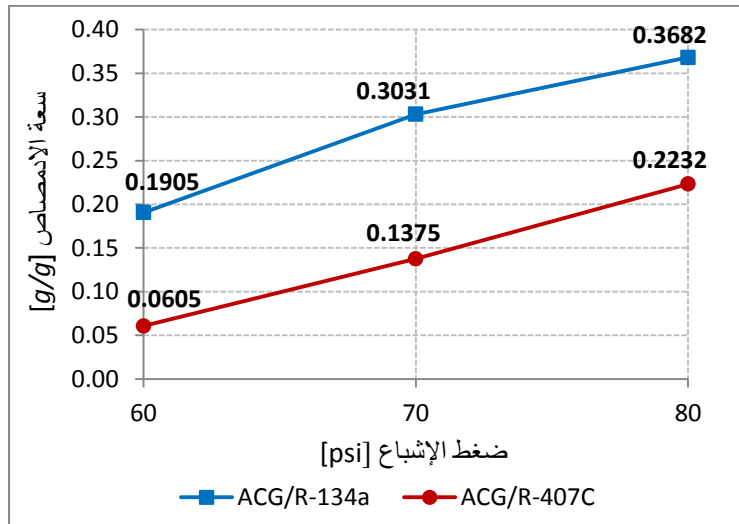
الشكل (3-8) إيزوبارات الادمصاص للزوجين ACG/R134a و ACG/R407C عند ضغط 70 psi .

وُجِدَ أنَّ الزوج ACG/R134a حقق سعة ادمصاص أعلى مقارنةً بالزوج ACG/R407C عند كافة أنماط الادمصاص. كما وُجِدَ أنَّ تغيّر تركيز وسيط التبريد R134a المدمص في الكربون الحبيبي أكبر من تغيّر تركيز وسيط التبريد R407C ضمن المجال الحراري نفسه.

3-5-2- اختبار سعة ادمصاص الزوج العامل عند درجة حرارة ثابتة وضغوط مختلفة:

تم إجراء تجارب الادمصاص للزوجين العاملين $ACG/R 134a$ و $ACG/R 407C$ عند درجة حرارة ثابتة $35^\circ C$ لدخول الماء إلى المبادل وضغوط إشباع مختلفة $60, 70, 80 \text{ psi}$ (قيم هذه الضغوط بالبار على الترتيب $4.137, 4.826, 5.516 \text{ bar}$).

تم رسم المنحني البياني الذي يُمثل تغيّر سعة ادمصاص الزوج المُختَبَر بزيادة ضغط الإشباع وعند درجة حرارة ثابتة لدخول الماء للمبادل (إيزوتيرم الادمصاص)، ووُجِدَ أَنَّ الزوج $ACG/R 134a$ حقق سعة ادمصاص أعلى مقارنةً بالزوج $ACG/R 407C$ عند كافة أنماط الادمصاص كما هو مبين في الشكل (3-9).



الشكل (3-9) إيزوتيرمات الادمصاص للزوجين $ACG/R134a$ و $ACG/R407C$ عند درجة حرارة $35^\circ C$.

3-6- مبدأ إنشاء مخطط $(P - T - x)$ لزوج ادمصاصي معيّن:

تم رسم منحنيات التركيز x كتابع لـ P و T ضمن المجال بين ضغطين معلومين P_a و P_b من أجل زوج ادمصاصي معيّن وحيث معاملات $(D - A)$ معلومة لهذا الزوج كمايلي:

- تم تقسيم المجال بين الضغطين P_a و P_b إلى مجالات جزئية $P_a, P_1, P_2, P_3, \dots, P_b$.

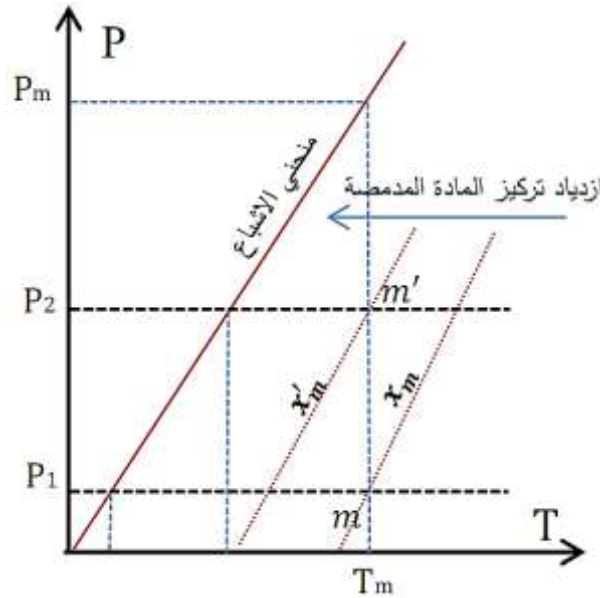
- تم إنشاء برنامج حاسوبي يعتمد على مبدأ أَنَّ النقطة m الواقعة على خط الضغط P_1 والنقطة $\dot{m}$ الواقعة على خط الضغط P_2 لهما درجة الحرارة نفسها T_m وضغط الإشباع نفسه P_m والكثافة نفسها ρ_m ، لكنّ التركيز في m هو x_m والتركيز في $\dot{m}$ هو $\dot{x}_m$ كما هو موضح في الشكل (3-10).

يقوم هذا البرنامج بحساب قيمة x عند تغيير درجة الحرارة على خط الضغط P_1 ، وكذلك حساب $\dot{x}$ عند تغيير درجة الحرارة على خط الضغط P_2 وذلك باستخدام معادلة $(D - A)$ كمايلي:

$$x_m = \omega_o \cdot \rho_m \cdot \exp \left[-D \left(T_m \ln \frac{P_m}{P_1} \right)^n \right] \dots\dots\dots (4-3)$$

$$\dot{x}_m = \omega_o \cdot \rho_m \cdot \exp \left[-D \left(T_m \ln \frac{P_m}{P_2} \right)^n \right] \dots\dots\dots (5-3)$$

بوصل x على خط P_1 مع مساويتها $\dot{x}$ على خط P_2 نحصل على خطوط التركيز ضمن مجال الضغط $[P_1 \div P_2]$ ، ويتم اتباع الطريقة نفسها لباقي المجالات وبذلك يكتمل مخطط $(P - T - x)$ لهذا الزوج ضمن مجال الضغط $[P_a \div P_b]$.



الشكل (10-3) إنشاء مخطط $(P - T - x)$ لزوج ادمصاصي ضمن مجال الضغط $[P_1 \div P_2]$.

إنَّ التجارب المخبرية السابقة ضرورية لتحديد خواص الزوج العامل ومن ثمَّ تحديد معاملات $(D - A)$ له، وبالتالي يمكن تمثيل دورة التبريد لهذا الزوج على مخطط $(P - T - x)$ من أجل الحسابات التصميمية لدارة التبريد كما سنرى في الفصلين اللاحقين.

الفصل

الرابع

تصميم سرير الأدمصاص

في دائرة تبريد لإنتاج الجليد

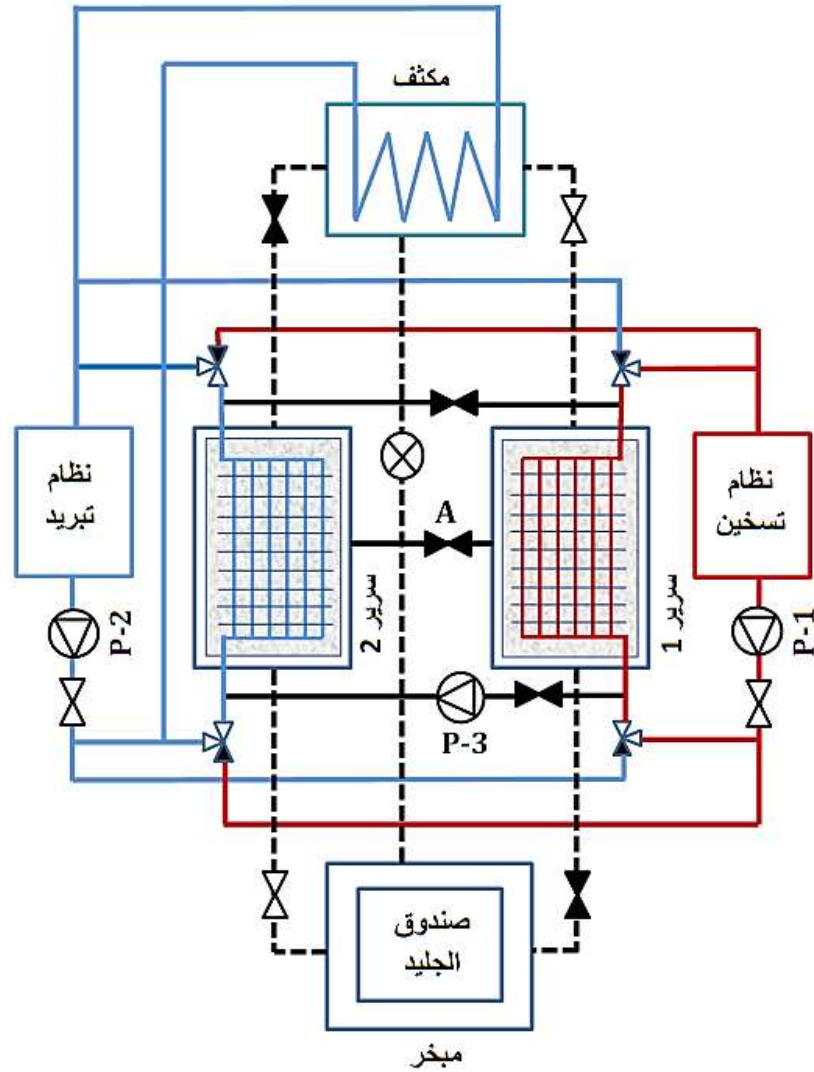
تمّ في هذا الفصل تصميم نموذج أولي لوعاء ادمصاص يعمل في دارة تبريد بهدف إنتاج ما لا يقل عن 250 g من جليد الماء في دورة عمل واحدة، ضمن شروط حراريّة تصميميّة محدّدة (درجة حرارة دخول الماء إلى حجرة التجميد، درجة حرارة الجليد المتشكّل، درجة حرارة التبخر والتكاثف، درجة الحرارة العظمى والصغرى للسّرير). وسيط التبريد المستخدم $R134a$ ، والمادة الادمصاصيّة التي تملأ الوعاء هي الكربون المنشط الحبيبي ACG . المصدر الطاقوي للنظام هو حرارة الغازات الناتجة عن العمليّات الصناعيّة، وسائل نقل الحرارة هو الماء. بعد ذلك تمّ حساب بارامترات التصميم الأساسيّة لهذه الدّارة:

- زمن دورة التبريد.
- استطاعة التجهيزات (المبخر، المكثف، المسخن، المبرد).
- مؤشّرات الأداء لهذه الدّارة (معامل الأداء، معامل استطاعة التبريد النوعيّة).

4-1- أجزاء دارة التبريد الادمصاصيّة:

تتألّف دارة التبريد الادمصاصيّة من الأجزاء التالية: وعاء ادمصاص (سريران)، مكثف مائي، مبخر يحوي حجرة تشكّل الجليد، صمّام خنق، نظام تسخين ونظام تبريد، نظام استرجاع حراري ونظام استرجاع كتلي، صمّامات تحكم on/off. يوضّح الشكل (4-1) الأجزاء الرئيسيّة لدارة التبريد.

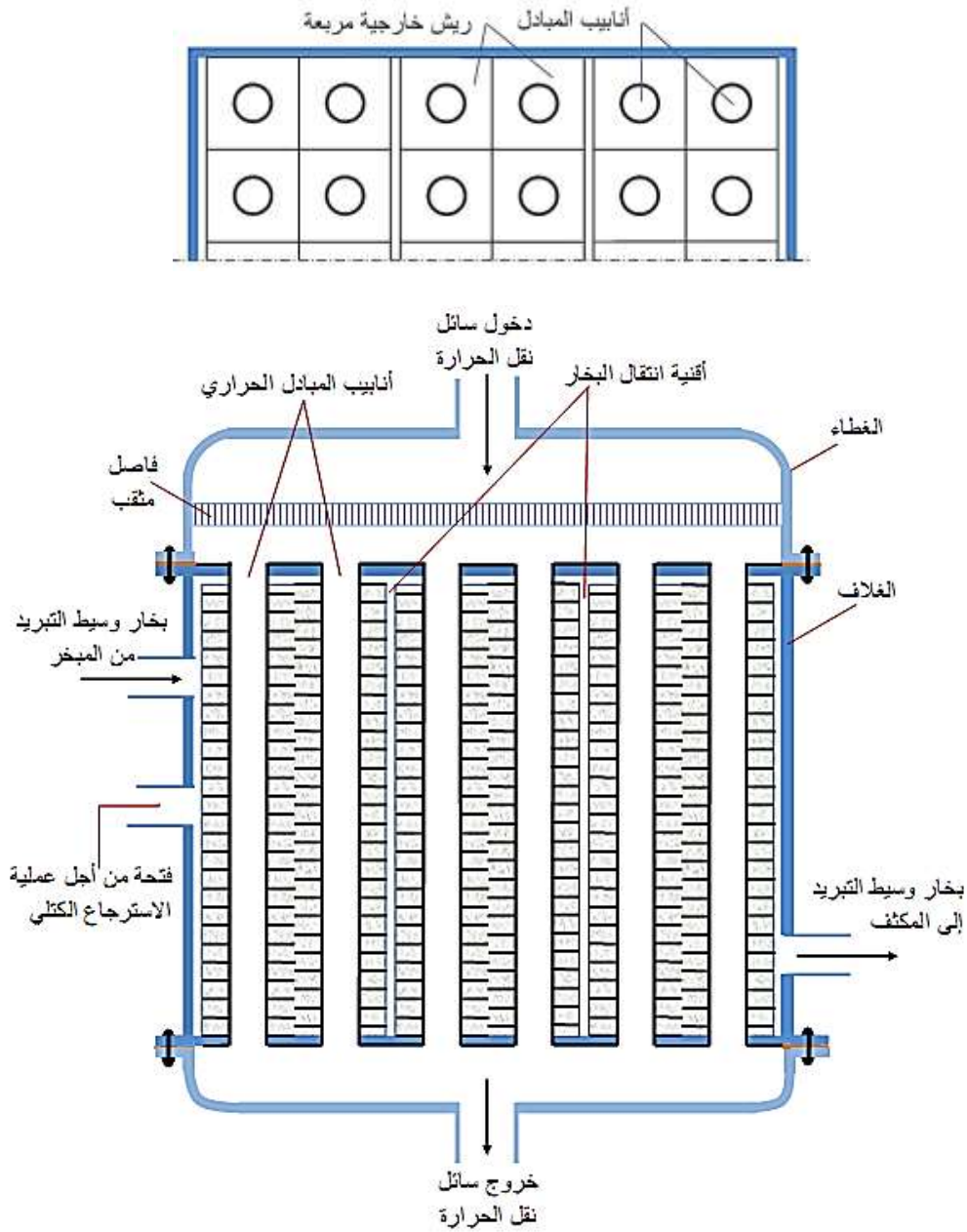
- السّريران يتناوبان على التسخين والتبريد وبالتالي يكون الإنتاج التبريدي للدارة مستمر.
- وسائل نقل الحرارة المستخدم لتبريد المكثف ولتسخين وتبريد سريري الادمصاص هو الماء.
- يتم تبريد الماء الذاهب إلى وعاء الادمصاص المراد تبريده وإلى المكثف بواسطة برج تبريد.
- يتم تسخين الماء الذاهب إلى وعاء الادمصاص المراد تسخينه بواسطة نظام تسخين عبارة عن مبادل حراري يستفيد من الحرارة العالية لغازات العادم الناتجة عن العمليات الصناعيّة.
- نظام الاسترجاع الحراري: هو عبارة عن دارة تصل بين مبادلي الوعاءين، وعند إجراء عملية استرجاع حراري تقوم المضخة P-3 بتدوير الماء بين هذين المبادلين.
- نظام الاسترجاع الكتلي: هو عبارة عن أنبوب يصل بين الوعاءين، ولإجراء عملية استرجاع كتلي يتم فتح صمّام البخار A للسماح بتدفّق البخار بين الوعاءين.



الشكل (4-1) أجزاء دارة التبريد الادمصاصية.

4-2- توصيف وعاء الادمصاص:

تمّ تصميم وعاء الادمصاص على شكل متوازي مستطيلات، يتوضّع ضمنه مبادل حراري مكوّن من مجموعة أنابيب مريّشة خارجياً. الريشة الخارجية مربعة الشكل ومسّطحة. تنتشر المادة الادمصاصية على سطح الأنابيب والريش الخارجية وتلتصق عليها بواسطة لاصق خاص. يتم الحفاظ على فراغ (أفنية) بين المادة الادمصاصية وغلاف الوعاء، ويحوي هذا الوعاء على فراغين جانبيين وفراغ علوي يصل بينهما وهذه الفراغات ذات سماكة قليلة ومهمتها تسهيل انتقال بخار وسيط التبريد من وإلى السرير. يتم عزل غلاف الوعاء وأغطيته بطبقة من العزل الحراري الجيد. يوضّح الشكل (4-2) مقطع عرضي وطولي في وعاء الادمصاص.



الشكل (4-2) مقطع عرضي وطولي في وعاء الادمصاص.

4-3- الشروط التصميمية الحرارية للدّارة:

1. درجة الحرارة الخارجية التصميمية الجافة لمدينة دمشق وريفها $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ والرطوبة $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. ملحق (2)
2. المكثف مائي وبالتالي تكون درجة حرارة التكاثف $T_{cond} = 23 + 13 = 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ [22]
3. درجة حرارة دخول الماء إلى حجرة صنع الجليد تساوي درجة الحرارة الرطوبة للهواء $T_W = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$
4. درجة حرارة الجليد المتشكّل $T_{ice} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.
5. درجة حرارة التبخر $T_{evap} = 0 - 6 = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$ [22]

6. درجة حرارة دخول ماء التسخين إلى المبادل $T_{w,h,1} = 95\text{ °C}$.
7. درجة حرارة دخول ماء التبريد إلى المبادل والمكثف $T_{w,c,1} = 23 + 3 = 26\text{ °C}$ [22].
8. الفرق بين درجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (الماء) ودرجة حرارة الكربون المنشط في نهاية عملية التسخين أو التبريد $\Delta T_{ads-w} = 10\text{ °C}$ [42]، وبالتالي يكون لدينا:
 درجة الحرارة العظمى التي يبلغها سرير الكربون المنشط $T_D = 95 - 10 = 85\text{ °C}$
 درجة الحرارة الدنيا التي يبلغها سرير الكربون المنشط $T_A = 26 + 10 = 36\text{ °C}$

4-4- الافتراضات المعتمدة في الدراسة:

1. معدل التدفق الكتلي لماء التبريد والتسخين ثابت وبدون تغيير في الطور.
2. إهمال مقاومة التلامس الحراري بين جدار الأنبوب والمادة اللاصقة، وبين جدار الأنبوب والرّيش، وبين الرّيش والمادة اللاصقة.
3. تدرّج الحرارة أحادي البعد في كل عناصر وعاء الادمصاص.
4. عمليات الادمصاص والفصل إيزوبارية.
5. بخار وسيط التبريد الخارج من المبخر في حالة إشباع.
6. سائل وسيط التبريد الخارج من المكثف في حالة إشباع. [43]

4-5- تمثيل دورة التبريد للزوج العامل على مخطط $(P - T - x)$:

معاملات $(D - A)$ للزوج المستخدم $ACG/R134a$ هي:

n	$[-]$	1.725	[44]
ω_o	$[m^3/kg]$	$0.3728 \cdot 10^{-3}$	
E	$[kJ/kmol]$	8874.9	
D	$[1/K^n]$	$6 \cdot 10^{-6}$	تمّ حسابه من العلاقة (16-2)

إيجاد تركيز المادة المدمصة الأعظمي والأصغري ومن ثمّ تغيير التركيز في السرير:

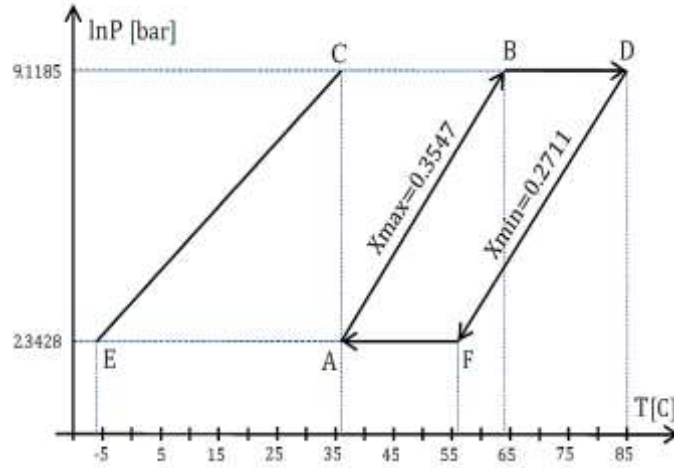
$$x_{max} = \omega_o \cdot \rho_A \cdot \exp \left[-D \left(T_A \ln \frac{P_A}{P_{evap}} \right)^n \right] = 0.3547 [kg_{ref}/kg_{ads}] \dots\dots\dots (1-4)$$

$$x_{min} = \omega_o \cdot \rho_D \cdot \exp \left[-D \left(T_D \ln \frac{P_D}{P_{cond}} \right)^n \right] = 0.2711 [kg_{ref}/kg_{ads}] \dots\dots\dots (2-4)$$

$$\Delta x = x_{max} - x_{min} = 0.0836 [kg_{ref}/kg_{ads}] \dots\dots\dots (3-4)$$

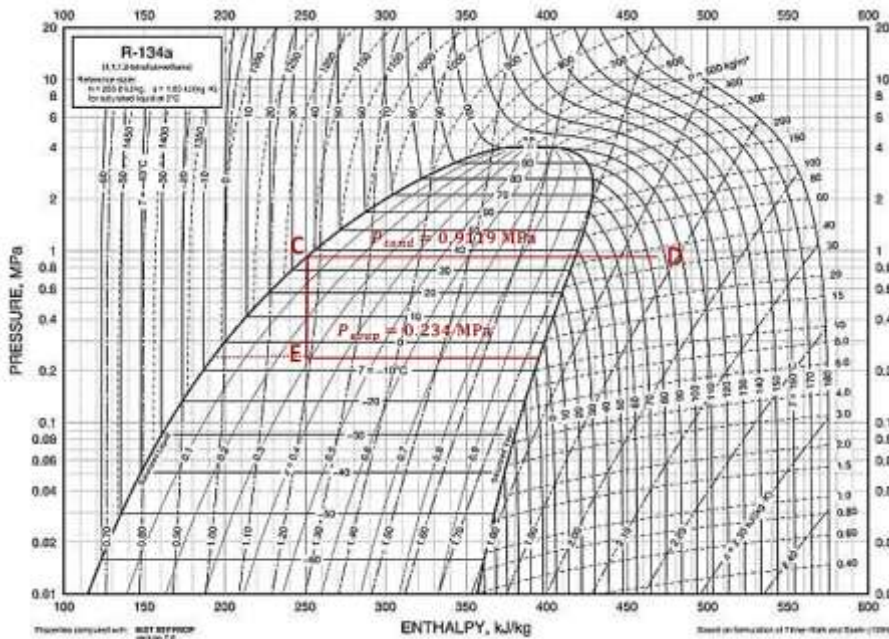
تمّ الحصول على البارامترات P_{evap} و P_{cond} و P_A و P_D و ρ_A و ρ_D بدلالة درجات الحرارة T_{evap} و T_{cond} و T_A و T_D من جداول الإشباع لوسيط التبريد $R134a$ ، ورُتبت القيم في الجدول (4-1).
إنّ نقاط دورة التبريد C و E و A و D للزوج العامل $ACG/R134a$ معلومة، وتمّ الحصول على النقاط B و F بواسطة البرنامج الحاسوبي، ثمّ تمّ تمثيل الدّورة على مخطّط $(P - T - x)$ كما هو مبين في الشكل (4-3)، وكانت قيم درجات الحرارة في هاتين النقطتين:

$$T_B = 64.5 [^{\circ}\text{C}] , \quad T_F = 56 [^{\circ}\text{C}]$$



الشكل (4-3) دورة التبريد للزوج العامل $ACG/R134a$.

كما يمكن تمثيل دورة وسيط التبريد خارج السرير (في المكثف وصمام الخنق والمبخر) على مخطّط $(\log P - h)$ كما هو موضح في الشكل (4-4).



الشكل (4-4) دورة وسيط التبريد $R134a$ خارج السرير.

ملاحظة: قبل البدء بتصميم دارة التبريد تم إيجاد إنتالبي سائل وبخار وسيط التبريد المشبع لنقاط الدّورة الستة (A و B و D و F و E و C) من جدول الإشباع لوسيط التبريد $R134a$ بدلالة درجات الحرارة في هذه النقاط، ماعدا إنتالبي البخار المتحرّر من السرير $h_{v,D}$ (وهو بخار محمّص) تمّ إيجاده من مخطط $\log(p - h)$ لوسيط التبريد $R134a$ بدلالة كلّ من P_{cond} و T_D . ورُتبت النتائج في الجدول (1-4).

الجدول (1-4) البارامترات الترموديناميكية لنقاط الدّورة الستة - الزوج العامل $ACG/R134a$

البارامتر	رمزه	واحدته	ACG/R134a
1 درجة حرارة التبخر	T_{evap}	$^{\circ}C$	-6
2 درجة حرارة التكاثف	T_{cond}	$^{\circ}C$	36
3 درجة حرارة بداية التسخين ونهاية الادمصاص	T_A	$^{\circ}C$	36
4 درجة حرارة بداية الفصل	T_B	$^{\circ}C$	64.5
5 درجة حرارة نهاية الفصل	T_D	$^{\circ}C$	85
6 درجة حرارة بداية الادمصاص	T_F	$^{\circ}C$	56
7 ضغط التبخر	P_{evap}	bar	2.3428
8 ضغط التكاثف	P_{cond}	bar	9.1185
9 ضغط الإشباع الموافق لـ T_A	P_A	bar	9.1185
10 ضغط الإشباع الموافق لـ T_B	P_B	bar	18.6845
11 ضغط الإشباع الموافق لـ T_D	P_D	bar	29.2580
12 ضغط الإشباع الموافق لـ T_F	P_F	bar	15.2820
13 كثافة سائل المادة المدمصة عند T_A	ρ_A	kg/m^3	1163.4
14 كثافة سائل المادة المدمصة عند T_B	ρ_B	kg/m^3	1028.4
15 كثافة سائل المادة المدمصة عند T_D	ρ_D	kg/m^3	887.2
16 كثافة سائل المادة المدمصة عند T_F	ρ_F	kg/m^3	1073.4
17 إنتالبي سائل وسيط التبريد عند T_{evap}	$h_{l,evap}$	kJ/kg	191.99
18 إنتالبي بخار وسيط التبريد عند T_{evap}	$h_{v,evap}$	kJ/kg	395.06
19 إنتالبي سائل وسيط التبريد عند T_{cond}	$h_{l,cond}$	kJ/kg	250.48
20 إنتالبي بخار وسيط التبريد عند T_{cond}	$h_{v,cond}$	kJ/kg	417.65
21 إنتالبي سائل المادة المدمصة عند T_A	$h_{l,A}$	kJ/kg	250.48
22 إنتالبي سائل المادة المدمصة عند T_B	$h_{l,B}$	kJ/kg	294.93
23 إنتالبي سائل المادة المدمصة عند T_D	$h_{l,D}$	kJ/kg	332.22
24 إنتالبي سائل المادة المدمصة عند T_F	$h_{l,F}$	kJ/kg	281.06
25 إنتالبي البخار المحمص لوسيط التبريد عند T_D	$h_{v,D}$	kJ/kg	467.00

4-6- تصميم دارة التبريد:

4-6-1- تصميم النموذج الأولي لوعاء الادمصاص:

أولاً- اختيار أنواع المعادن المناسبة لأجزاء وعاء الادمصاص (الغلاف والمبادل الحراري):

إنَّ المعادن المستخدمة في صنع المبادل الحراري (أنابيب، ريش) يجب أن تمتاز بمعامل توصيل حراري عالٍ وكتلة حرارية منخفضة. أمَّا المعادن المستخدمة في صنع غلاف الوعاء وأعطيته فيجب أن تمتاز بمعامل توصيل حراري منخفض وكتلة حرارية منخفضة. إنَّ قيمة منخفضة للكتلة الحرارية مطلوبة لكلٍّ من معادن المبادل والريش والغلاف وتُعطى بالعلاقة:

$$C = M \cdot c_p = V \cdot \rho \cdot c_p \dots\dots\dots(4-4)$$

M كتلة المعدن للعنصر (غلاف، أنابيب، ريش خارجية، ريش داخلية) $[kg]$

V حجم العنصر $[m^3]$

ρ كثافة المعدن $[kg/m^3]$

c_p السعة الحرارية النوعية للمعدن $[J/kg \cdot ^\circ C]$

C الكتلة الحرارية للعنصر $[J/^\circ C]$

الجدول (2-4) يبيِّن الخواص الفيزيائية لبعض المعادن. [45],[42]

الجدول (2-4) الخواص الفيزيائية لبعض المعادن.

	λ	ρ	c_p	$\rho \cdot c_p$
	$[W/m \cdot ^\circ C]$	$[kg/m^3]$	$[J/kg \cdot ^\circ C]$	$[kJ/m^3 \cdot ^\circ C]$
ألومنيوم صافي	237	2702	903	2439.91
نحاس صافي	401	8933	385	3439.21
خليطة T6 – 2024	177	2770	875	2423.75
خليطة 195	168	2790	883	2463.57
خليطة الألومنيوم T6 – 1601	218	2710	903	2447.13
خليطة الألومنيوم T81 – 2219	120	2770	919	2545.63
ستانلس ستيل 304	14.9	7900	477	3768.3
فولاذ نسبة كربون 5%	45	7900	461	3641.9
ستانلس ستيل	60.5	7800	490	3822

بناءً على ذلك تم اختيار خليطة الألمنيوم T6 – 1601 في تصنيع المبادل الحراري لأن هذه الخليطة تتمتع بمتانة عالية مقارنة بالألمنيوم الصافي، وتم اختيار خليطة الألمنيوم T81 – 2219 في تصنيع الغلاف والأغطية ورغم معامل التوصيل الحراري الجيد لها إلا أنه تم الأخذ بالاعتبار أن الوعاء معزول بعازل حراري.

ثانياً- تحديد الخواص الفيزيائية للمادة الادمصاصية المستخدمة:

الخواص الفيزيائية للكربون المنشط الحبيبي ACG موضحة في الجدول التالي:

الكثافة	ρ_{ads}	$[g/cm^3]$	0.47	[44]
الحجم النوعي للمسامات	ϑ_{pore}	$[cm^3/g]$	0.472	
المسامية	ε_{ads}	[-]	0.222	حساب من العلاقة (21-2)

تم اعتبار السعة الحرارية النوعية لأنواع الكربون المنشط المستخدمة في هذا البحث تساوي إلى $c_p = 900 [J/kg.^\circ C]$ [39]، ومعامل التوصيل الحراري للجزء الصلب من المادة المسامية يساوي إلى $\lambda = 0.3 [W/m.^\circ C]$ [40].

ثالثاً- حساب كتلة الكربون المنشط الحبيبي في الوعاء:

- تم تصميم وعاء الادمصاص ليعمل في دارة التبريد ضمن الشروط الحرارية المحددة سابقاً، وإنتاج ما لا يقل عن 250 g من جليد الماء خلال دورة عمل واحدة.

- تُحسب كمية الحرارة التي يمتصها وسيط التبريد في المبخر من 250 g من الماء (لتبريده من درجة حرارة دخوله إلى حجرة التجميد $T_w = 23^\circ C$ حتى درجة حرارة التجمد $0^\circ C$ ، ثم تحويله إلى جليد عند الدرجة $0^\circ C$) من العلاقة:

$$Q_e = M_w (C_{l,w} \Delta T_w + L_w(0^\circ C)) = 107.716 \text{ kJ} \dots\dots\dots(5-4)$$

حيث:

$$C_{l,w} = 4.194 \text{ kJ/kg.}^\circ C \text{ السعة الحرارية للماء عند درجة الحرارة الوسطية } \frac{23+0}{2} = 11.5^\circ C$$

$$L_w(0^\circ C) = 334.4 \text{ kJ/kg} \text{ الحرارة النوعية الكامنة لتجمد الماء. [22]}$$

- تُحسَب كتلة وسيط التبريد اللازم تبخرها في المبخر لإنتاج 250 g جليد خلال دورة عمل واحدة من العلاقة:

$$M_{ref} = \frac{Q_e}{h_{v,evap} - h_{l,cond}} = 0.745\text{ kg} \dots\dots\dots(6-4)$$

- تُحسَب كتلة المادة الادمصاصية في الوعاء اللازمة لادمصاص كتلة بخار وسيط التبريد القادمة من المبخر من العلاقة:

$$M_{ads} = \frac{M_{ref}}{\Delta x} = 8.91\text{ kg} \dots\dots\dots(7-4)$$

تمّ اعتبار كتلة الكربون المنشط التي تملأ الوعاء تساوي تقريباً 10 kg .

رابعاً- تحديد المواصفات الهندسية لمكونات الوعاء:

تمّ تصميم وعاء الادمصاص بحيث يستوعب الحجم المخصّص للمادة الادمصاصية في الوعاء كمية من الكربون المنشط الحبيبي ACG مقدارها 10 kg تقريباً، وبالتالي تمّ فرض بعض الأبعاد لمكونات الوعاء وهي موضّحة في الجدول (3-4) وعلى أساسها تُحسب بقيّة الأبعاد. (الحجم المخصص للمادة الادمصاصية هو الحجم المحصور ما بين السطح الداخلي لغلاف الوعاء والسطح الخارجي للمبادل الحراري).

الجدول (3-4) الأبعاد التصميمية المفروضة للنموذج الأولي لوعاء الادمصاص.

سماعة جدار وعاء الادمصاص	δ_{shell}	mm	3
القطر الداخلي للأنبوب الرئيسي للمبادل الحراري	D	mm	20
القطر الداخلي لأنابيب المبادل	$D_{tube,in}$	mm	12
سماعة جدار الأنبوب	δ_{tube}	mm	0.8
عدد صفوف الأنابيب	N_{row}	-	6
عدد الأنابيب في الصف الواحد	$N_{tube,row}$	-	8
الارتفاع الداخلي للوعاء قبل إضافة الريش الخارجية والفراغ العلوي	Z_o	mm	450
سماعة فراغ تجمع البخار (علوي، جانبي)	δ_{space}	mm	3
سماعة الريش الخارجية	$\delta_{fin,ex}$	mm	0.3
عدد الريش الخارجية على أنبوب واحد	$N_{fin,ex}$	-	50

الحسابات:

القطر الخارجي لأنابيب المبادل:

$$D_{tube,ex} = D_{tube,in} + 2\delta_{tube} = 13.6 [mm] \quad (8-4)$$

المسافة بين أنبوبين متتاليين حيث تمّ فرضها تساوي إلى:

$$b_{tube} = 3D_{tube,ex}/2 = 20.4 [mm] \quad (9-4)$$

خطوة الأنابيب:

$$S_{tube} = b_{tube} + \frac{2D_{tube,ex}}{2} = 34 [mm] \quad (10-4)$$

العدد الكلي للأنابيب في الوعاء:

$$N_{tube,tot} = N_{row} \cdot N_{tube,row} = 48 \quad (11-4)$$

البُعد الداخلي للوعاء باتجاه X بدون فراغات جانبية:

$$X_o = N_{row} \cdot S_{tube} = 204 [mm] \quad (12-4)$$

البُعد الداخلي للوعاء باتجاه X مع فراغات جانبية:

$$X_{in} = X_o + 2\delta_{space} = 210 [mm] \quad (13-4)$$

البُعد الداخلي للوعاء باتجاه Y :

$$Y_o = Y_{in} = N_{tube,row} \cdot S_{tube} = 272 [mm] \quad (14-4)$$

البُعد الخارجي للوعاء باتجاه X :

$$X_{ex} = X_{in} + 2\delta_{shell} = 216 [mm] \quad (15-4)$$

البُعد الخارجي للوعاء باتجاه Y :

$$Y_{ex} = Y_{in} + 2\delta_{shell} = 278 [mm] \quad (16-4)$$

الارتفاع الكلي للرّيش الخارجية:

$$(\delta \cdot N)_{fin,ex} = \delta_{fin,ex} \cdot N_{fin,ex} = 15 [mm] \quad (17-4)$$

الارتفاع الداخلي للوعاء (عمقه) بعد إضافة الارتفاع الكلي للرّيش:

$$Z_t = Z_o + (\delta \cdot N)_{fin,ex} = 465 [mm] \quad (18-4)$$

خطوة التريش الخارجي:

$$S_{fin,ex} = \frac{Z_t}{N_{fin,ex}} = 9.3 [mm] \dots\dots\dots(19-4)$$

المسافة بين ريشتين متتاليتين:

$$b_{fin,ex} = S_{fin,ex} - \delta_{fin,ex} = 9 [mm] \dots\dots\dots(20-4)$$

الارتفاع الداخلي للوعاء (عمقه) بعد إضافة سماكة الريش وسماكة الفراغ العلوي:

$$Z_{in} = Z_t + \delta_{space} = 468 [mm] \dots\dots\dots(21-4)$$

أبعاد الريشة الخارجية المربعة المسطحة:

$$X_{fin,ex} = Y_{fin,ex} = a = 34 [mm] \dots\dots\dots(22-4)$$

خامساً- حساب حجم وكتلة كل جزء من أجزاء وعاء الادمصاص:

الحجم الداخلي للوعاء:

$$V_{in} = X_{in} \cdot Y_{in} \cdot Z_{in} = 26732.16 [cm^3] \dots\dots\dots(23-4)$$

الحجم الداخلي للوعاء قبل إضافة التريش الخارجي للأنايب وقبـل إضافة فراغات انتقال البخار:

$$V_o = X_o \cdot Y_o \cdot Z_o = 24969.6 [cm^3] \dots\dots\dots(24-4)$$

وفيما يلي حجـوم مكوّنات وعاء الادمصاص:

1- الحجم المخصّص للمادة الادمصاصية:

$$V_{ads} = V_o - \left(\frac{\pi D_{tube,ex}^2}{4} Z_o \cdot N_{tube,tot} \right) = 21831.827 [cm^3] \dots\dots\dots(25-4)$$

وتكون كتلة الكربون الحبيبي التي تملأ هذا الحجم هي:

$$M_{ads} = V_{ads} \cdot \rho_{ads} = 10.261 [kg] \dots\dots\dots(26-4)$$

إذاً إنّ الحجم المخصّص للمادة الادمصاصية في الوعاء يستوعب الكتلة المطلوبة من الكربون المنشط الحبيبي. في حال نتج أنّ كتلة الكربون الحبيبي داخل الوعاء أكبر أو أصغر بمقدار معتبر من الكتلة المطلوبة عندئذٍ يتم تغيير واحد أو اثنين من الافتراضات التالية: (عدد صفوف الأنايب، عدد الأنايب في الصف الواحد، ارتفاع وعاء الادمصاص) حتى نحصل على المطلوب، وذلك باستخدام برنامج

رياضي حاسوبي تمّ إنشاؤه لهذا الغرض. بعد إجراء الحسابات التصميمية لوعاء الادمصاص وُجِدَ أنَّ الأبعاد المفروضة المبينة في الجدول (3-4) أعطت النتيجة المطلوبة (وهي أنَّ الوعاء يستوعب تقريباً 10 kg من ACG) وعلى أساسها تمّ حساب بقيّة أبعاد الوعاء ومن ثمّ حساب حجوم كافة مكوّنات الوعاء وكتلتها.

2- حجم الغلاف والأغطية:

$$V_{shell} = (X_{ex} \cdot Y_{ex} - X_{in} \cdot Y_{in}) Z_{in} + (X_{ex} \cdot Y_{ex} \cdot \delta_{shell} \cdot 2) = 1730.59 [cm^3] \quad (27-4)$$

3- حجم الأنابيب في الوعاء:

$$V_{tube,tot} = \frac{\pi}{4} (D_{tube,ex}^2 - D_{tube,in}^2) \cdot Z_{in} \cdot N_{tube,tot} = 722.67 [cm^3] \quad (28-4)$$

4- حجم الريش الخارجية في الوعاء :

$$V_{fin,ex} = \left[(X_{fin,ex} \cdot Y_{fin,ex}) - \left(\frac{\pi D_{tube,ex}^2}{4} \right) \right] \cdot \delta_{fin,ex} \cdot N_{fin,ex} \cdot N_{tube,tot} = 727.73 [cm^3] \quad (29-4)$$

ومن ثمّ يمكن حساب كتلة كل جزء من أجزاء وعاء الادمصاص وهي مبينة في الجداول (4-4) و(4-5) و(4-6)، كما تُبيّن هذه الجداول المواصفات الهندسية والفيزيائية لكلّ جزء.

الجدول (4-4) المواصفات الهندسية والفيزيائية للغلاف.

القيمة	الواحدة	الرمز	الغلاف
216	mm	X_{ex}	البعد الخارجي للوعاء باتجاه X
278	mm	Y_{ex}	البعد الخارجي للوعاء باتجاه Y
210	mm	X_{in}	البعد الداخلي للوعاء باتجاه X
272	mm	Y_{in}	البعد الداخلي للوعاء باتجاه Y
3	mm	δ_{shell}	سماعة جدار الوعاء
468	mm	Z_{in}	الارتفاع الداخلي للوعاء
1730.592	cm^3	V_{shell}	حجم الغلاف + الأغطية
2770	kg/m^3	ρ_{shell}	كثافة المعدن
4.794	kg	M_{shell}	كتلة الغلاف
919	$J/kg \cdot ^\circ C$	$C_{p,shell}$	السعة الحرارية النوعية
4405.447	$J/^\circ C$	C_{shell}	الكتلة الحرارية للغلاف
120	$W/m \cdot ^\circ C$	λ_{shell}	معامل التوصيل الحراري

الجدول (4-5) المواصفات الهندسية والفيزيائية للأنابيب.

القيمة	الواحدة	الرمز	الأنابيب
48	-	$N_{tube,tot}$	عدد الأنابيب
13.6	mm	$D_{tube,ex}$	القطر الخارجي للأنبوب
12	mm	$D_{tube,in}$	القطر الداخلي للأنبوب
0.8	mm	δ_{tube}	سماعة جدار الأنبوب
468	mm	$Z_{in} = Z$	طول الأنبوب الواحد ضمن الوعاء
722.665	cm^3	V_{tube}	الحجم الكلي للأنابيب ضمن الوعاء
2710	kg/m^3	ρ_{tube}	كثافة المعدن
1.958	kg	M_{tube}	الكتلة الكلية للأنابيب ضمن الوعاء
903	$J/kg.^\circ C$	$C_{p,tube}$	السعة الحرارية النوعية للمعدن
1768.455	$J/^\circ C$	C_{tube}	الكتلة الحرارية للأنابيب ضمن الوعاء
218	$W/m.^\circ C$	λ_{tube}	معامل التوصيل الحراري للمعدن

الجدول (4-6) المواصفات الهندسية والفيزيائية للریش الخارجية.

القيمة	الواحدة	الرمز	الریش الخارجية
50	-	$N_{fin,ex}$	عدد الریش الخارجية على أنبوب واحد
0.3	mm	$\delta_{fin,ex}$	سماعة الریشة الخارجية
34	mm	$X_{fin,ex}$	طول ضلع الریشة الخارجية المربعة
9.3	mm	$S_{fin,ex}$	خطوة التريش
9	mm	$b_{fin,ex}$	المسافة بين ریشتين متتاليتين
727.728	cm^3	$V_{fin,ex}$	الحجم الكلي للریش الخارجية ضمن الوعاء
2710	kg/m^3	$\rho_{fin,ex}$	كثافة المعدن
1.972	kg	$M_{fin,ex}$	الكتلة الكلية للریش الخارجية ضمن الوعاء
903	$J/kg.^\circ C$	$C_{p,fin,ex}$	السعة الحرارية النوعية للمعدن
1780.844	$J/^\circ C$	$C_{fin,ex}$	الكتلة الحرارية للریش الخارجية ضمن الوعاء
218	$W/m.^\circ C$	$\lambda_{fin,ex}$	معامل التوصيل الحراري لمعدن الریشة

الجدول (4-7) المواصفات الهندسية والفيزيائية للكربون المنشط الحبيبي.

القيمة	الواحدة	الرمز	الكربون المنشط الحبيبي
21831.828	cm^3	V_{ads}	حجم المادة الادمصاصية ضمن الوعاء
470	kg/m^3	ρ_{ads}	كثافة المادة الادمصاصية
10.261	kg	M_{ads}	كتلة المادة الادمصاصية ضمن الوعاء
900	$J/kg.^\circ C$	$C_{p,ads}$	السعة الحرارية النوعية
9234.863	$J/^\circ C$	C_{ads}	الكتلة الحرارية للمادة الادمصاصية ضمن الوعاء
0.3	$W/m.^\circ C$	λ_{ads}	معامل التوصيل الحراري للمادة الادمصاصية
0.222	-	ε_{ads}	المسامية

4-6-2- انتقال الحرارة في وعاء الادمصاص:

يُحسب معامل انتقال الحرارة الكلي للسرير إما في مرحلة تسخين السرير والفصل (تحوّل سائل وسيط التبريد ضمن المسامات إلى بخار ومغادرة السرير) أو في حالة تبريد السرير والادمصاص (تحوّل بخار وسيط التبريد إلى سائل ضمن المسامات).

من أجل حساب معامل انتقال الحرارة الكلي للسرير في مرحلة التسخين والفصل تمّ حساب مايلي:

(1) معامل انتقال الحرارة الكلي بالحمل من الماء الساخن إلى السطح الداخلي للمبادل $(A\alpha)_{int,tot}$.

(2) معامل انتقال الحرارة الكلي بالتوصيل عبر جدران أنابيب المبادل $(A\lambda)_{tube,tot}$.

(3) معامل انتقال الحرارة الكلي بالحمل من السطح الخارجي للمبادل إلى وسيط التبريد المدمص في مسامات المادة الادمصاصية $(A\alpha)_{ex,tot}$.

(4) معامل انتقال الحرارة الكلي بالتوصيل من السطح الخارجي للمبادل حتى أبعد نقطة في المادة الادمصاصية $(A\lambda)_{ads,tot}$.

لحساب المعاملات السابقة تمّ فرض فروق درجات الحرارة التصميمية في وعاء الادمصاص كمايلي:

درجة حرارة دخول الماء الساخن إلى الأنبوب $T_{w,h,1} = 95\text{ }^{\circ}\text{C}$.

درجة حرارة السطح الداخلي للأنبوب ؟ $T_{s,in}$ و درجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب ؟ $T_{s,ex}$.

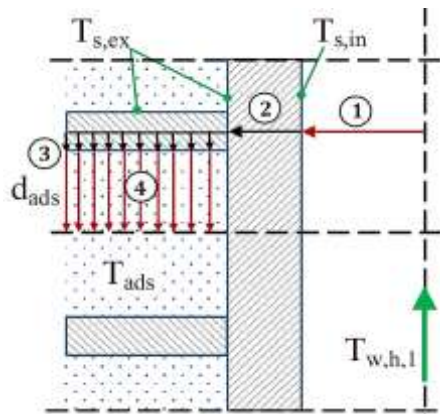
درجة حرارة الكربون المنشط $T_{ads} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، حيث تمّ فرض $\Delta T_{w-ads} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

بفرض: $T_{w,h,1} - T_{s,in} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ وبالتالي $T_{s,in} = 93\text{ }^{\circ}\text{C}$

بفرض: $T_{s,in} - T_{s,ex} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ وبالتالي $T_{s,ex} = 91\text{ }^{\circ}\text{C}$

وأخيراً ينتج أن: $T_{s,ex} - T_{ads} = 91 - 85 = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$

يُوضّح الشكل (4-5) انتقال الحرارة ودرجات الحرارة التصميمية.



الشكل (4-5) انتقال الحرارة ودرجات الحرارة التصميمية ضمن وعاء الادمصاص.

I - حساب معامل انتقال الحرارة الكلي بالحمل من الماء إلى السطح الداخلي للمبادل:

العلاقات المستخدمة في حساب معامل انتقال الحرارة بالحمل عند جريان سائل ضمن أنبوب.

يُعطى عدد رينولدز بالعلاقة التالية:

$$Re = \frac{\rho \cdot V_m \cdot D_h}{\mu} \quad \dots\dots\dots(30-4)$$

ويُعطى القطر الهيدروليكي للأنبوب بالعلاقة:

$$D_h = \frac{4 A_{sec}}{U_{wet}} \quad \dots\dots\dots(31-4)$$

ρ كثافة السائل المتدفق ضمن الأنبوب $[kg/m^3]$

μ اللزوجة الديناميكية للسائل $[Pa \cdot sec = kg/m \cdot sec]$

V_m السرعة الوسطية للجريان $[m/sec]$

D_h القطر الهيدروليكي للأنبوب $[m]$

A_{sec} مساحة مقطع الجريان $[m^2]$

U_{wet} المحيط المبلل (الرطب) من الأنبوب $[m]$

عدد رينولدز الحرج في حالة الجريان ضمن الأنبوب $Re = 2300$

$Re < 2300$ الجريان صفائحي

$2300 < Re < 10^4$ الجريان انتقالي

$Re > 10^4$ الجريان مضطرب

أ- عندما $Re < 3000$

يُحسب معامل الاحتكاك من العلاقة التجريبية التالية:

$$f = \frac{16}{Re} \quad \dots\dots\dots(32-4)$$

يُحسب انخفاض الضغط من العلاقة:

$$\Delta P = \frac{4f \cdot L}{D_h} \cdot \frac{\rho \cdot V_m^2}{2} \quad \dots\dots\dots(33-4)$$

حيث: L طول الأنبوب $[m]$

يُحسب عدد نوسيلت من العلاقة التجريبية:

$$Nu = 1.86 \left(\frac{Re \cdot Pr}{L/D} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad \dots\dots\dots(34-4)$$

يتم حساب جميع بارامترات هذه المعادلة عند درجة الحرارة الوسطية للسائل المتدفق في الأنبوب،
 ماعدا μ_s يتم حسابها عند درجة حرارة السطح الداخلي لجدار الأنبوب.

يُحسب عدد براندل من العلاقة:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \dots\dots\dots(35-4)$$

حيث: μ اللزوجة الديناميكية للسائل $[Pa \cdot sec = kg/m \cdot sec]$

c_p السعة الحرارية النوعية للسائل $[J/kg \cdot ^\circ C]$

λ معامل التوصيل الحراري للسائل $[W/m \cdot ^\circ C]$

أخيراً يُحسب معامل انتقال الحرارة بالحمل من العلاقة:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_h} \dots\dots\dots(36-4)$$

ب- عندما $Re > 3000$

يُحسب معامل الاحتكاك من العلاقة التجريبية:

$$f = (1.58 \ln(Re) - 3.28)^{-2} \dots\dots\dots(37-4)$$

يُحسب انخفاض الضغط ΔP من العلاقة (33-4) السابقة.

يُحسب عدد نوسيلت من علاقة *Dittus – Boelter* التجريبية:

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} \cdot Pr^n \dots\dots\dots(38-4)$$

هذه العلاقة صحيحة عندما تكون $Re \geq 10^4$ و $0.6 \leq Pr \leq 160$

$n = 0.4$ عندما تكون درجة حرارة السائل أقل من درجة حرارة سطح الأنبوب.

$n = 0.3$ عندما تكون درجة حرارة السائل أعلى من درجة حرارة سطح الأنبوب.

عند استخدام هذه العلاقة تصل نسبة الخطأ إلى 25% ، ويمكن تخفيض هذا الخطأ إلى أقل من 10% من خلال استخدام العلاقة التي أوصى بها *Gnielinski* وهي صالحة على نطاق واسع لأعداد رينولدز بما في ذلك المنطقة الانتقالية:

$$Nu = \frac{(f/2)(Re-1000) Pr}{1+12.7(f/2)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \dots\dots\dots(39-4)$$

هذه العلاقة صحيحة عندما تكون $3000 < Re \leq 5 \cdot 10^6$ و $0.5 \leq Pr \leq 2000$

وأخيراً يُحسب معامل انتقال الحرارة بالحمل من العلاقة (36-4). [46]

أولاً- حساب معامل انتقال الحرارة بالحمل من الماء إلى واحدة السطح الداخلي للمبادل α_{int} :

- إنَّ السرعة الاقتصادية لتدفق الماء في أنابيب مبادل حراري $2.5 \div 1 \text{ m/sec}$ [22]، لذلك نفرض أنَّ سرعة تدفق الماء في الأنبوب الرئيسي للمبادل $V_w = 2.5 \text{ m/sec}$.
- القطر الداخلي للأنبوب الرئيسي للمبادل $D = 20 \text{ mm}$.
- الأنبوب غير مَرِيَّش داخلياً وبالتالي $D_h = D_{tube,in}$.
- تُؤخَذ المواصفات الهندسية لأنابيب المبادل الحراري $(N_{tube,tot}, D_{tube,in}, D_{tube,ex}, Z_{in})$ من الجدول (5-4).
- من جداول (ماء- بخار) تمَّ الحصول على الخواص الفيزيوكحرارية للماء عند درجة حرارة دخوله إلى المبادل كما هو مُبيَّن في الجدول (8-4) التالي:

الجدول (8-4): الخواص الفيزيوكحرارية لماء التسخين.

$T_{w,h,1}$	$^{\circ}\text{C}$	95
ρ_w	kg/m^3	961.9
$c_{p,w}$	$\text{kJ/kg.}^{\circ}\text{C}$	4.21
μ_w	$\mu\text{pa. sec}$	297.3
λ_w	$\text{mW/m.}^{\circ}\text{C}$	677.3

- حساب تدفق الماء في الأنبوب الرئيسي للمبادل:

$$\dot{M}_w = \rho_w \cdot V_w \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 0.7555 [\text{kg/sec}] \dots\dots\dots(40-4)$$

- حساب تدفق الماء في كل أنبوب من أنابيب المبادل:

$$\dot{M}_1 = \frac{\dot{M}_w}{N_{tube,tot}} = 0.01574 [\text{kg/sec}] \dots\dots\dots(41-4)$$

- حساب سرعة الماء في كل أنبوب من أنابيب المبادل:

$$V_1 = \frac{\dot{M}_1}{\rho_w \cdot \left(\frac{\pi D_{tube,in}^2}{4} \right)} = 0.14468 [\text{m/sec}] \dots\dots\dots(42-4)$$

- حساب عدد رينولدز لجريان الماء في أنابيب المبادل بتعويض المعطيات في العلاقة (30-4):

$$Re = \frac{\rho_w \cdot V_1 \cdot D_{tube,in}}{\mu_w} = 5617.105 \dots\dots\dots(43-4)$$

بما أنَّ $10^4 > Re > 3000$ فالجريان انتقالي ونستخدم مجموعة العلاقات الخاصة بهذا المجال.

- حساب عدد براندل من العلاقة (4-35):

$$Pr = \frac{\mu_w \cdot c_{p,w}}{\lambda_w} = 1.85 \dots \dots \dots (44-4)$$

- حساب معامل الاحتكاك من العلاقة (4-37):

$$f = (1.58 \ln(Re) - 3.28)^{-2} = 9.315 * 10^{-3} \dots \dots \dots (45-4)$$

- حساب هبوط الضغط في الأنبوب بتعويض المعطيات في العلاقة (4-33):

$$\Delta P = \frac{4f \cdot Z_{in}}{D_{tube,in}} \cdot \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} = 14.629 [N/m^2] \dots \dots \dots (46-4)$$

- حساب عدد نوسيلت بتعويض المعطيات في العلاقة (4-39):

$$Nu = \frac{(f/2)(Re-1000) Pr}{1+12.7(f/2)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} = 27.626 \dots \dots \dots (47-4)$$

- حساب معامل انتقال الحرارة بالحمل من الماء الساخن إلى واحدة السطح الداخلي للأنبوب بتعويض المعطيات في العلاقة (4-36):

$$\alpha_{int} = \frac{Nu \cdot \lambda_w}{D_{tube,in}} = 1559.278 [W/m^2 \cdot ^\circ C] \dots \dots \dots (48-4)$$

ثانياً- حساب معامل انتقال الحرارة الكلي بالحمل من الماء إلى السطح الداخلي للمبادل
: $(A\alpha)_{int,tot}$

- حساب مساحة السطح الداخلي للأنبوب الواحد:

$$A_{int,1} = \pi \cdot D_{tube,in} \cdot Z_{in} = 17.643 * 10^{-3} [m^2] \dots \dots \dots (49-4)$$

- بما أن الأنبوب غير مريش من الداخل بالتالي مردود السطح الداخلي للأنبوب = 1

$$\eta_{int} = 1 \dots \dots \dots (50-4)$$

ويُحسب معامل انتقال الحرارة الكلي بالحمل من العلاقة:

$$(A\alpha)_{int,tot} = \eta_{int} \cdot A_{int,1} \cdot N_{tube,tot} \cdot \alpha_{int} = 1320.51 [W/^\circ C] \dots \dots \dots (51-4)$$

II- حساب معامل انتقال الحرارة الكلي بالتوصيل لأنابيب الوعاء الواحد:

أولاً- معامل التوصيل الحراري لوادة الطول لأنبوب المبادل λ_{tube} :

$$\lambda_{tube} = 218 [W/m.^\circ C] \text{ قيمته تساوي}$$

ثانياً- معامل انتقال الحرارة الكلي بالتوصيل لأنابيب المبادل $(A\lambda)_{tube,tot}$:

يُحسب من العلاقة التالية:

$$(A\lambda)_{tube,tot} = \frac{2\pi \cdot Z_{in} \cdot N_{tube,tot} \cdot \lambda_{tube}}{\ln \frac{D_{tube,ex}}{D_{tube,in}}} = 245836.856 [W/^\circ C] \dots\dots\dots(52-4)$$

III- حساب معامل انتقال الحرارة الكلي بالحمل من السطح الخارجي للمبادل إلى

وسيط التبريد المدمص في الكربون المنشط:

أولاً- حساب معامل انتقال الحرارة من واحدة السطح الخارجي للمبادل إلى وسيط التبريد المدمص

في الكربون المنشط α_{ex} :

عند تسخين السرير يتم تحرير وسيط التبريد المدمص في مسامات الكربون المنشط حيث يتحول من سائل إلى بخار ويغادر السرير. من معادلة التبخر على السطح الخارجي لأنبوب أو كرة [33]:

$$Nu = C \cdot \left(\frac{g \cdot \rho_v \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot r_{evap} \cdot D^3}{\mu_v \cdot \lambda_v \cdot (T_s - T_{sat})} \right)^{1/4} \dots\dots\dots(53-4)$$

حيث: $C = 0.62$ في حالة اسطوانة.

$C = 0.67$ في حالة كرة.

مع العلم أن:

$$g = 9.81 [m/sec^2] \text{ تسارع الجاذبية الأرضية.}$$

$$D = D_{tube,ex} = 13.6 [mm] \text{ القطر الخارجي للأنبوب.}$$

$$T_s = T_{s,ex} \text{ درجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب.}$$

$$T_{sat} = T_{ads} \text{ درجة الحرارة التي يتم عندها تبخر سائل وسيط التبريد المدمص في المسامات وهي}$$

تساوي إلى درجة حرارة الكربون المنشط.

$$T_s - T_{sat} = T_{s,ex} - T_{ads} = 6 [^\circ C] \text{ وبالتالي يكون:}$$

إنَّ درجات الحرارة $T_{s,ex}, T_{ads}$ تتغيَّر خلال فترة التسخين لكنَّ الفرق $T_{s,ex} - T_{ads}$ يبقى ثابت.

يتم إيجاد باقي البارامترات المطلوبة لحساب Nu من جدول الإشباع لـ $R134a$ وذلك عند درجة الحرارة الوسطية للسريـر: $\bar{T}_{ads} = \bar{T}_{sat} = \frac{T_A + T_D}{2} = 60.5 [^{\circ}C]$ ، وهي مرتبَّة في الجدول (4-9).
بتعويض القيم السابقة في المعادلة (4-53) يتم الحصول على عدد نوسيلت:

$$Nu = 0.62 \left(\frac{g \cdot \rho_v \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot r_{evap} \cdot D_{tube,ex}^3}{\mu_v \cdot \lambda_v \cdot (T_{s,ex} - T_{ads})} \right)^{1/4} = 409.654 \dots\dots\dots(54-4)$$

من أجل الكربون المنشَّط الحبيبي ذي المساميَّة $\varepsilon = 0.222$ تصبح علاقة عدد نوسيلت كما يلي:

$$\varepsilon \cdot Nu = \frac{\alpha_{ex} \cdot D_{tube,ex}}{\lambda_v} \dots\dots\dots(55-4)$$

الجدول (4-9): الخواص الفيزيـوحراريَّة لـ $R134a$ عند درجة الحرارة الوسطية للسريـر $60.5^{\circ}C$.

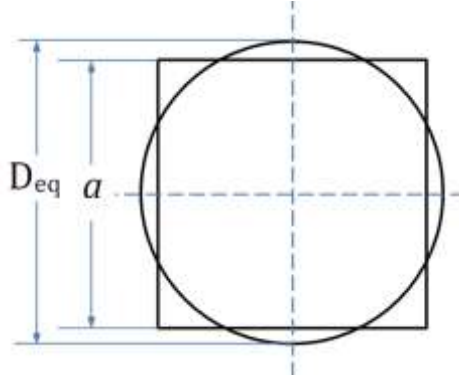
درجة حرارة التبخر الوسطية	$\bar{T}_{sat}$	[$^{\circ}C$]	60.5
كثافة سائل وسيط التبريد المدمص	ρ_l	[kg/m^3]	1050.225
كثافة بخار وسيط التبريد المتحرر	ρ_v	[kg/m^3]	88.5936
إنتالبي سائل وسيط التبريد المدمص	h_l	[kJ/kg]	288.32
إنتالبي بخار وسيط التبريد المتحرر	h_v	[kJ/kg]	426.7575
الحرارة الكامنة لتبخـر وسيط التبريد	r_{evap}	[kJ/kg]	138.4375
اللزوجة الديناميكية لسائل وسيط التبريد المدمص	μ_l	[$\mu Pa \cdot sec$]	123.3
اللزوجة الديناميكية لبخار وسيط التبريد المتحرر	μ_v	[$\mu Pa \cdot sec$]	13.83
معامل التوصيل الحراري لسائل وسيط التبريد المدمص	λ_l	[$mW/m \cdot ^{\circ}C$]	65.875
معامل التوصيل الحراري لبخار وسيط التبريد المتحرر	λ_v	[$mW/m \cdot ^{\circ}C$]	18.4025

وبالتالي يكون معامل انتقال الحرارة من واحدة السطح الخارجي للأنبوب المريَّش إلى وسيط التبريد المدمص في الكربون المنشَّط:

$$\alpha_{ex} = \frac{\varepsilon \cdot Nu \cdot \lambda_v}{D_{tube,ex}} = 123.057 [W/m^2 \cdot ^{\circ}C] \dots\dots\dots(56-4)$$

ثانياً- حساب معامل انتقال الحرارة الكلِّي بالحمل من السطح الخارجي للمبادل إلى وسيط التبريد المدمص في الكربون المنشَّط $(A\alpha)_{ex,tot}$:

- حساب مردود الرِّيشة الخارجية المربعة $\eta_{fin,ex}$: يتم التعامل مع الرِّيشة المربعة على أنها ريشة نصف قطريَّة (شعاعيَّة) مكافئة [46] كما هو موضح في الشكل (4-6).



الشكل (4-6) الريشة المربعة والريشة النصف قطرية المكافئة لها.

أبعاد الريشة المربعة:

$$a = X_{fin,ex} = Y_{fin,ex} = b_{tube} + D_{tube,ex} = 34 [mm] \dots\dots\dots(57-4)$$

قطر الريشة النصف قطرية المكافئة للمربعة:

$$a^2 = \frac{\pi D_{eq}^2}{4} \rightarrow D_{eq} = \frac{2a}{\sqrt{\pi}} = 38.365 [mm] \dots\dots\dots(58-4)$$

طول الريشة :

$$L_{fin,ex} = \frac{D_{eq} - D_{tube,ex}}{2} = 12.3824 [mm] \dots\dots\dots(59-4)$$

إنَّ نهاية هذه الرِّيشة ليست أدبياتِيَّةً وبالتالي نستبدل طول الريشة $L_{fin,ex}$ بالطول المصحَّح L_C :

$$L_C = L_{fin,ex} + \frac{\delta_{fin,ex}}{2} = 12.5324 [mm] \dots\dots\dots(60-4)$$

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\delta \cdot \lambda}} = \sqrt{\frac{2 \alpha_{ex}}{\delta_{fin,ex} \cdot \lambda_{fin,ex}}} = 61.3451 [1/m] \dots\dots\dots(61-4)$$

$$m \cdot L_C = 0.7688 \dots\dots\dots(62-4)$$

$$\tan h(m \cdot L_C) = \frac{e^{2m \cdot L_C} - 1}{e^{2m \cdot L_C} + 1} = 0.6462 \dots\dots\dots(63-4)$$

ويُحسب مردود الرِّيشة من العلاقة التالية:

$$\eta_{fin,ex} = \frac{\tanh(m \cdot L_C)}{m \cdot L_C} = 0.8406 \dots\dots\dots(64-4)$$

- حساب مساحة السطح الخارجي المريَّش لأنبوب واحد:

مساحة سطح الريش على أنبوب واحد:

$$A_{fin,ex} = \left(2 \left(a^2 - \frac{\pi D_{tube,ex}^2}{4} \right) + 4a \cdot \delta_{fin,ex} \right) \cdot N_{fin,ex} = 1031.132 [cm^2] \dots\dots(65-4)$$

مساحة السطح غير المريش لأنبوب واحد:

$$A_{b,ex} = \pi \cdot D_{tube,ex} \cdot b_{fin,ex} \cdot N_{fin,ex} = 192.265 [cm^2] \dots\dots\dots(66-4)$$

وتكون مساحة السطح الخارجي المريش لأنبوب واحد:

$$A_{ex,1} = A_{fin,ex} + A_{b,ex} = 1223.397 [cm^2] \dots\dots\dots(67-4)$$

- حساب مرود السطح الخارجي المريش:

$$\eta_{ex} = 1 - \left[\frac{A_{fin,ex}}{A_{ex,1}} (1 - \eta_{fin,ex}) \right] = 0.8656 \dots\dots\dots(68-4)$$

- أخيراً يُحسب معامل انتقال الحرارة الكلي بالحمل من السطح الخارجي للمبادل من العلاقة التالية:

$$(A\alpha)_{ex,tot} = \eta_{ex} \cdot A_{ex,1} \cdot N_{tube,tot} \cdot \alpha_{ex} = 625.528 [W/^{\circ}C] \dots\dots\dots(69-4)$$

[45], [46]

IV- حساب معامل انتقال الحرارة الكلي بالتوصيل ضمن المادة الادمصاصية:

أولاً- حساب معامل انتقال الحرارة المكافئ بالتوصيل ضمن المادة الادمصاصية λ_{eff}

يُحسب من العلاقة (28-2) في الفصل الثاني.

$$\lambda_{eff} = \lambda_{ads}(1 - \varepsilon) + \lambda_v \cdot \varepsilon = 0.2375 [W/m. ^{\circ}C] \dots\dots\dots(70-4)$$

$\lambda_{ads} = 0.3 [W/m. ^{\circ}C]$ معامل التوصيل الحراري للكربون المنشط.

$\lambda_v = 18.4025 * 10^{-3} [W/m. ^{\circ}C]$ معامل التوصيل الحراري لبخار R134a في مسامات

الكربون المنشط عند درجة الحرارة الوسطية للسريـر .

$\varepsilon = 0.222$ مسامية المادة الادمصاصية.

ثانياً- حساب معامل انتقال الحرارة الكلي بالتوصيل ضمن المادة الادمصاصية $(A\lambda)_{ads,tot}$:

- حساب مسافة التوصيل الحراري d_{ads} : وهي عبارة عن المسافة العظمى لانتقال الحرارة من السطح

الخارجي للمبادل إلى أبعد نقطة ضمن المادة الادمصاصية.

مسافة التوصيل الحراري = حجم المادة الادمصاصية / مساحة السطح الذي تنتشر عليه المادة .

$$d_{ads} = \frac{V_{ads}}{A_{ex,1} \cdot N_{tube,tot}} = 0.37177 [cm] \dots\dots\dots(71-4)$$

- ويُعطى معامل انتقال الحرارة الكلي بالتوصيل ضمن المادة الادمصاصية بالعلاقة التالية:

$$(A\lambda)_{ads,tot} = A_{ex,1} \cdot N_{tube,tot} \cdot \frac{\lambda_{eff}}{d_{ads}} = 375.115 [W/^{\circ}C] \dots\dots\dots(72-4)$$

VI - حساب معامل انتقال الحرارة الكلي لسرير الكربون المنشط الحبيبي:

يتم حساب معامل انتقال الحرارة الكلي في وعاء الادمصاص من العلاقة:

$$(AK)_{tot,h} = 1 / \left[\frac{1}{(A\alpha)_{int,tot}} + \frac{1}{(A\lambda)_{tube,tot}} + \frac{1}{(A\alpha)_{ex,tot}} + \frac{1}{(A\lambda)_{ads,tot}} \right] = 198.971 \left[\frac{W}{^{\circ}C} \right] \dots\dots\dots(73-4)$$

4-6-3 - الحسابات الحرارية لدارة إنتاج الجليد:

(1) كتلة وسيط التبريد العاملة في الدارة:

كتلة وسيط التبريد العاملة في الدارة هي كتلة وسيط التبريد التي يتم ادمصاصها ثم تحريرها من سرير الكربون المنشط وتُحسب من العلاقة التالية:

$$M_{ref} = M_{ads} (x_{max} - x_{min}) = 0.8584 [kg] \dots\dots\dots(74-4)$$

(2) قدرة المكثف خلال دورة عمل واحدة:

تعطى كمية الحرارة التي يطرحها وسيط التبريد خلال عملية تكاثفه بشكل كامل في المكثف بالعلاقة:

$$Q_{cond} = M_{ref} (h_{v,D} - h_{l,cond}) = 185.854 [kJ] \dots\dots\dots(75-4)$$

(3) قدرة المبخر خلال دورة عمل واحدة:

تعطى كمية الحرارة التي يكتسبها وسيط التبريد خلال عملية تبخره بشكل كامل في المبخر بالعلاقة:

$$Q_{evap} = M_{ref} (h_{v,evap} - h_{l,cond}) = 124.103 [kJ] \dots\dots\dots(76-4)$$

(4) كتلة الجليد المتكوّنة خلال دورة عمل واحدة:

تُحسب كمية الحرارة التي يمتصّها وسيط التبريد في المبخر من 1 kg من الماء (لتبريده من درجة حرارة دخوله إلى حجرة التجميد $T_w = 23^{\circ}C$ حتى درجة حرارة التجمد $0^{\circ}C$ ، ثم تحويله إلى جليد عند الدرجة $0^{\circ}C$) من العلاقة:

$$q_e = M_w (C_{l,w} \cdot \Delta T_w + L_w(0^{\circ}C)) = 430.86 [kJ/kg_w] \dots\dots\dots(77-4)$$

وبالتالي تكون كمية الجليد المتكوّنة خلال دورة عمل واحدة:

$$M_{ice} = Q_{evap}/q_e = 0.288 [kg] \dots\dots\dots(78-4)$$

(5) كمية الحرارة المقدّمة للسّير خلال فترة التسخين، وكمية الحرارة المطروحة من السّير خلال فترة التبريد (في دورة عمل واحدة):

نحسب كميات الحرارة المقدّمة والمطروحة من السّير في كل مرحلة من المراحل الأربعة باستخدام معادلات التوازن الحراري والكتلي.

• **مرحلة تسخين السّير بثبات التركيز $A \rightarrow B$:**

الحرارة المقدّمة للسّير هي عبارة عن حرارة محسوسة لرفع درجة حرارة السّير من T_A إلى T_B .

$$Q_{AB} = (M_{ads} \cdot c_{p,ads} + M_{ads} \cdot x_{max} \cdot c_{p,ref} + M_{bed} \cdot c_{p,bed})(T_B - T_A) \dots\dots\dots(79-4)$$

تُعتبر السّعة الحرارية لمكوّنات السّير الصلبة (الكربون المنشط، المعادن) ثابتة، أما السّعة الحرارية لوسيط التبريد المدمص بشكل سائل في مسامات الكربون المنشط فإنها تتغيّر بتغيّر درجة الحرارة، وتصبح العلاقة السابقة على الشكل التالي:

$$Q_{AB} = [(M_{ads} \cdot c_{p,ads} + M_{bed} \cdot c_{p,bed})(T_B - T_A)] + [M_{ads} \cdot x_{max} \cdot (h_{l,B} - h_{l,A})] \dots\dots\dots(80-4)$$

• **مرحلة التسخين والفصل الإيزوباري $B \rightarrow D$:**

الحرارة المقدّمة للسّير هي عبارة عن حرارة محسوسة لرفع درجة حرارة السّير من T_B إلى T_D ، وحرارة كامنة لفصل (تحرير) وسيط التبريد من مسامات الكربون.

$$Q_{BD} = [(M_{ads} \cdot c_{p,ads} + M_{ads} \cdot \bar{x} \cdot c_{p,ref} + M_{bed} \cdot c_{p,bed})(T_D - T_B)] + M_{ads}(x_{max} - x_{min})h_{ads} \dots\dots\dots(81-4)$$

$$Q_{BD} = [(M_{ads} \cdot c_{p,ads} + M_{bed} \cdot c_{p,bed})(T_D - T_B)] + [M_{ads} \cdot \bar{x} \cdot (h_{l,D} - h_{l,B})] + M_{ads}(x_{max} - x_{min})h_{ads} \dots\dots\dots(82-4)$$

$M_{ads}(x_{max} - x_{min})$ كتلة وسيط التبريد المتحرّرة.

$\bar{x} = (x_{max} + x_{min})/2$ متوسط تركيز المادة المدمصة في سرير الكربون المنشط.

h_{ads} الحرارة النوعية الكامنة للادمصاص / فصل.

وبالتالي تكون الحرارة المقدّمة للسّير خلال فترة التسخين $A \rightarrow D$:

$$Q_D = Q_{AB} + Q_{BD} \dots\dots\dots(83-4)$$

$$Q_D = [(M_{ads} \cdot c_{p,ads} + M_{bed} \cdot c_{p,bed})(T_D - T_A)] + [M_{ads} (x_{max}(h_{l,B} - h_{l,A}) + \bar{x} \cdot (h_{l,D} - h_{l,B}))] + M_{ads}(x_{max} - x_{min})h_{ads} \dots\dots\dots(84-4)$$

$$M_{bed} \cdot c_{p,bed} = M_{shell} \cdot c_{p,shell} + M_{tube} \cdot c_{p,tube} + M_{fin,ex} \cdot c_{p,fin,ex} + M_{fin,rad} \cdot c_{p,fin,rad} \dots\dots\dots(85-4)$$

• مرحلة تبريد السّير بثبات التركيز $D \rightarrow F$:

يتمّ فيها تبريد السّير لتخفيض درجة حرارته المحسوسة من T_D إلى T_F .

$$Q_{DF} = (M_{ads} \cdot c_{p,ads} + M_{ads} \cdot x_{min} \cdot c_{p,ref} + M_{bed} \cdot c_{p,bed})(T_D - T_F) \dots\dots(86-4)$$

$$Q_{DF} = [(M_{ads} \cdot c_{p,ads} + M_{bed} \cdot c_{p,bed})(T_D - T_F)] + [M_{ads} \cdot x_{min} \cdot (h_{l,D} - h_{l,F})] \dots\dots\dots(87-4)$$

• مرحلة التبريد والادمصاص الإيزوباري $F \rightarrow A$:

الحرارة المطروحة من السّير هي عبارة عن حرارة محسوسة لتخفيض درجة حرارة السّير من T_F إلى T_A وحرارة كامنة ناتجة عن ادمصاص وسيط التبريد ضمن مسامات الكربون المنشط، مع ملاحظة أنّ تدفق بخار وسيط التبريد من المبخر إلى الوعاء ونتيجة لدرجة حرارته المنخفضة فإنّه يساعد على تبريد وعاء الادمصاص بمقدار :

$$M_{ref} \cdot c_{ref,v} \cdot (T_A - T_{evap}) = M_{ads} \cdot (x_{max} - x_{min}) \cdot (h_{v,A} - h_{v,evap}) \dots\dots(88-4)$$

وتكون الحرارة المطروحة من السّير في هذه المرحلة:

$$Q_{FA} = [(M_{ads} \cdot c_{p,ads} + M_{ads} \cdot \bar{x} \cdot c_{p,ref} + M_{bed} \cdot c_{p,bed})(T_F - T_A)] + [M_{ads}(x_{max} - x_{min})h_{ads}] - [M_{ads}(x_{max} - x_{min})(h_{v,A} - h_{v,evap})] \dots\dots\dots(89-4)$$

$$Q_{FA} = [(M_{ads} \cdot c_{p,ads} + M_{bed} \cdot c_{p,bed})(T_F - T_A)] + [M_{ads} \cdot \bar{x} \cdot (h_{l,F} - h_{l,A})] + [M_{ads}(x_{max} - x_{min})h_{ads}] - [M_{ads}(x_{max} - x_{min})(h_{v,A} - h_{v,evap})] \dots\dots\dots(90-4)$$

وبالتالي تكون الحرارة المطروحة من السرير خلال فترة التبريد $D \rightarrow A$:

$$Q_A = Q_{DF} + Q_{FA} \dots\dots\dots(91-4)$$

$$Q_A = [(M_{ads} \cdot c_{p,ads} + M_{bed} \cdot c_{p,bed})(T_D - T_A)] + [M_{ads} (x_{min}(h_{l,D} - h_{l,F}) + \bar{x} \cdot (h_{l,F} - h_{l,A}))] + [M_{ads}(x_{max} - x_{min})h_{ads}] - [M_{ads}(x_{max} - x_{min})(h_{v,A} - h_{v,evap})] \dots\dots\dots(92-4)$$

إنَّ الحرارة الناتجة عن عملية (الادمصاص / فصل) $h_{ads/des}$ أعلى بحوالي 30 – 100% من الحرارة الناتجة عن عملية (تكاثف / تبخر) المادة المدمصة ضمن المادة المسامية. [26]
تمَّ افتراض أنَّ $h_{ads/des}$ أكبر بحوالي 60% من متوسط الحرارة الكامنة النوعية لتكاثف / تبخر المادة المدمصة خلال الإجراء BD.

$$h_{ads/des} = 1.6 (\bar{h}_{l/v})_{BD} \dots\dots\dots(93-4)$$

$$T_B = 64.5 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow (h_{l/v})_B = h_{v,B} - h_{l,B} = 132.785 \text{ kJ/kg}$$

$$T_D = 85 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow (h_{l/v})_D = h_{v,D} - h_{l,D} = 95.54 \text{ kJ/kg}$$

$$(\bar{h}_{l/v})_{BD} = \frac{(h_{l/v})_B + (h_{l/v})_D}{2} = 114.16 \text{ kJ/kg} \dots\dots\dots(94-4)$$

$$h_{ads/des} = 182.66 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_D = 1280.62 \text{ [kJ]} \text{ من المعادلة (84-4)}$$

$$Q_A = 1220.2 \text{ [kJ]} \text{ من المعادلة (92-4)}$$

(6) زمن نصف الدّورة:

زمن نصف الدّورة وهو زمن مرحلتي التسخين أو زمن مرحلتي التبريد. حيث تمَّ حساب زمن نصف الدّورة $\Delta t_{1/2cycle}$ اللازم حتى يصبح الفرق بين سائل نقل الحرارة (الماء) والمادة الادمصاصية $\Delta T_{w-ads} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$. ويتم حسابه من العلاقة التالية:

$$\dot{Q}_D = \frac{Q_D}{\Delta t_{1/2cycle}} = (AK)_{tot,h} \cdot \Delta T_{w-ads} \dots\dots\dots(95-4)$$

$$\Delta t_{1/2cycle} = \frac{Q_D}{(AK)_{tot,h} \cdot \Delta T_{w-ads}} = 643.62 \text{ [sec]} = 10.727 \text{ [min]} \dots\dots\dots(96-4)$$

(7) معدل تدفق وسيط التبريد في الدارة:

$$\dot{M}_{ref} = \frac{M_{ref}}{\Delta t_{1/2cycle}} = 1.3337 [g/sec] \dots\dots\dots(97-4)$$

(8) استطاعة التجهيزات:

- استطاعة المبخر عند درجة حرارة تبخر $-6^\circ C$:

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{Q}_{cool} = \frac{Q_{evap}}{\Delta t_{1/2cycle}} = 192.821 [W] \dots\dots\dots(98-4)$$

- استطاعة المكثف عند درجة حرارة تكاثف $36^\circ C$:

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{Q_{cond}}{\Delta t_{1/2cycle}} = 288.764 [W] \dots\dots\dots(99-4)$$

- استطاعة المسخن عند درجة حرارة $95^\circ C$:

$$\dot{Q}_D = \frac{Q_D}{\Delta t_{1/2cycle}} = 1989.714 [W] \dots\dots\dots(100-4)$$

- استطاعة المبرد عند درجة حرارة $26^\circ C$:

$$\dot{Q}_A = \frac{Q_A}{\Delta t_{1/2cycle}} = 1895.833 [W] \dots\dots\dots(101-4)$$

حتى تكون الدارة متوازنة حرارياً يجب أن يتحقق:

$$\dot{Q}_A + \dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_D + \dot{Q}_{evap} \dots\dots\dots(102-4)$$

$$(\dot{Q}_A + \dot{Q}_{cond}) - (\dot{Q}_D + \dot{Q}_{evap}) = 2184.597 - 2182.535 = 2.062 [W]$$

وهو فرق صغير جداً. ويكون الخطأ النسبي: $\frac{2.062}{2184.597} = 0.934 \times 10^{-3}$ وبالتالي فإن دارة التبريد متوازنة حرارياً.

(9) معامل الأداء للدارة:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_D} = 0.0969 = 9.69 \% \dots\dots\dots(103-4)$$

(10) معامل استطاعة التبريد النوعية:

$$SCP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{M_{ads}} = 18.792 [W/kg_{ads}] \dots\dots\dots(104-4)$$

(11) درجة حرارة خروج ماء التسخين من المبادل:

$$T_{w,h,2} = T_{w,h,1} - \frac{\dot{Q}_D}{\dot{M}_w \cdot c_{p,w,h}} = 94.37 [^{\circ}\text{C}] \dots\dots\dots(105-4)$$

(12) درجة حرارة خروج ماء التبريد من المبادل:

$$T_{w,c,2} = T_{w,c,1} + \frac{\dot{Q}_A}{\dot{M}_w \cdot c_{p,w,c}} = 26.6 [^{\circ}\text{C}] \dots\dots\dots(106-4)$$

(13) معامل انتقال الحرارة الكلي للسرير في مرحلة التبريد:

$$(AK)_{tot,c} = \frac{\dot{Q}_A}{\Delta T_{w-ads}} = 189.583 [W/^{\circ}\text{C}] \dots\dots\dots(107-4)$$

ملاحظة: إنَّ معامل انتقال الحرارة الكلي للسرير في مرحلة التسخين $(AK)_{tot,h}$ يُعبَّر عن استطاعة نظام التسخين اللازمة لرفع درجة حرارة السرير درجة مئوية واحدة. كما يُعبَّر معامل انتقال الحرارة الكلي للسرير في مرحلة التبريد $(AK)_{tot,c}$ عن استطاعة نظام التبريد اللازمة لتخفيض درجة حرارة السرير درجة مئوية واحدة.

وُجِدَ أنَّه باستخدام النموذج الأولي لوعاء الادمصاص في دارة التبريد ضمن شروط التشغيل المحددة تمَّ الحصول على استطاعة تبريد ومعامل أداء منخفضين جداً لذلك تمَّ العمل في الفصل التالي على تطوير وعاء الادمصاص من أجل زيادة كفاءته وبالتالي زيادة كفاءة دارة التبريد.

الفصل

الخامس

تطوير سرير الدمصاص

وتقييم التأثير على أداء

دائرة التبريد الدمصاصية

تمّ في هذا الفصل دراسة مجموعة إجراءات لتطوير سرير الادمصاص بهدف رفع كلّ من استطاعة التبريد النوعية ومعامل الأداء للدّارة وهي كالتالي:

- 1- استخدام أنواع مختلفة من الكربون المنشّط (حببي، ليفي، مسحوق) مع وسيط التبريد $R134a$. ثمّ استخدام الأمونيا كوسيط تبريد مع أحد أنواع الكربون المنشّط اللّيفي.
 - 2- استخدام ريشة خارجية متعرّجة بدلاً من الرّيشة المسطّحة.
 - 3- زيادة عدد الرّيش الخارجية على أنابيب المبادل.
 - 4- إضافة ريش داخلية قطريّة ضمن أنابيب المبادل وزيادة عددها.
 - 5- استخدام تقنيّات الاسترجاع الحراري والكتلي.
- تمّت الإجراءات السابقة مع المحافظة على الحجم المخصّص للمادة الادمصاصية ضمن وعاء الادمصاص ثابتاً.

5-1- دراسة تأثير نوع الزوج العامل على أداء دارة التبريد الادمصاصية:

علماً أنّ عدد الرّيش الخارجيّة على أنبوب المبادل $N_{fin,ex} = 50$. الأنابيب غير مرّيشة داخلياً. تمّ استخدام أربعة أنواع من الكربون المنشّط وهي:

الكربون المنشّط الحبيبي ACG .

الكربون المنشّط اللّيفي نوع $ACF - A20$.

الكربون المنشّط اللّيفي نوع $ACF - Busofit ATYM - 055$.

الكربون المنشّط المسحوق (البودرة) نوع $ACP - MaxsorbIII$.

كما استُخدم نوعان من وسائط التبريد $R134a$ و $Ammonia$. وبالتالي نتجت الأزواج الأربعة:

$ACG / R134a$

$ACF - A20 / R134a$

$ACP - MaxsorbIII / R134a$

$ACF - Busofit ATYM 055 / Ammonia$

ويجب تحديد مايلي لكل زوج عامل:

- 1- الخواص الفيزيوجحرارية لكل نوع من أنواع الكربون الأربعة.
- 2- معاملات $(D - A)$ لكل زوج من الأزواج الأربعة.
- 3- النقاط الأربعة الأساسية لكل دورة تبريدية (A, B, D, F) وذلك بعد تمثيل الدّورة الادمصاصية التبريدية لكل زوج على مخطّط $(P - T - x)$ بمساعدة البرنامج الحاسوبي.

أولاً- الزوج العامل $ACG/R 134a$:

يُوضَّح الجدول (1-5) الخواص الفيزيوقحرارية للكربون الحبيبي ACG ، ويُوضَّح الجدول (2-5) معاملات $(D - A)$ للزوج $ACG/R 134a$.

الجدول (1-5): الخواص الفيزيوقحرارية للكربون المنشط ACG .

ρ_{ads}	g/cm^3	0.47	[44]
ϑ_{pore}	cm^3/g	0.472	
ε_{ads}	—	0.222	من العلاقة (21-2)

الجدول (2-5): معاملات $(D - A)$ للزوج $ACG/R 134a$.

n	—	1.725	[44]
ω_o	cm^3/g	0.3728	
E	$kJ/kmol$	8874.9	
D	$1/k^n$	$6 \cdot 10^{-6}$	من العلاقة (16-2)

حساب معامل التوصيل الحراري المكافئ في حالة الكربون المنشط الحبيبي مع وسيط التبريد $R 134a$ من العلاقة (28-2):

$$\lambda_{eff} = 0.2375 [W/m.^\circ C]$$

حيث تمَّ إيجاد λ_v عند درجة الحرارة الوسطية للسَّيرير.

$$\lambda_{ads} = 0.3 [W/m.^\circ C] , \quad \lambda_v = 18.4025 \cdot 10^{-3} [W/m.^\circ C]$$

ثانياً- الزوج العامل $ACF - A20/R 134a$

يُوضَّح الجدول (3-5) الخواص الفيزيوقحرارية للكربون الليفي $ACF - A20$ ، ويُوضَّح الجدول (4-5) معاملات $(D - A)$ للزوج $ACF - A20/R 134a$.

الجدول (3-5) الخواص الفيزيوقحرارية للكربون المنشط $ACF - A20$.

ρ_{ads}	g/cm^3	0.543	من العلاقة (21-2)
ϑ_{pore}	cm^3/g	1.05	[24]
ε_{ads}	—	0.57	[47]

الجدول (4-5): معاملات $(D - A)$ للزوج $ACF - A20/R 134a$.

n	—	1.5	[48]
ω_o	cm^3/g	1.01	
D	$1/k^n$	$3 \cdot 10^{-5}$	

حساب معامل التوصيل الحراري المكافئ في حالة الكربون المنشط الليفي $ACF - A20$ مع وسيط التبريد $R 134a$ ، من العلاقة (28-2):

$$\lambda_{eff} = 0.0888 [W/m.^\circ C]$$

ثالثاً- الزوج العامل $ACP - MaxsorbIII/R 134a$

يوضح الجدول (5-5) الخواص الفيزيوقحرارية للكربون المنشط المسحوق $ACP - MaxsorbIII$ ،

ويوضح الجدول (6-5) معاملات $(D - A)$ للزوج $MaxsorbIII/R 134a$.

الجدول (5-5): الخواص الفيزيوقحرارية للكربون المنشط $MaxsorbIII$.

ρ_{ads}	g/cm^3	0.31	[49]
ϑ_{pore}	cm^3/g	1.7	
ε_{ads}	—	0.527	من العلاقة (21-2)

الجدول (6-5): معاملات $(D - A)$ للزوج $MaxsorbIII/R 134a$

n	—	1.3	[49]
ω_o	cm^3/g	1.649	
E	$kJ/kmol$	8460	
D	$1/k^n$	$1.23 \cdot 10^{-4}$	من العلاقة (16-2)

حساب معامل التوصيل الحراري المكافئ في حالة الكربون المنشط $MaxsorbIII$ مع وسيط التبريد

$R134a$ ، من العلاقة (28-2): $\lambda_{eff} = 0.1516 [W/m.^\circ C]$

رابعاً- الزوج العامل $ACF - Busofit ATYM 055/Ammonia$

يوضح الجدول (7-5) الخواص الفيزيوقحرارية للكربون المنشط الليفي $Busofit ATYM 055$ ،

ويوضح الجدول (8-5) معاملات $(D - A)$ للزوج $Busofit ATYM 055/Ammonia$.

الجدول (7-5): الخواص الفيزيوقحرارية للكربون المنشط $Busofit ATYM 055$.

ρ_{ads}	g/cm^3	0.86	من العلاقة (21-2)
ϑ_{pore}	cm^3/g	0.5	[50]
ε_{ads}	—	0.43	

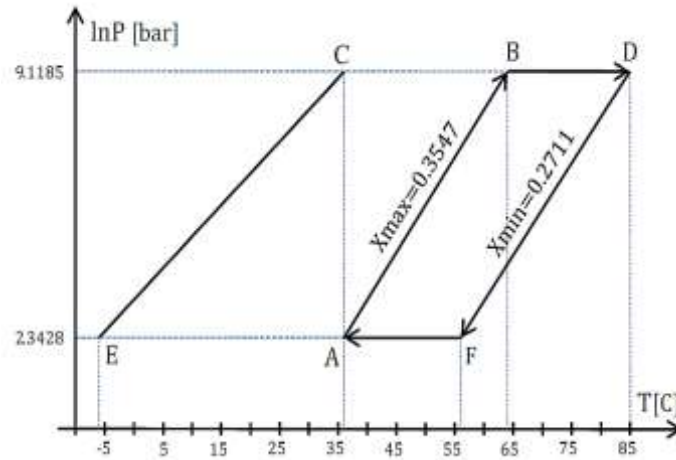
الجدول (8-5): معاملات $(D - A)$ للزوج $Busofit ATYM 055/Ammonia$

n	—	2	[50]
ω_o	cm^3/g	0.491	
β	—	0.309	
E_o	kJ/mol	20.5	
D	$1/k^n$	$1.72 \cdot 10^{-6}$	من العلاقة (16-2)

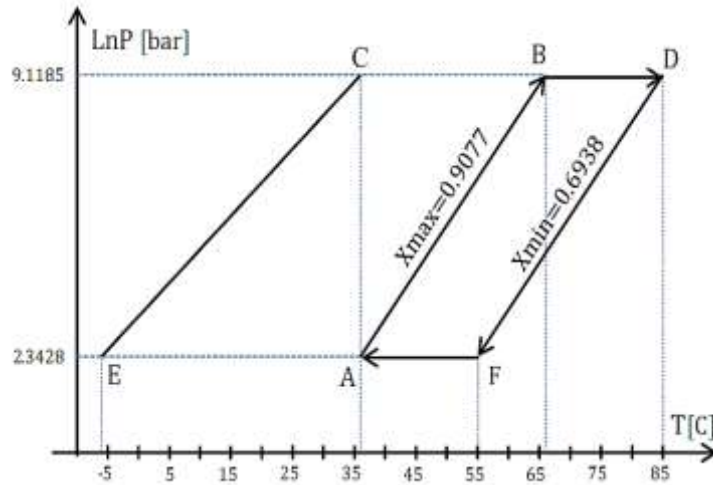
حساب معامل التوصيل الحراري المكافئ في حالة الكربون المنشط الليفي $Busofit ATYM$ مع

وسيط التبريد $Ammonia$ ، من العلاقة (28-2): $\lambda_{eff} = 0.1849 [W/m.^\circ C]$

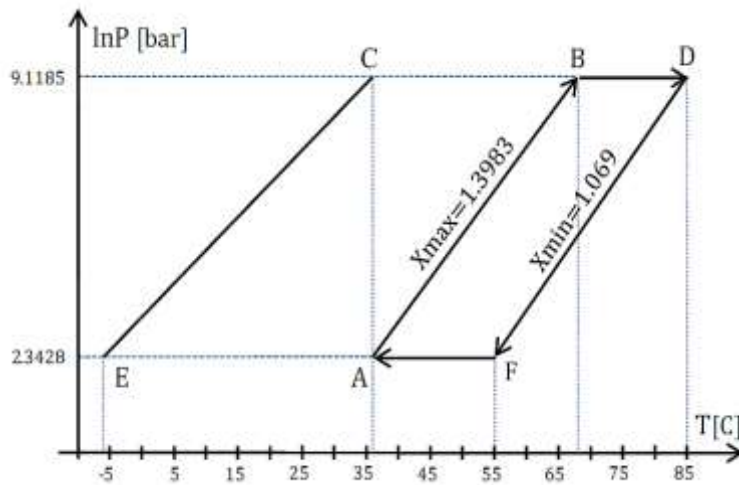
تُبين الأشكال (1-5) و (2-5) و (3-5) و (4-5) تمثيل دورة التبريد للأزواج العاملة الأربعة على مخطط $(\ln P - T - x)$ وتحديد النقاط B و F.



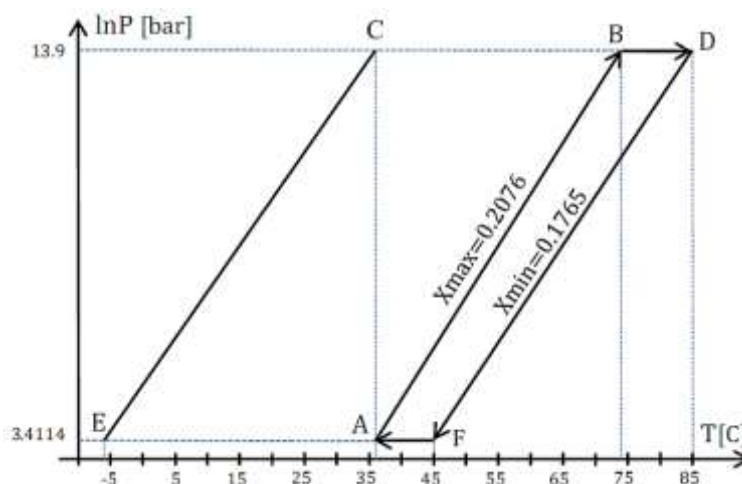
الشكل (1-5) تمثيل دورة التبريد للزوج (ACG/R134a) وتحديد النقاط B و F .



الشكل (2-5) تمثيل دورة التبريد للزوج (ACF - A20 / R 134a) وتحديد النقاط B و F .



الشكل (3-5) تمثيل دورة التبريد للزوج (MaxsorbIII / R 134a) وتحديد النقاط B و F .



الشكل (4-5) تمثيل دورة التبريد للزوج (Busofit ATYM/Ammonia) وتحديد النقاط B و F.

نتيجة تغيير الزوج العامل تتغير بعض بارامترات نقاط الدّورة كما هو مبين في الجدول (9-5) وبالتالي تتغير الحسابات التصميمية الحرارية للدّارة كما هو مبين في الجدول (10-5).

الجدول (9-5): مقارنة التغير في بارامترات الدّورة التبريدية نتيجة تغيير الزوج العامل.

	البارامتر	الوحدة	ACG/R134a	A20/R134a	Maxsorb/R134a	Busofit/ammonia
1	T_{evap}	°C	-6	-6	-6	-6
2	T_{cond}	°C	36	36	36	36
3	T_A	°C	36	36	36	36
4	T_B	°C	64.5	66.5	67.5	74
5	T_D	°C	85	85	85	85
6	T_F	°C	56	55	55	45
7	P_{evap}	bar	2.3428	2.3428	2.3428	3.4114
8	P_{cond}	bar	9.1185	9.1185	9.1185	13.9
9	P_A	bar	9.1185	9.1185	9.1185	13.9
10	P_B	bar	18.6845	19.562	20.012	36.311
11	P_D	bar	29.258	29.258	29.258	46.1
12	P_F	bar	15.282	14.9185	14.9185	17.8315
13	ρ_A	kg/m ³	1163.4	1163.4	1163.4	585.8
14	ρ_B	kg/m ³	1028.4	1017.075	1011.225	518.22
15	ρ_D	kg/m ³	887.2	887.2	887.2	494.5
16	ρ_F	kg/m ³	1073.4	1078.3	1078.3	571.25
17	$h_{l,evap}$	kJ/kg	191.99	191.99	191.99	172.34
18	$h_{v,evap}$	kJ/kg	395.06	395.06	395.06	1455.51
19	$h_{l,cond}$	kJ/kg	250.48	250.48	250.48	370.96
20	$h_{v,cond}$	kJ/kg	417.65	417.65	417.65	1488.7
21	$h_{l,A}$	kJ/kg	250.48	250.48	250.48	370.96
22	$h_{l,B}$	kJ/kg	294.9275	298.29	299.99	566.904
23	$h_{l,D}$	kJ/kg	332.22	332.22	332.22	629.04
24	$h_{l,F}$	kJ/kg	281.06	279.475	279.475	415.48
25	$h_{v,D}$	kJ/kg	467	467	467	1650

الجدول (5-10): مقارنة التغير في الحسابات التصميمية الحرارية للدائرة نتيجة تغيير الزوج العامل.

	البارامتر	الوحدة	ACG/R134a	ACF-A20/R134a	maxsorbIII/R134a	Busofit/ammonia
1	n	–	1.725	1.5	1.3	2
2	D	$1/k^n$	6E-06	3E-05	1.23E-04	1.73E-06
3	ω_o	cm^3/g	0.3728E-03	1.01E-03	1.649E-03	4.910E-04
4	T_B	$^{\circ}C$	64.5	66.5	67.5	74
5	T_F	$^{\circ}C$	56	55	55	45
6	Δh_{evap}	kJ/kg	144.58			1084.55
7	Δh_{cond}	kJ/kg	216.52			1279.04
8	$(r_{evap})_{BD}$	kJ/kg	114.163	112.678	111.913	876.075
9	$h_{ads/des}$	kJ/kg	182.66	180.28	179.06	1401.72
10	x_{max}	kg/kg	0.3548	0.9077	1.3983	0.2076
11	x_{min}	kg/kg	0.2711	0.6938	1.0690	0.1765
12	ΔX	kg/kg	0.0837	0.2139	0.3293	0.0311
13	ρ_{ads}	kg/m^3	470	543	310	860
14	ε_{ads}	–	0.222	0.57	0.527	0.43
15	V_{ads}	cm^3	21831.83	21831.83	21831.83	21831.83
16	M_{ads}	kg	10.261	11.855	6.768	18.775
17	M_{ref}	kg	0.8584	2.5353	2.2288	0.5836
18	Q_{evap}	kJ	124.103	366.561	322.234	632.923
19	Q_{cond}	kJ	185.854	548.954	482.571	746.423
20	M_{ice}	kg	0.288	0.8508	0.748	1.469
21	M_{shell}	kg	4.794			
22	M_{tube}	kg	1.958			
23	$M_{fin,ex}$	kg	1.972			
24	Q_D	kJ	1280.62	2206.19	1824.97	3023.69
25	Q_A	kJ	1220.20	2021.46	1660.67	2884.83
26	Nu	–	409.65			367.83
27	λ_v	$mW/m.^{\circ}C$	18.4025			32.381
28	α_{ex}	$W/m^2.^{\circ}C$	123.057	315.958	292.123	376.592
29	$\eta_{fin,ex}$	–	0.8406	0.6844	0.6998	0.6490
30	η_{ex}	–	0.8656	0.734	0.7469	0.7042
31	λ_{eff}	$W/m.^{\circ}C$	0.2375	0.1395	0.1516	0.1849
32	$(A\alpha)_{int,tot}$	$W/^{\circ}C$	1320.51			
33	$(A\lambda)_{tube,tot}$	$W/^{\circ}C$	245836.86			
34	$(A\alpha)_{ex,tot}$	$W/^{\circ}C$	625.53	1361.88	1281.32	1557.22
35	$(A\lambda)_{ads,tot}$	$W/^{\circ}C$	375.12	220.33	239.45	292.09
36	$(AK)_{tot,h}$	$W/^{\circ}C$	198.97	165.72	174.89	207.16
37	$\Delta t_{1/2cycle}$	min	10.73	22.18	17.39	24.33
38	$\dot{M}_{ref}$	g/sec	1.3337	1.9044	2.1358	0.3998
39	$\dot{Q}_{evap}$	W	192.821	275.342	308.798	433.639
40	$\dot{Q}_{cond}$	W	288.764	412.347	462.449	511.403
41	$\dot{Q}_D$	W	1989.714	1657.188	1748.874	2071.642
42	$\dot{Q}_A$	W	1895.833	1518.417	1591.427	1976.505
43	COP	–	0.0969	0.1662	0.1766	0.2093

	البارامتر	الوحدة	ACG/R134a	ACF-A20/R134a	maxsorbIII/R134a	Busofit/ammonia
44	SCP	W/kg_{ads}	18.79	23.23	45.63	23.10
45	$T_{w,h,2}$	$^{\circ}C$	94.37	94.48	94.45	94.35
46	$T_{w,c,2}$	$^{\circ}C$	26.60	26.48	26.50	26.63
47	$(AK)_{tot,c}$	$W/^{\circ}C$	189.583	151.842	159.143	197.651

5-1-1- تأثير نوع الزوج العامل على كتلة الجليد المنتجة خلال دورة واحدة:

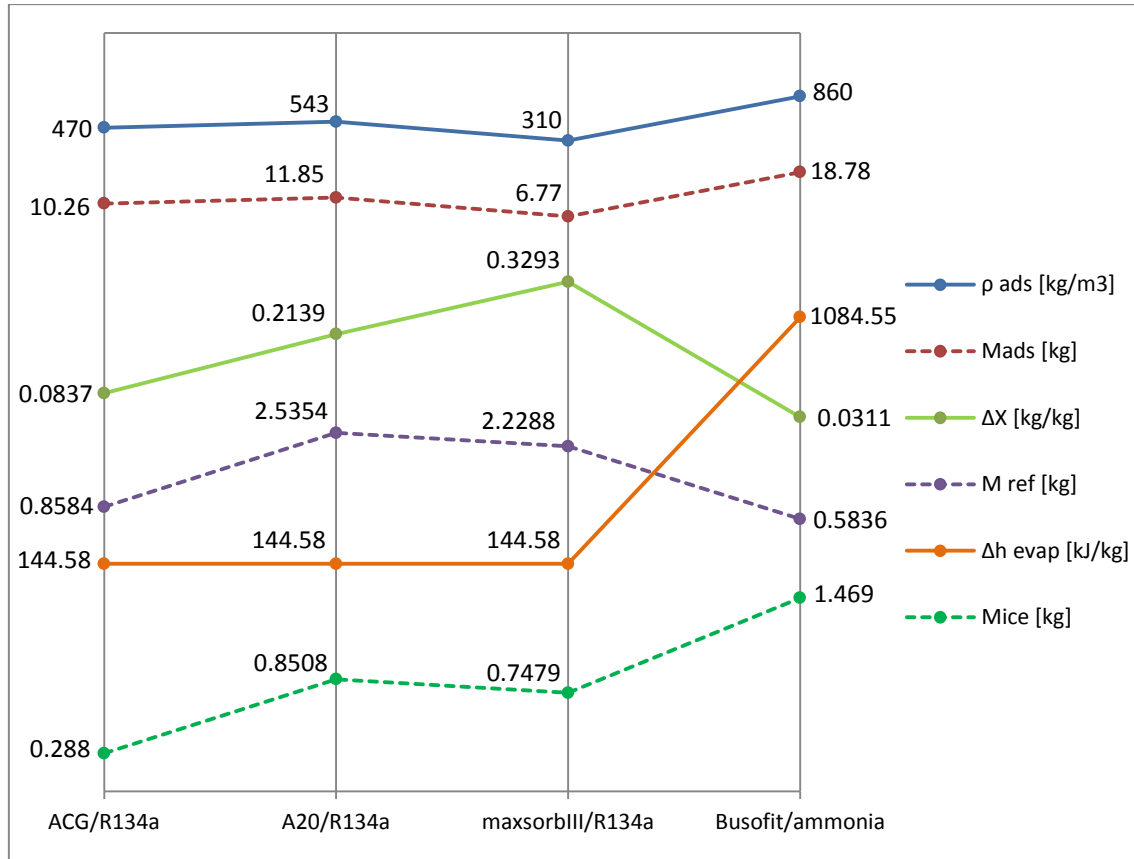
بما أنَّ الحجم المخصَّص للمادة الادمصاصية V_{ads} في وعاء الادمصاص ثابت وبالتالي فإنَّ كثافة الكربون المستخدم ρ_{ads} تُحدَّد كتلة الكربون في الوعاء M_{ads} . وإنَّ تغيُّر تركيز المادة المدمصة في الكتلة الكلية للكربون ضمن المجال الحراري لعمل السرير يُحدَّد كتلة وسيط التبريد العاملة في الدارة M_{ref} . وإنَّ تغيُّر إنتالبي كتلة وسيط التبريد بين مدخل ومخرج المبخر Δh_{evap} يحدد قدرة التبريد أي كتلة الجليد الممكن إنتاجها خلال الدَّورة.

نتيجة ذلك كانت كتلة الجليد المنتجة في دورة واحدة باستخدام الزوج $Busofit / Ammonia$ هي الأعلى ومقدارها 1.469 kg ، يليها الزوج $ACF - A20/R134a$ بكتلة مقدارها 0.851 kg ، يليها الزوج $MaxsorbIII/R134a$ بكتلة مقدارها 0.748 kg ، وأخيراً الزوج $ACG/R134a$ بكتلة مقدارها 0.288 kg فقط. الشكل (5-5) .

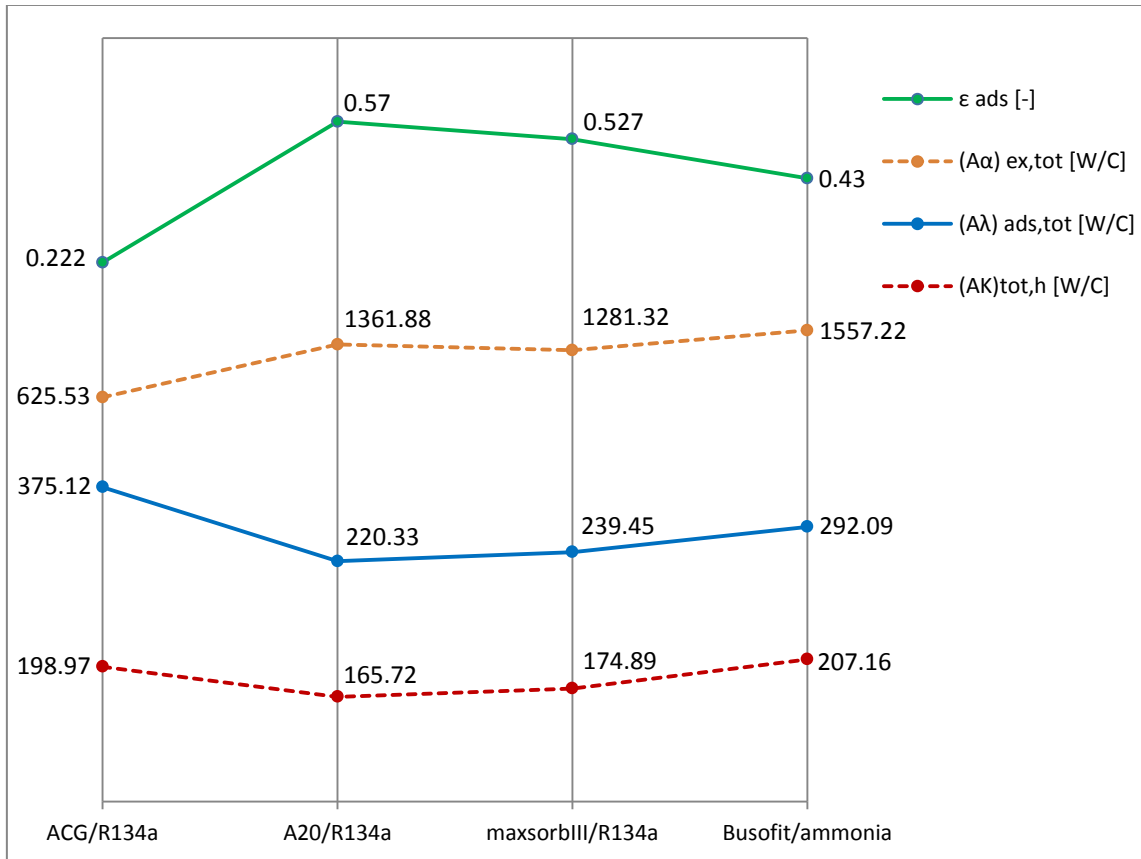
5-1-2- تأثير نوع الزوج العامل على معامل انتقال الحرارة الكلي لسرير الادمصاص:

عند تغيير نوع الكربون المنشَّط مع بقاء وسيط التبريد نفسه $R134a$ ، وُجِد أنَّه كلما زادت مسامية الكربون المنشَّط ε_{ads} انخفض معامل انتقال الحرارة الكلي للسرير $(AK)_{tot,h}$ ، حيث إنَّ الكربون $ACF - A20$ ذا المسامية الأعلى حقَّق معامل انتقال الحرارة الأخفض مقارنةً بالنوعين ACG و $MaxsorbIII$.

وفي حال تغيير وسيط التبريد عندها فإنَّ خواصه الفيزيائية تسهم في تحديد قيمة معامل انتقال الحرارة لوعاء الادمصاص. وُجِدَ أنَّ أعلى معامل انتقال حرارة للسرير تمَّ تحقيقه باستخدام الزوج العامل $Busofit / Ammonia$. الشكل (5-6)



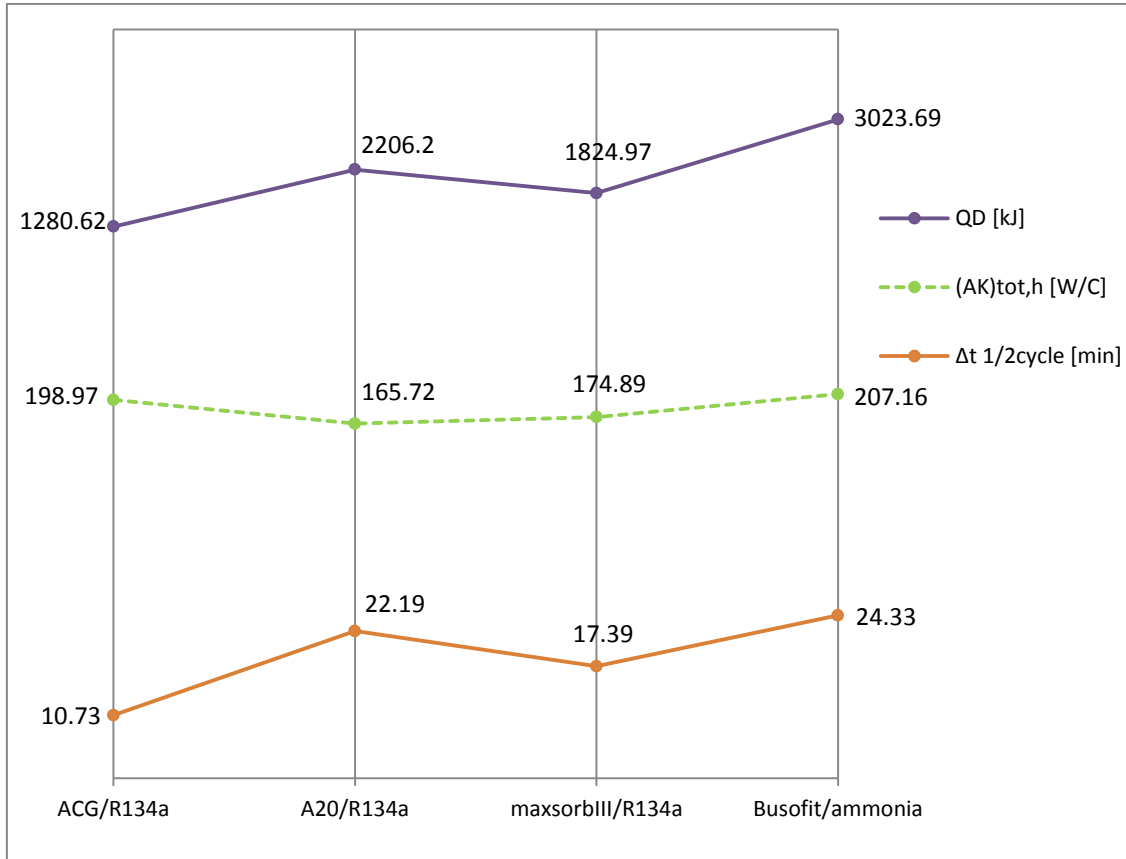
الشكل (5-5) تأثير نوع الزوج العامل على كتلة الجليد المنتجة خلال دورة واحدة.



الشكل (6-5) تأثير نوع الزوج العامل على معامل انتقال الحرارة الكلي لسرير الادمصاص.

5-1-3- تأثير نوع الزوج العامل على زمن نصف الدورة:

إنَّ كميّة الحرارة اللازم تقديمها خلال تسخين السرير Q_D تزداد بازدياد كتلة الكربون في الوعاء، وإنَّ زمن نصف الدورة $\Delta t_{1/2cycle}$ يتناسب طردياً مع Q_D وعكساً مع $(AK)_{tot,h}$ وبالنتيجة وُجِدَ أنَّ زمن نصف الدورة عند استخدام الزوج *Busofit /Ammonia* هو الأطول ويساوي 24.33 min كون كتلة الكربون *Busofit* في الوعاء كانت الأكبر مقارنةً بالأنواع الأخرى. الشكل (5-7)

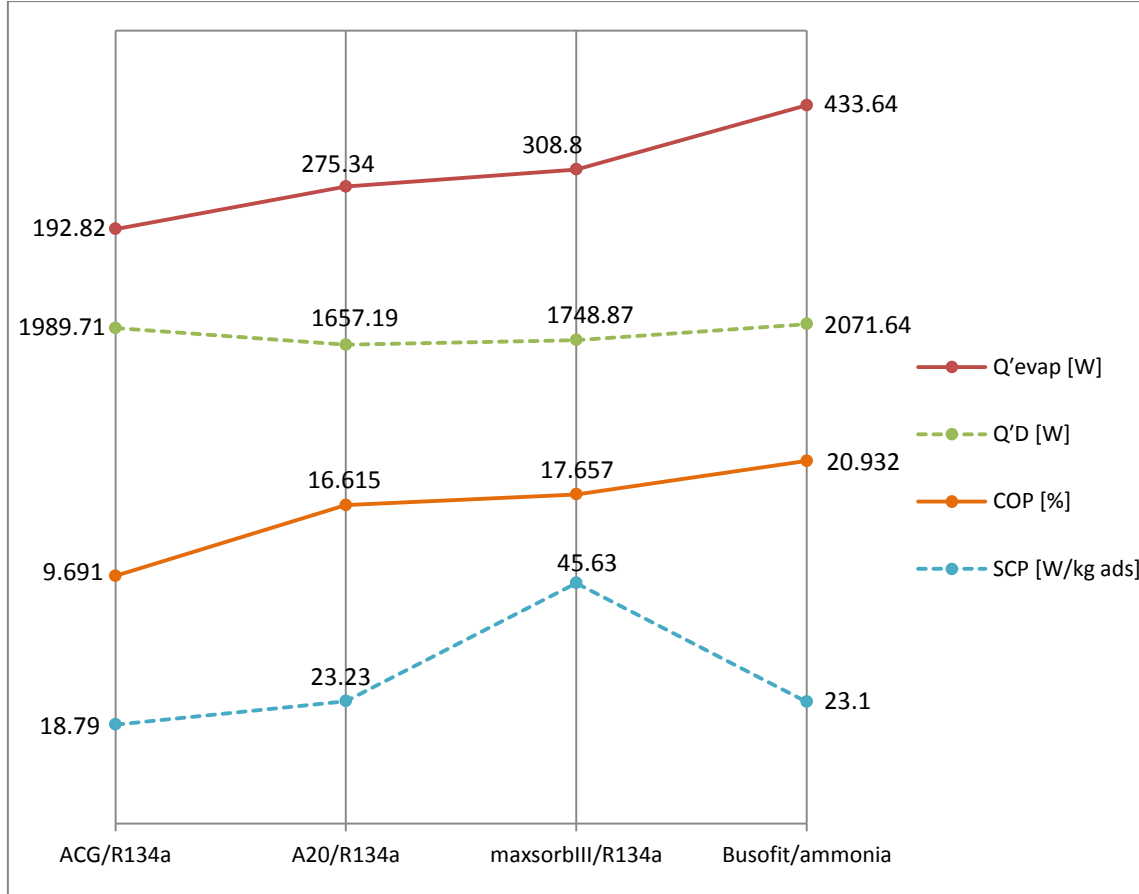


الشكل (5-7) تأثير نوع الزوج العامل على زمن نصف الدورة.

5-1-4- تأثير نوع الزوج العامل على مؤشرات الأداء للدائرة الادمصاصية:

عند استخدام الزوج *Busofit /Ammonia* تمَّ الحصول على أعلى استطاعة تبريد 433.64 W وأعلى معامل أداء 0.02093. مقارنةً بباقي الأزواج، وعليه تمَّ اختيار *Busofit /Ammonia* زوجاً عاملاً في هذه الدارة.

بينما باستخدام الزوج *MaxsorbIII/R134a* كانت كتلة الكربون المستخدمة هي الأقل مقارنةً بباقي الأنواع وبالتالي كانت استطاعة التبريد النوعية هي الأعلى. الشكل (5-8).



الشكل (5-8) تأثير نوع الزوج العامل على مؤشرات الأداء للدورة.

5-2- دراسة تأثير استبدال الريشة الخارجية المسطحة بريشة متعرجة على أداء دورة التبريد الادمصاصية:

علماً أنّ الزوج المستخدم هو *ACF – Busofit /Ammonia*.

عدد الريش الخارجية على أنبوب واحد $N_{fin,ex} = 50$. الأنابيب غير مريشة داخلياً.

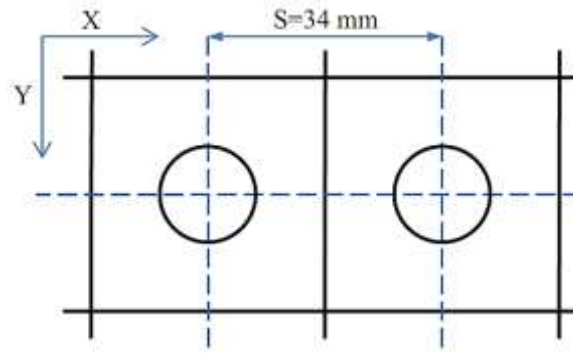
عند استبدال الريشة المسطحة بريشة متعرجة يجب المحافظة على الحجم المخصص للمادة الادمصاصية V_{ads} ، ولأنّ الريشة المتعرجة لها ارتفاع 1 mm لذلك يتم زيادة الارتفاع الداخلي للوعاء بمقدار 2 mm وهو عبارة عن ارتفاع أول وآخر ريشة متعرجة على أنبوب المبادل، وبالتالي يصبح

$$Z_{in} = 468 + 2 = 470\text{ mm}$$

الحسابات:

1- أبعاد الريشة المربعة ذات السطح المستوي الموضحة في الشكل (5-9) هي:

$$X_{fin,ex} = Y_{fin,ex} = \frac{S_{tube}}{2} * 2 = S_{tube} = 34\text{ [mm]} \dots\dots\dots(1-5)$$



الشكل (5-9) توضع الريش الخارجية على أنابيب المبادل.

2- المواصفات الهندسية للريشة المتعرجة الموضحة في الشكل (5-10):

الريشة متعرجة باتجاه X ، وعدد التعرجات $N_{zik} = 12$ ، وارتفاع الزيكزاك $Z_{zik} = 1 [mm]$
أبعاد الريشة المتعرجة بدون فرد = أبعاد الريشة المسطحة:

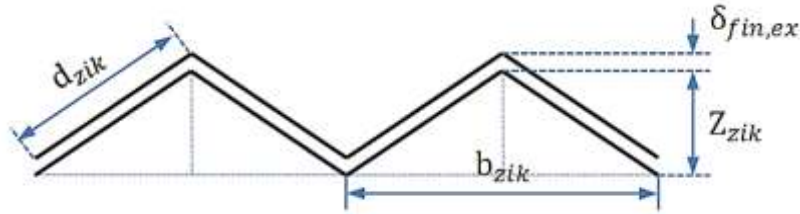
$$X_{fin,ex} = Y_{fin,ex} = 34 [mm] \dots\dots\dots(2-5)$$

بعد قاعدة الزيكزاك الواحد:

$$b_{zik} = \frac{X_{fin,ex}}{N_{zik}} = 2.833 [mm] \dots\dots\dots(3-5)$$

البعد المائل للزيكزاك:

$$d_{zik} = \sqrt{\left(\frac{b_{zik}}{2}\right)^2 + Z_{zik}^2} = 1.734 [mm] \dots\dots\dots(4-5)$$



الشكل (5-10) المواصفات الهندسية للريشة المتعرجة.

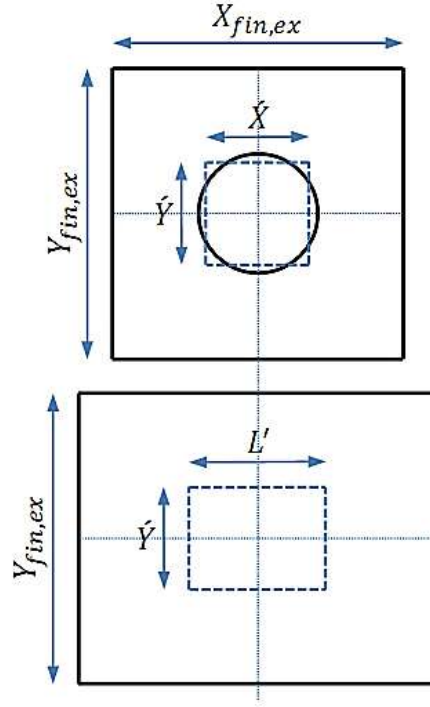
3- حساب مساحة سطح الريشة المتعرجة:

- نُحوّل المقطع الدائري للأنبوب الذي يخترق الريشة المربعة المتعرجة إلى مقطع مربع مكافئ طول ضلعه $\bar{X} = \bar{Y}$ كما هو موضح في الشكل (5-11).

-نفرد الريشة المربعة المتعرجة فتصبح مستطيل طول ضلعه المفرد بالاتجاه X هو $L_{fin,ex}$:

$$L_{fin,ex} = d_{zik} \cdot N_{zik} \cdot 2 = 41.6173 [mm] \dots\dots\dots(5-5)$$

وكذلك المقطع المربع الذي يكافئ مقطع الأنبوب الدائري يصبح مستطيلاً طول ضلعه المفرد باتجاه X هو $\hat{L}$ فيه عدد التعرجات قبل الفرد هي $\hat{N}_{zik}$ كما في الشكل (5-11).



الشكل (5-11) حساب مساحة سطح الريشة المتعرجة.

$$\hat{N}_{zik} = \frac{\hat{X}}{b_{zik}} = 4.254 \quad \dots\dots\dots(6-5)$$

$$\hat{L} = d_{zik} \cdot \hat{N}_{zik} \cdot 2 = 14.753 [mm] \quad \dots\dots\dots(7-5)$$

- حساب مساحة وجه الريشة (بعد إنقاص مساحة المستطيل الناتج عن فرد المربع المكافئ لمقطع الأنبوب).

$$A_{fin,face} = (L_{fin,ex} \cdot Y_{fin,ex}) - (\hat{L} \cdot \hat{Y}) = 1237.175 [mm] \quad \dots\dots\dots(8-5)$$

- حساب مساحة سطح الريشة المتعرجة:

$$A_{fin,face} = 2 A_{fin,face} + 2 \cdot \delta_{fin,ex} (L_{fin,ex} + Y_{fin,ex}) = 2519.72 [mm] \quad \dots\dots\dots(9-5)$$

4- حساب طول الريشة الوسطي L_{avr} والطول المصحح L_c (كون نهاية الريشة ليست أديباتية):

يتم تحويل المقطع المستطيل للريشة إلى مقطع دائري مكافئ بقطر D_f يساوي إلى:

$$D_f = 2 \sqrt{L_{fin,ex} \cdot Y_{fin,ex} / \pi} = 42.446 [mm] \quad \dots\dots\dots(10-5)$$

$$L_{avr} = \frac{D_f - D_{tube,ex}}{2} = 14.423 [mm] \dots\dots\dots(11-5)$$

$$L_C = L_{avr} + \frac{\delta_{fin,ex}}{2} = 14.573 [mm] \dots\dots\dots(12-5)$$

يُبين الجدول (11-5) المواصفات الهندسية للريشة المسطحة والمتعرجة. ويبين الجدول (12-5) مقارنة التغير في المواصفات التصميمية عند استبدال الريشة المسطحة بريشة متعرجة.

الجدول (11-5): المواصفات الهندسية لكل من الريشة المسطحة والمتعرجة.

	البارامتر	الوحدة	ريشة مسطحة	ريشة متعرجة
1	$N_{fin,ex}$	-	50	50
2	$\delta_{fin,ex}$	mm	0.3	0.3
3	$X_{fin,ex}$	mm	34	34
4	$Y_{fin,ex}$	mm	34	34
5	N_{zik}	-	1	12
6	b_{zik}	mm	34	2.8333
7	Z_{zik}	mm	0	1
8	L_{avr}	mm	12.382	14.423
9	L_C	mm	12.532	14.573
10	$b_{fin,ex}$	mm	9	9
11	$V_{fin,ex,1}$	mm ³	303.220	371.153
12	$A_{fin,ex,1}$	mm ²	2062.266	2519.722
13	$A_{b,ex,1}$	mm ²	384.531	384.531

الجدول (12-5): التغير في الحسابات التصميمية عند استبدال الريشة المسطحة بريشة متعرجة

	البارامتر	الوحدة	الريشة الخارجية مسطحة	الريشة الخارجية متعرجة
1	V_{ads}	cm ³	21831.828	
2	M_{ads}	kg	18.775	
3	M_{ref}	kg	0.5836	
4	Q_{evap}	kJ	632.923	
5	Q_{cond}	kJ	746.423	
6	M_{ice}	kg	1.469	
7	Z_t	mm	465	
8	Z_{in}	mm	468	470
9	M_{shell}	kg	4.794	4.810
10	M_{tube}	kg	1.958	1.967
11	$M_{fin,ex}$	kg	1.972	2.414
12	$C_{fin,ex}$	J/°C	1780.844	2179.821
13	A_{ex}	cm ²	58723.115	69702.063
14	$\eta_{fin,ex}$	-	0.6490	0.5858
15	η_{ex}	-	0.7042	0.6406
16	d_{max}	mm	3.718	3.132
17	Q_D	kJ	3023.688	3044.339
18	Q_A	kJ	2884.830	2905.480

	البارامتر	الواحدة	الريشة الخارجية مسطحة	الريشة الخارجية متعرجة
19	$(A\alpha)_{int,tot}$	W/C	1320.510	1326.154
20	$(A\lambda)_{tube,tot}$	W/C	245836.856	246887.440
21	$(A\alpha)_{ex,tot}$	W/°C	1557.223	1681.528
22	$(A\lambda)_{ads,tot}$	W/°C	292.093	411.523
23	$(AK)_{tot,h}$	W/°C	207.164	264.354
24	$\Delta t_{1/2cycle}$	sec	1459.561	1151.614
25	$\Delta t_{1/2cycle}$	min	24.326	19.194
26	$\dot{M}_{ref}$	g/sec	0.3998	0.5068
27	$\dot{Q}_{evap}$	W	433.639	549.596
28	$\dot{Q}_{cond}$	W	511.403	648.154
29	$\dot{Q}_D$	W	2071.642	2643.540
30	$\dot{Q}_A$	W	1976.505	2522.963
31	COP	—	0.2093	0.2079
32	SCP	W/kg _{ads}	23.096	29.272
33	$T_{w,h,2}$	°C	94.35	94.17
34	$T_{w,c,2}$	°C	26.63	26.80
35	$(AK)_{tot,c}$	W/°C	197.651	252.296

5-2-1- تأثير استبدال الريشة الخارجية المسطحة بريشة متعرجة على كتلة الجليد

المنتجة خلال دورة واحدة:

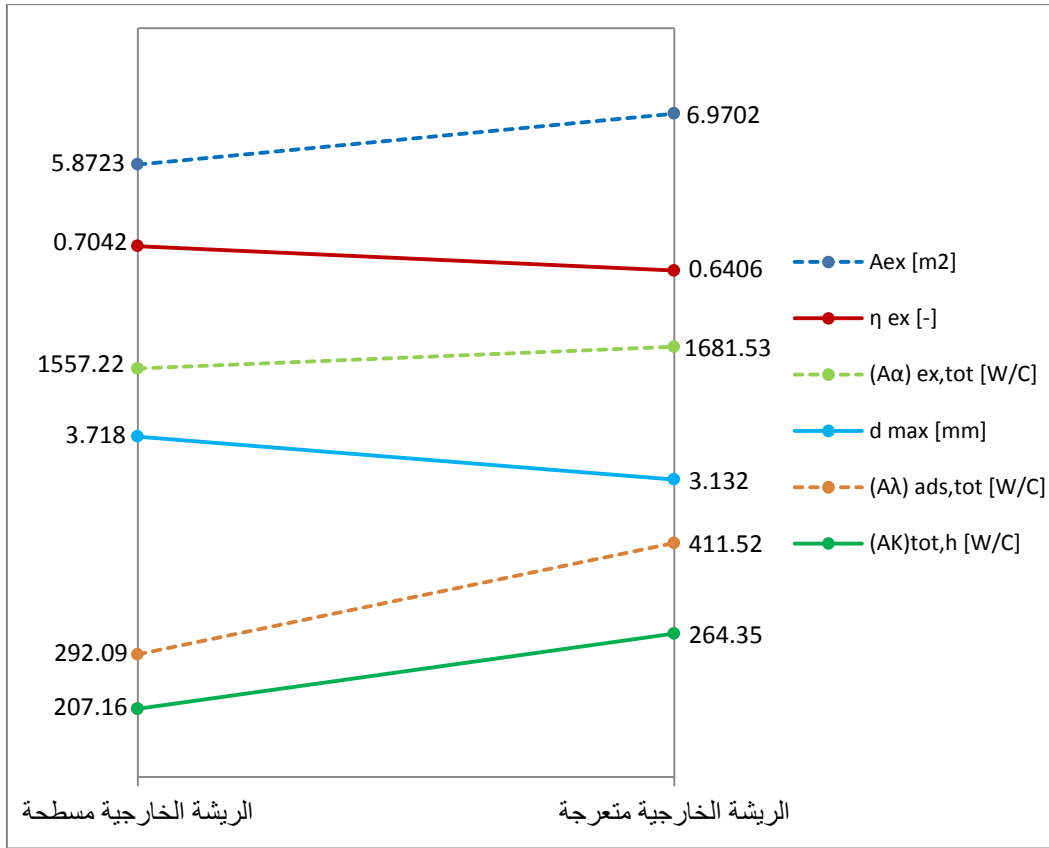
تبقى كتلة الجليد المنتجة خلال الدورة $M_{ice} = 1.469 \text{ kg}$ ثابتة لأن كتلة الكربون *Busofit* في الوعاء ثابتة ووسيط التبريد نفسه (الأمونيا). وينطبق ذلك أيضاً على حالة زيادة عدد الريش الخارجية والداخلية لأنابيب المبادل.

5-2-2- تأثير استبدال الريشة الخارجية المسطحة بريشة متعرجة على معامل انتقال

الحرارة الكلي لسرير الادمصاص:

إن الانتقال إلى ريشة متعرجة يؤدي إلى ازدياد طول الريشة وبالتالي ينقص مردودها $\eta_{fin,ex}$ وكذلك مردود السطح الخارجي للمبادل η_{ex} وبالمقابل تزداد مساحة السطح الخارجي للمبادل A_{ex} بشكل كبير وبالتالي يزداد $(A\alpha)_{ex,tot}$.

وإن ازدياد مساحة انتشار الكربون على سطح المبادل يؤدي إلى نقصان مسافة التوصيل الحراري من سطح المبادل إلى أبعد نقطة في الكربون المنشط d_{ads} ، وبالتالي يزداد $(A\lambda)_{ads,tot}$. وبالنتيجة زاد معامل انتقال الحرارة للسرير $(AK)_{tot,h}$ إلى 264.354 W/°C الشكل (5-12).



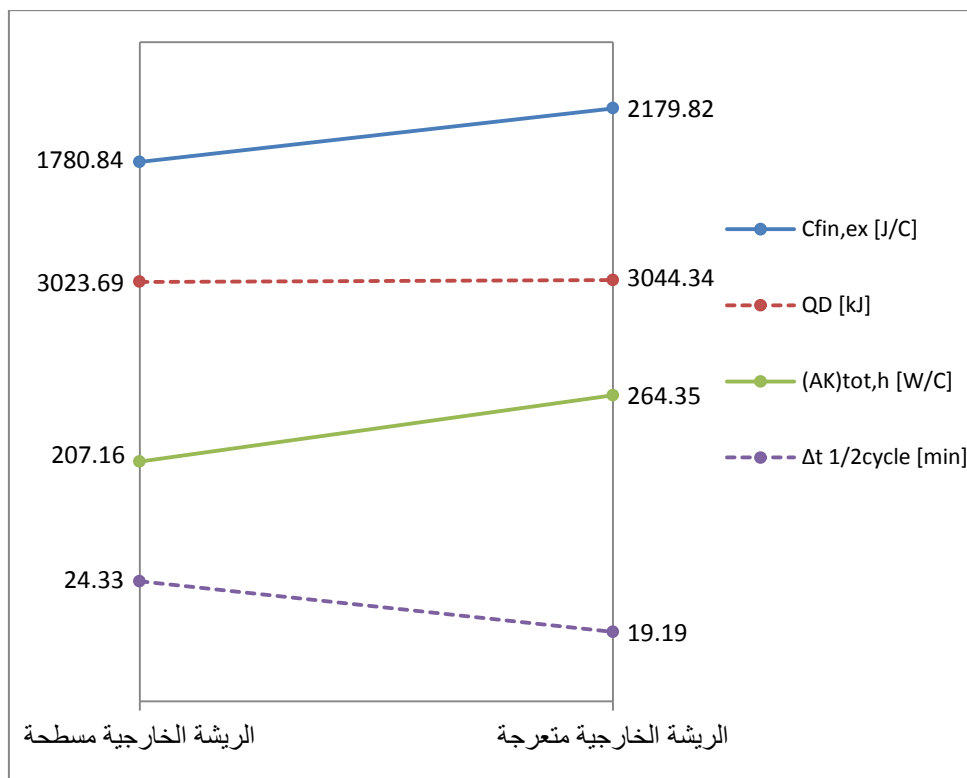
الشكل (5-12) تأثير تغيير الزيشة الخارجية من مسطحة إلى متعرجة على معامل انتقال الحرارة للسرير.

5-2-3- تأثير استبدال الزيشة الخارجية المسطحة بريشة متعرجة على زمن الدورة:

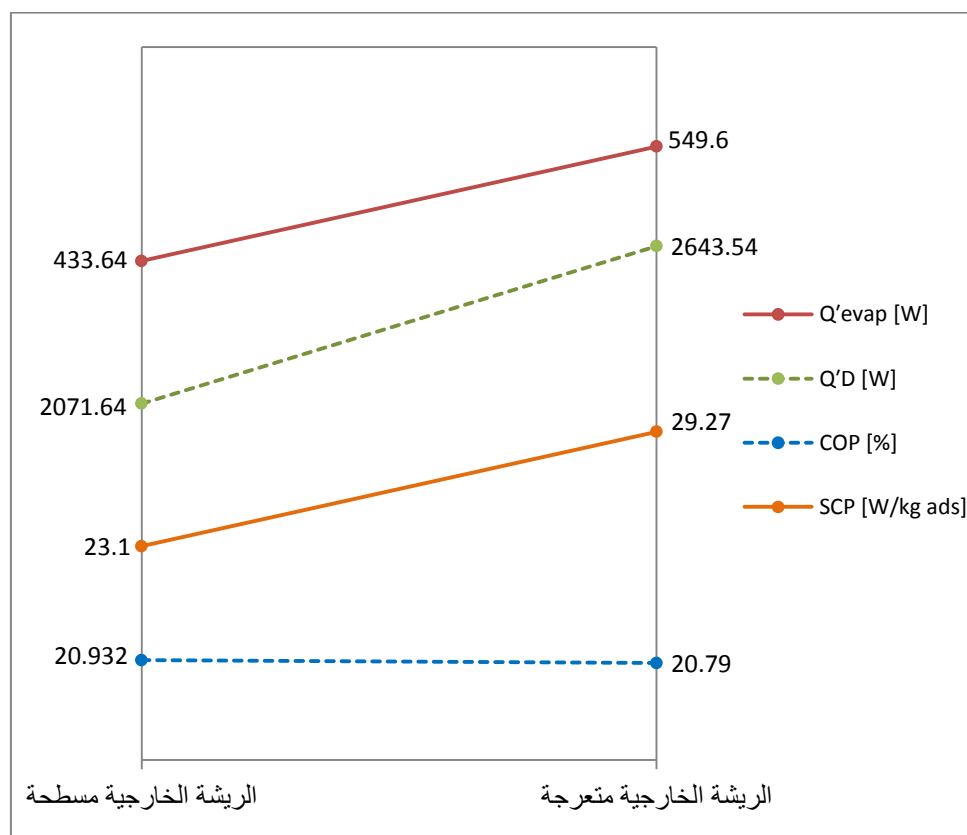
عند استخدام ريشة متعرجة بدلاً من مسطحة تزداد الكتلة الكلية للريش الخارجية $M_{fin,ex}$ وبالتالي تزداد الحرارة المقدّمة للسرير خلال مرحلة التسخين Q_D بشكل طفيف، لكن $(AK)_{tot,h}$ يزداد بشكل كبير وبالتالي ينقص زمن نصف الدورة $\Delta t_{1/2cycle}$ من 24.33 min إلى 19.19 min أي بمقدار 5.14 min . الشكل (5-13).

5-2-4- تأثير استبدال الزيشة الخارجية المسطحة بريشة متعرجة على مؤشرات الأداء للدّارة الادمصاصية:

زادت استطاعة التبريد $\dot{Q}_{evap}$ من 433.64 W إلى 549.6 W أي بنسبة 26.7% .
 زادت استطاعة التسخين $\dot{Q}_D$ بنسبة 27.6% .
 نقص معامل الأداء COP من 0.2093 إلى 0.2079 أي بنسبة -0.68% (بمقدار -0.0014). الشكل (5-14).



الشكل (5-13) تأثير تغيير الريشة الخارجية من مسطحة إلى متعرجة على زمن نصف الدورة.



الشكل (5-14) تأثير تغيير الريشة الخارجية من مسطحة إلى متعرجة على مؤشرات الأداء للدورة.

5-3- دراسة تأثير زيادة عدد الريش الخارجية للمبادل على أداء دارة التبريد الادمصاصية:

علماً أنَّ الزوج المستخدم هو $ACF - Busofit / Ammonia$.
وأنَّ الريش الخارجية للمبادل الحراري متعرّجة بالمواصفات المذكورة سابقاً.
تمَّ إجراء الحسابات التصميمية للدارة بزيادة عدد الريش الخارجية على الأنبوب الواحد من 50 إلى 150 ريشة، مع المحافظة على حجم المادة الادمصاصية V_{ads} ، وبالتالي يزداد الارتفاع الداخلي لوعاء الادمصاص Z_t بمقدار الارتفاع الكلي للريش الخارجية المضافة وكذلك يزداد طول أنابيب المبادل بالمقدار نفسه.

مثلاً: تمَّ إضافة 50 ريشة خارجية لكل أنبوب من أنابيب المبادل.
عدد الريش الخارجية الكلي على الأنبوب الواحد هو $N_{fin,ex} = 50 + 50 = 100$
الارتفاع الكلي للريش المضافة فقط $(N \cdot \delta)_{fin,ex} = 50 * 0.3 = 15 \text{ mm}$
يصبح الارتفاع الداخلي لوعاء الادمصاص $Z_t = 465 + 15 = 480 \text{ mm}$
تصبح خطوة الترييش الخارجي $S_{fin,ex} = \frac{Z_t}{N_{fin,ex}} = 4.8 \text{ mm}$
والمسافة بين ريشتين متتاليتين $b_{fin,ex} = S_{fin,ex} - \delta_{fin,ex} = 4.4 \text{ mm}$
وعندما تصبح المسافة بين ريشتين متتاليتين $b_{fin,ex} \approx 3 \text{ mm}$ يتم التوقف عن زيادة الريش الخارجية، وتحقّق ذلك عند $N_{fin,ex} = 150$.
يُبيّن الجدول (5-13) التغيّر في المواصفات التصميمية (الهندسية والحرارية) بزيادة عدد الريش الخارجية.

الجدول (5-13): التغيّر في الحسابات التصميمية عند زيادة عدد الريش الخارجية.

	البارامتر	الوحدة	50	100	150
	$N_{fin,ex}$	—	50	100	150
1	V_{ads}	cm^3	21831.83		
2	M_{ads}	kg	18.775		
3	M_{ref}	kg	0.5836		
4	Q_{evap}	kJ	632.923		
5	Q_{cond}	kJ	746.423		
6	M_{ice}	kg	1.469		
7	$(N \cdot \delta)_{fin,ex}$	mm	15	30	45
8	Z_t	mm	465	480	495

	البارامتر	الواحدة			
	$N_{fin,ex}$	—	50	100	150
9	$S_{fin,ex}$	mm	9.3	4.8	3.3
10	$b_{fin,ex}$	mm	9	4.5	3
11	Z_{in}	mm	470	485	500
12	M_{shell}	kg	4.81	4.932	5.053
13	M_{tube}	kg	1.967	2.03	2.092
14	$M_{fin,ex}$	kg	2.414	4.828	7.242
15	C_{tot}	kJ/°C	25.274	27.622	29.971
16	Q_D	KJ	3044.339	3159.406	3274.473
17	Q_A	KJ	2905.480	3020.548	3135.615
18	A_{int}	cm ²	8504.92	8776.353	9047.787
19	A_{ex}	cm ²	69702.064	130175.384	190648.705
20	η_{ex}	—	0.6406	0.6151	0.6058
21	d_{ads}	mm	3.132	1.677	1.145
22	$(A\alpha)_{in,tot}$	W/°C	1326.154	1368.478	1410.802
23	$(A\lambda)_{tube,tot}$	W/°C	246887.44	254766.83	262646.21
24	$(A\alpha)_{ex,tot}$	W/°C	1681.53	3015.51	4349.50
25	$(A\lambda)_{ads,tot}$	W/°C	411.523	1435.359	3078.722
26	$(AK)_{tot,h}$	W/°C	264.354	567.224	789.05
27	$\Delta t_{1/2cycle}$	sec	1151.61	556.99	414.99
28	$\Delta t_{1/2cycle}$	min	19.19	9.28	6.92
29	$\dot{M}_{ref}$	g/sec	0.5068	1.0477	1.4063
30	$\dot{Q}_{evap}$	W	549.596	1136.317	1525.155
31	$\dot{Q}_{cond}$	W	648.154	1340.091	1798.658
32	$\dot{Q}_D$	W	2643.54	5672.24	7890.50
33	$\dot{Q}_A$	W	2522.96	5422.94	7555.90
34	COP	—	0.2079	0.2003	0.1933
35	SCP	W/kg _{ads}	29.27	60.52	81.23
36	$T_{w,h,2}$	°C	94.17	93.22	92.52
37	$T_{w,c,2}$	°C	26.80	27.72	28.40
38	$(AK)_{tot,c}$	W/°C	252.296	542.294	755.590

5-3-1- تأثير زيادة عدد الريش الخارجية على معامل انتقال الحرارة الكلي لسرير

الادمصاص:

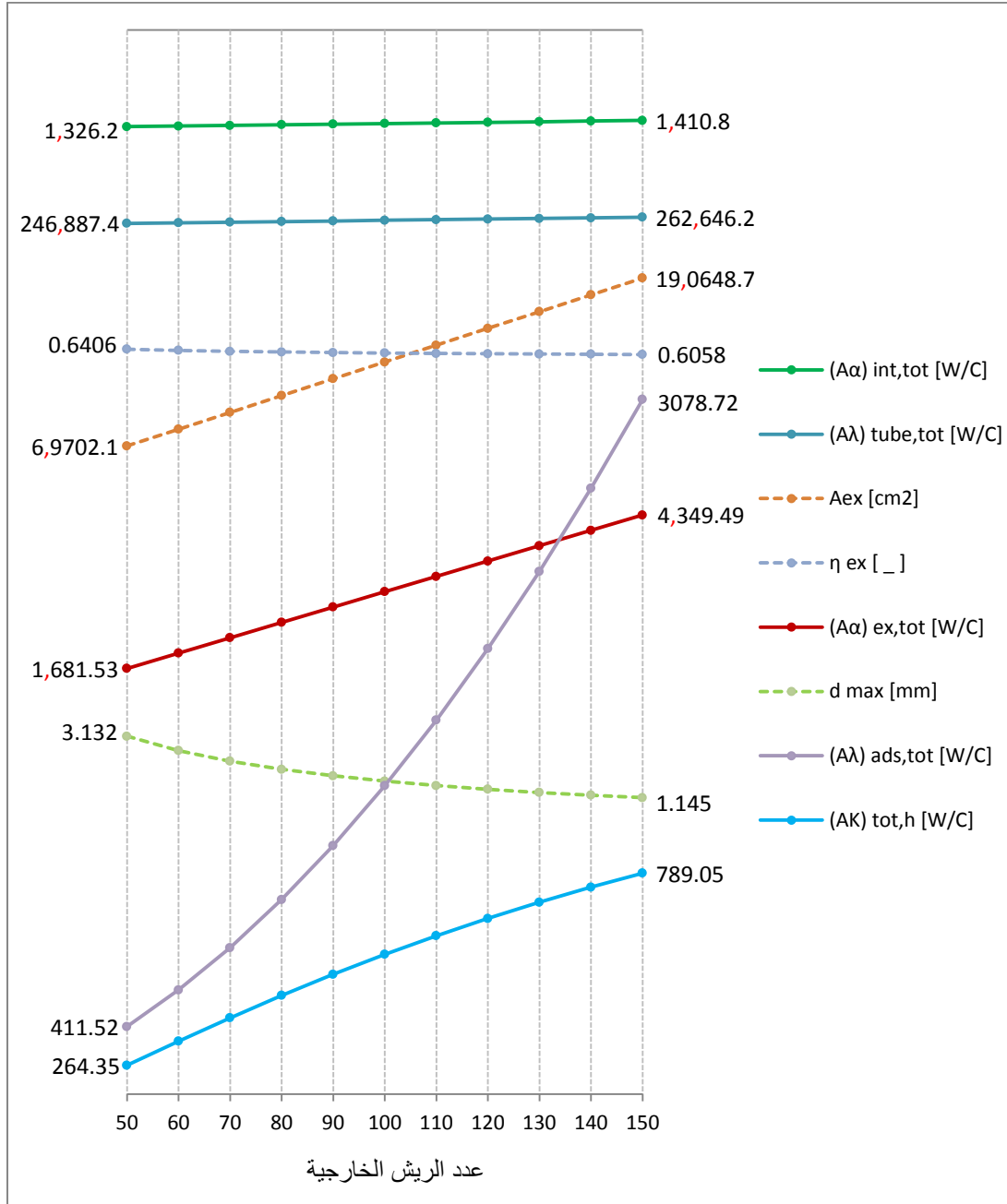
إنَّ زيادة عدد الريش الخارجية أدَّى إلى ما يلي:

– زيادة طول أنابيب المبادل ضمن الوعاء بمقدار الارتفاع الكلي نفسه للريش المضافة، وهذا أدَّى إلى زيادة مساحة السطح الداخلي للأنابيب في الوعاء A_{int} وبالتالي زاد $(A\alpha)_{in,tot}$ و $(A\lambda)_{tube,tot}$ بمقدار صغير.

– زيادة المساحة الخارجية للمبادل A_{ex} وبالتالي زاد $(A\alpha)_{ex,tot}$.

- زيادة مساحة سطح انتشار الكربون المنشط على سطح المبادل A_{ex} أدى إلى نقصان مسافة التوصيل الحراري من سطح المبادل إلى أبعد نقطة في الكربون d_{ads} ، ما أدى إلى زيادة كبيرة في $(A\lambda)_{ads,tot}$.

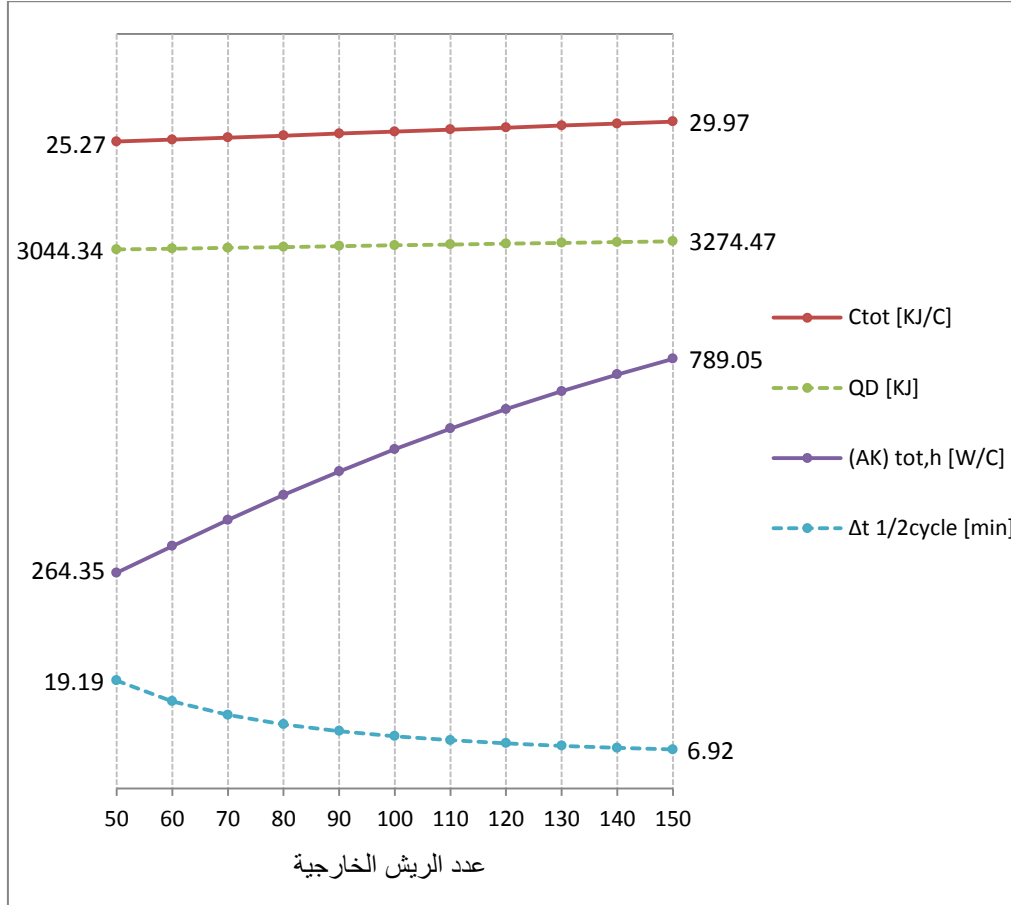
وبالتالي عند زيادة عدد الريش الخارجية على الأنبوب الواحد من 50 إلى 150 زاد معامل انتقال الحرارة للوعاء $(AK)_{tot,h}$ إلى $789.1 \text{ W/}^\circ\text{C}$. الشكل (5-15).



الشكل (5-15) تأثير زيادة عدد الريش الخارجية على معامل انتقال الحرارة الكلي للسريـر.

5-3-2- تأثير زيادة عدد الريش الخارجية على زمن نصف الدورة:

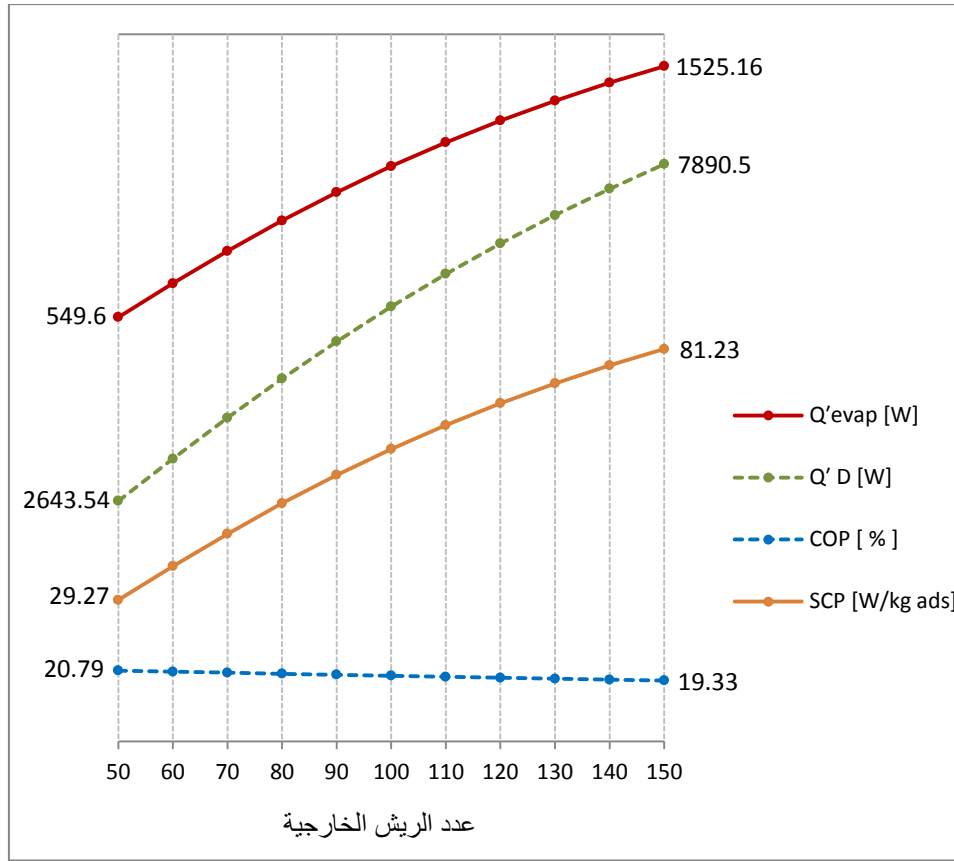
إنَّ زيادة عدد الريش الخارجية أدَّى إلى زيادة الكتلة الحرارية للوعاء وبالنسبة زادت كمية الحرارة المقدَّمة للسرير خلال مرحلة التسخين Q_D . وإنَّ مقدار الزيادة في $(AK)_{tot,h}$ أكبر من مقدار الزيادة في Q_D وبالتالي نقص $\Delta t_{1/2cycle}$ من 19.19 إلى 6.92 أي بمقدار 12.27 min. الشكل (5-16).



الشكل (5-16) تأثير زيادة عدد الريش الخارجية على زمن نصف الدورة.

5-3-3- تأثير زيادة الريش الخارجية على مؤشرات الأداء للدورة الادمصاصية:

عند زيادة عدد الريش الخارجية على أنبوب المبادل من 50 إلى 150 ريشة نتج مايلي:
 زادت استطاعة التبريد $\dot{Q}_{evap}$ من 549.6 W إلى 1525.16 W أي بنسبة 177.5% .
 زادت استطاعة التسخين $\dot{Q}_D$ بنسبة 198.5% .
 نقص معامل أداء الدارة COP من 0.2079 إلى 0.1933 أي بنسبة 7% (بمقدار -0.0146).
 الشكل (5-17) .



الشكل (5-17) تأثير زيادة عدد الريش الخارجية على مؤشرات الأداء للدورة.

5-4- دراسة تأثير إضافة ريش نصف قطريّة ضمن أنابيب المبادل وزيادة عددها على أداء دورة التبريد الادمصاصية:

- علماً أنّ الزوج المستخدم هو $ACF - Busofit / Ammonia$.
- عدد الريش الخارجية المتعرّجة 150 ريشة على الأنبوب الواحد.
- إنّ إضافة ريش قطريّة داخل أنابيب المبادل لا تؤثر على أبعاد الوعاء وبالتالي يبقى V_{ads} ثابتاً.
- مواصفات الريشة القطريّة المضافة:

$$\delta_{fin,rad} = 0.6 \text{ mm} \text{ سماكتها}$$

$$Z_{in} = 500 \text{ mm} \text{ طول الريشة النصف قطريّة = طول أنابيب المبادل ضمن الوعاء}$$

$$N_{fin,rad} = 0, 2, 3, 4, \dots, 12 \text{ يتم زيادة عدد الريش النصف قطريّة على النحو التالي:}$$

الحسابات التصميميّة: عند إضافة عدد من الريش النصف قطريّة $N_{fin,rad}$ داخل الأنبوب واعتماداً على الشكل (5-18) الذي يوضّح مقطعاً عرضياً في أنبوب المبادل يتم حساب مايلي:

حساب مقطع الجريان للأنبوب الواحد:

$$A_{sec} = \frac{\pi D_{tube.in}^2}{4} - \frac{D_{tube.in}}{2} \delta_{fin,rad} \cdot N_{fin,rad} \dots\dots\dots(13-5)$$

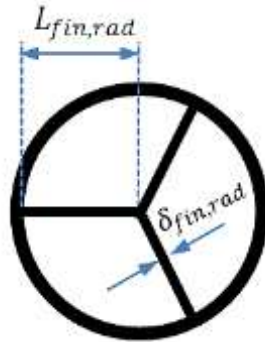
حساب الطول المبطل للريشة النصف قطرية:

$$L_{wet} = L_{fin,rad} = \frac{D_{tube.in}}{2} - \delta_{fin,rad} \dots\dots\dots(14-5)$$

حساب المحيط المبطل للأنبوب:

$$U_{wet} = (\pi D_{tube.in}) - (\delta_{fin,rad} \cdot N_{fin,rad}) + (2 \cdot L_{fin,rad} \cdot N_{fin,rad}) \dots\dots\dots(15-5)$$

$$D_h = \frac{4 A_{sec}}{U_{wet}} \dots\dots\dots(31-4) \text{ من العلاقة } D_h \text{ للأنبوب الهيدروليكي}$$



الشكل (5-18) مقطع عرضي في أنبوب مريش داخلياً.

- حساب Re وتحديد نوع الجريان، وما إذا كان Re أكبر أو أصغر من 3000 وعلى أساس ذلك يتم حساب f و ΔP و Pr و Nu وأخيراً α_{int} وذلك وفق العلاقات من (4-30) حتى (4-39).

- حساب مردود الريشة النصف قطرية:

$$\eta_{fin,rad} = \frac{\tanh(mL)}{mL} = \frac{\tanh(mL_{fin,rad})}{mL_{fin,rad}} \dots\dots\dots(16-5)$$

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\delta \cdot \lambda}} = \sqrt{\frac{2\alpha_{int}}{\delta_{fin,rad} \cdot \lambda_{fin,rad}}} \dots\dots\dots(17-5)$$

$$\tanh(mL) = \frac{e^{2mL} - 1}{e^{2mL} + 1} \dots\dots\dots(18-5)$$

- حساب مردود السطح الداخلي للأنبوب المريش:

$$\eta_{int} = 1 - \left[\frac{N_{fin,rad} \cdot A_{fin,rad}}{A_{int}} (1 - \eta_{fin,rad}) \right] \dots\dots\dots(19-5)$$

$N_{fin,rad} \cdot A_{fin,rad}$ المساحة الكلية لسطح الريش ضمن الأنبوب الواحد.

A_{int} مساحة السطح الداخلي للأنبوب.

- حساب معامل انتقال الحرارة الكلي بالحمل من السطح الداخلي لأنابيب المبادل في الوعاء الواحد

$$(A\alpha)_{int,tot} = \eta_{int} \cdot A_{int,1} \cdot N_{tube,tot} \cdot \alpha_{int} \dots\dots\dots(50-4)$$

يُبين الجدول (5-14) التغير في الحسابات التصميمية عند إضافة ريش نصف قطرية داخل الأنابيب.

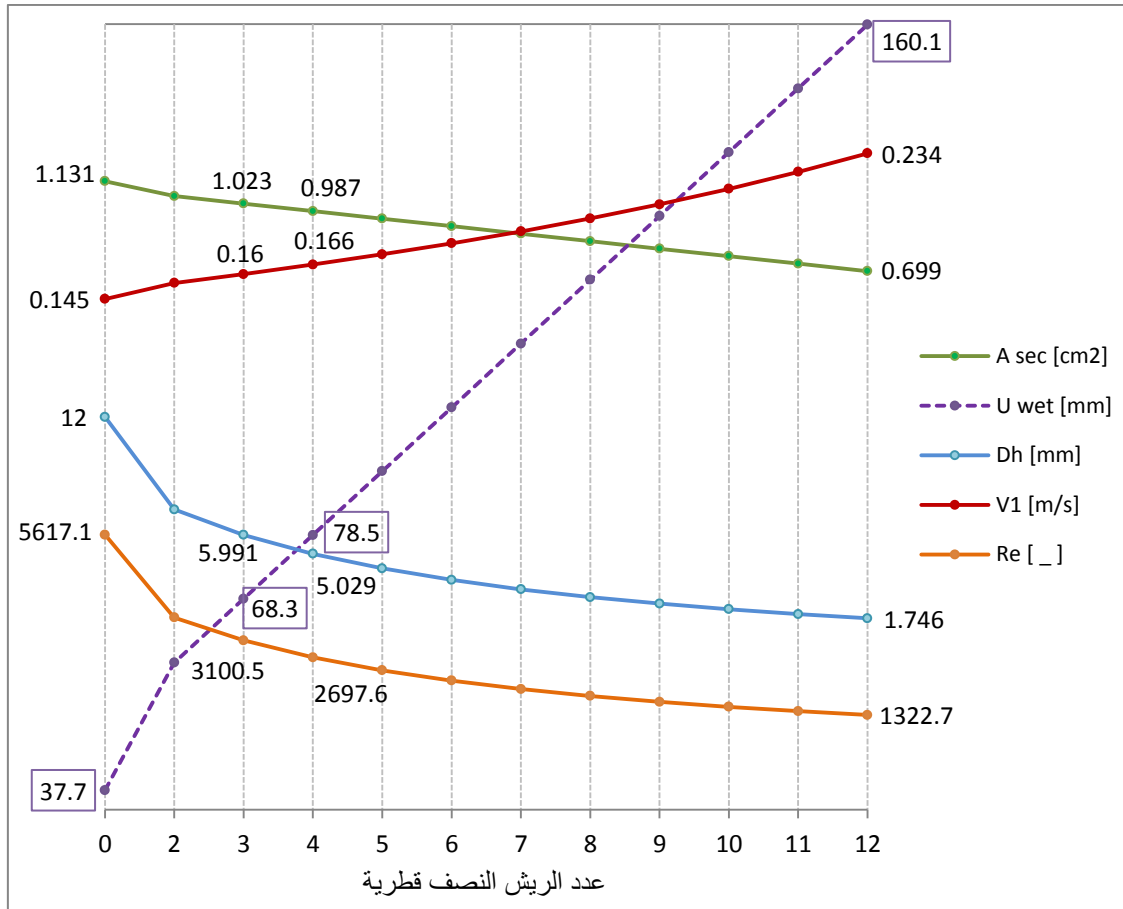
الجدول (5-14): التغير في الحسابات التصميمية عند إضافة ريش نصف قطرية داخل أنابيب المبادل.

	البارامتر	الواحدة				
	$N_{fin,rad}$	—	0	3	4	12
1	V_{ads}	cm^3	21831.828			
2	M_{ads}	kg	18.775			
3	M_{ref}	kg	0.5836			
4	Q_{evap}	kJ	632.923			
5	Q_{cond}	kJ	746.423			
6	M_{ice}	kg	1.469			
7	M_{shell}	kg	5.053			
8	M_{tube}	kg	2.092			
9	$M_{fin,ex}$	kg	7.242			
10	$M_{fin,rad}$	kg	0	0.702	0.937	2.810
11	$C_{fin,rad}$	$J/^\circ C$	0	634.296	845.728	2537.184
12	A_{sec}	cm^2	1.131	1.023	0.987	0.699
13	L_{wet}	mm	5.4			
14	U_{wet}	mm	37.699	68.299	78.499	160.099
15	D_h	mm	12	5.991	5.029	1.746
16	V_1	m/s	0.1447	0.1600	0.1658	0.2341
17	Re	—	5617.10	3100.48	2697.61	1322.68
18	f	—	0.00932	0.01126	0.00593	0.01210
19	ΔP	pa	15.629	46.269	31.179	365.123
20	Nu	—	27.626	14.750	6.837	3.789
21	α_{int}	$W/m^2 \cdot C$	1559.28	1667.47	920.76	1469.66
22	$\eta_{fin,rad}$	—	0.8186	0.8088	0.8824	0.8268
23	A_{int}	cm^2	9047.79	16391.79	18839.79	38423.79
24	η_{int}	—	1	0.9093	0.9353	0.8598
25	Q_D	KJ	3274.47	3305.55	3315.91	3398.79
26	Q_A	KJ	3135.61	3166.70	3177.06	3259.94
27	$(A\alpha)_{in,tot}$	$W/^\circ C$	1410.80	2485.41	1622.45	4855.37
28	$(A\lambda)_{tube,tot}$	$W/^\circ C$	262646.21			
29	$(A\alpha)_{ex,tot}$	$W/^\circ C$	4349.49			
30	$(A\lambda)_{ads,tot}$	$W/^\circ C$	3078.72			
31	$(AK)_{tot,h}$	$W/^\circ C$	789.05	1040.72	851.15	1308.07
32	$\Delta t_{1/2cycle}$	sec	414.99	317.62	389.58	259.83
33	$\Delta t_{1/2cycle}$	min	6.92	5.29	6.49	4.33
34	$\dot{M}_{ref}$	g/sec	1.4063	1.8373	1.4980	2.2460
35	$\dot{Q}_{evap}$	W	1525.16	1992.68	1624.62	2435.88
36	$\dot{Q}_{cond}$	W	1798.66	2350.03	1915.96	2872.70

	البارامتر	الواحدة	0	3	4	12
	$N_{fin,rad}$	—	0	3	4	12
37	$\dot{Q}_D$	W	7890.50	10407.15	8511.49	13080.67
38	$\dot{Q}_A$	W	7555.90	9969.97	8155.06	12546.26
39	COP	—	0.1933	0.1915	0.1909	0.1862
40	SCP	W/kg _{ads}	81.23	106.13	86.53	129.74
41	$T_{w,h,2}$	°C	92.52	91.73	92.32	90.89
42	$T_{w,c,2}$	°C	28.39	29.16	28.58	29.97
43	$(AK)_{tot,c}$	W/°C	755.59	997.00	815.51	1254.63

5-4-1- تأثير زيادة عدد الريش النصف قطرية على نوع الجريان لسائل نقل الحرارة (الماء) ضمن أنابيب المبادل:

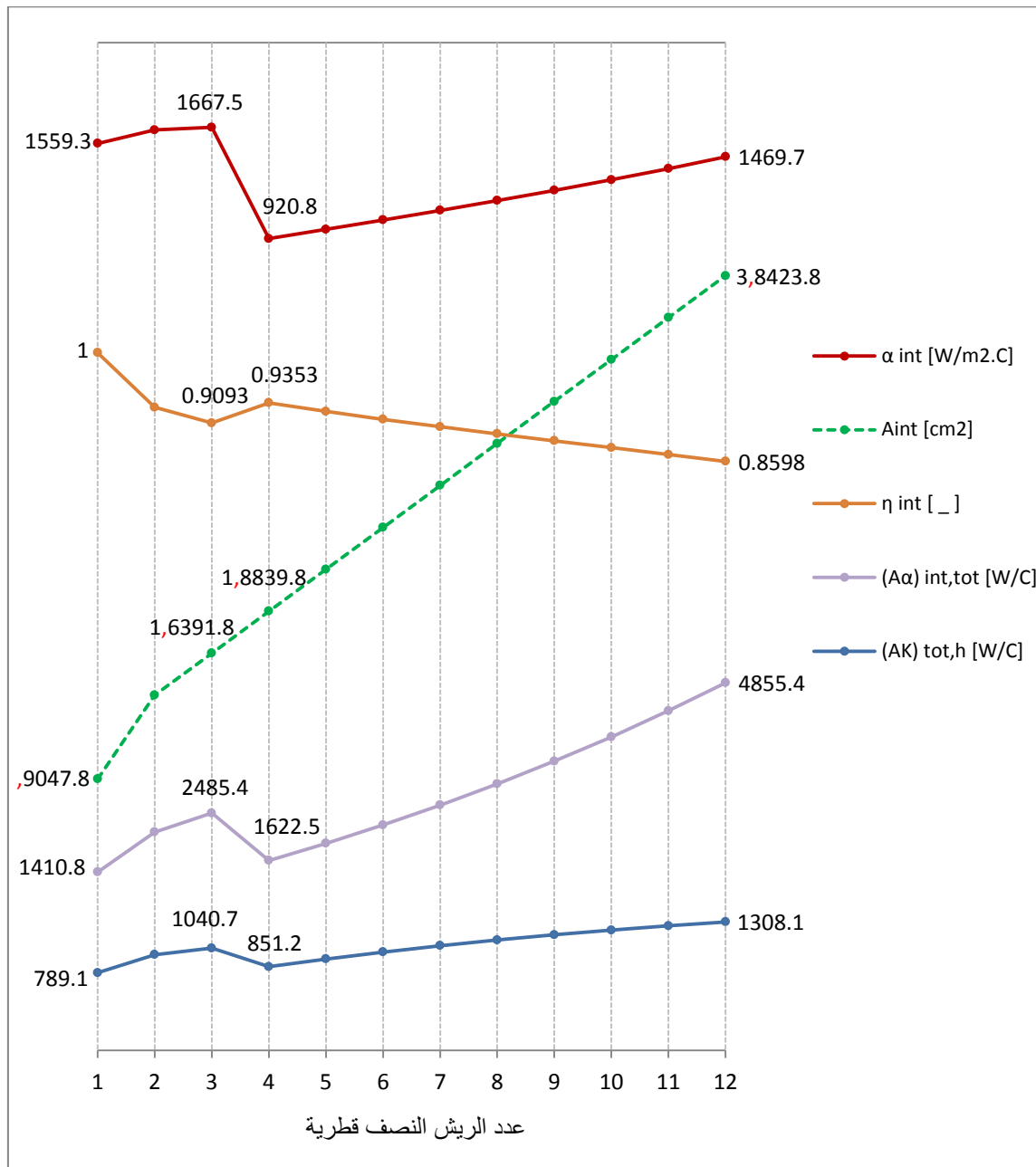
- عند زيادة عدد الريش النصف قطرية داخل الأنبوب من 0 حتى 12 زادت سرعة جريان الماء في الأنبوب V_1 ونقص القطر الهيدروليكي D_h بشكل كبير ما أدى إلى انخفاض Re . وبالتالي وُجِدَ أنه عند عدد ريش نصف قطرية 0 و 2 و 3 كان الجريان انتقالياً، وعند عدد ريش من 4 إلى 12 كان الجريان صفائحيًا. الشكل (5-19).



الشكل (5-19) تأثير زيادة عدد الريش النصف قطرية على نوع الجريان ضمن أنابيب المبادل.

5-4-2- تأثير زيادة عدد الريش النصف قطرية على معامل انتقال الحرارة الكلي للسرير الادمصاص:

زاد معامل انتقال الحرارة الكلي للسرير بشكل كبير بسبب زيادة مساحة سطح التبادل الداخلي وبلغت قيمته $1308 \text{ W/}^\circ\text{C}$ عند إضافة 12 ريشة. يُوضّح الشكل (5-20) تغيّر البارامترات مع زيادة عدد الريش النصف قطرية.



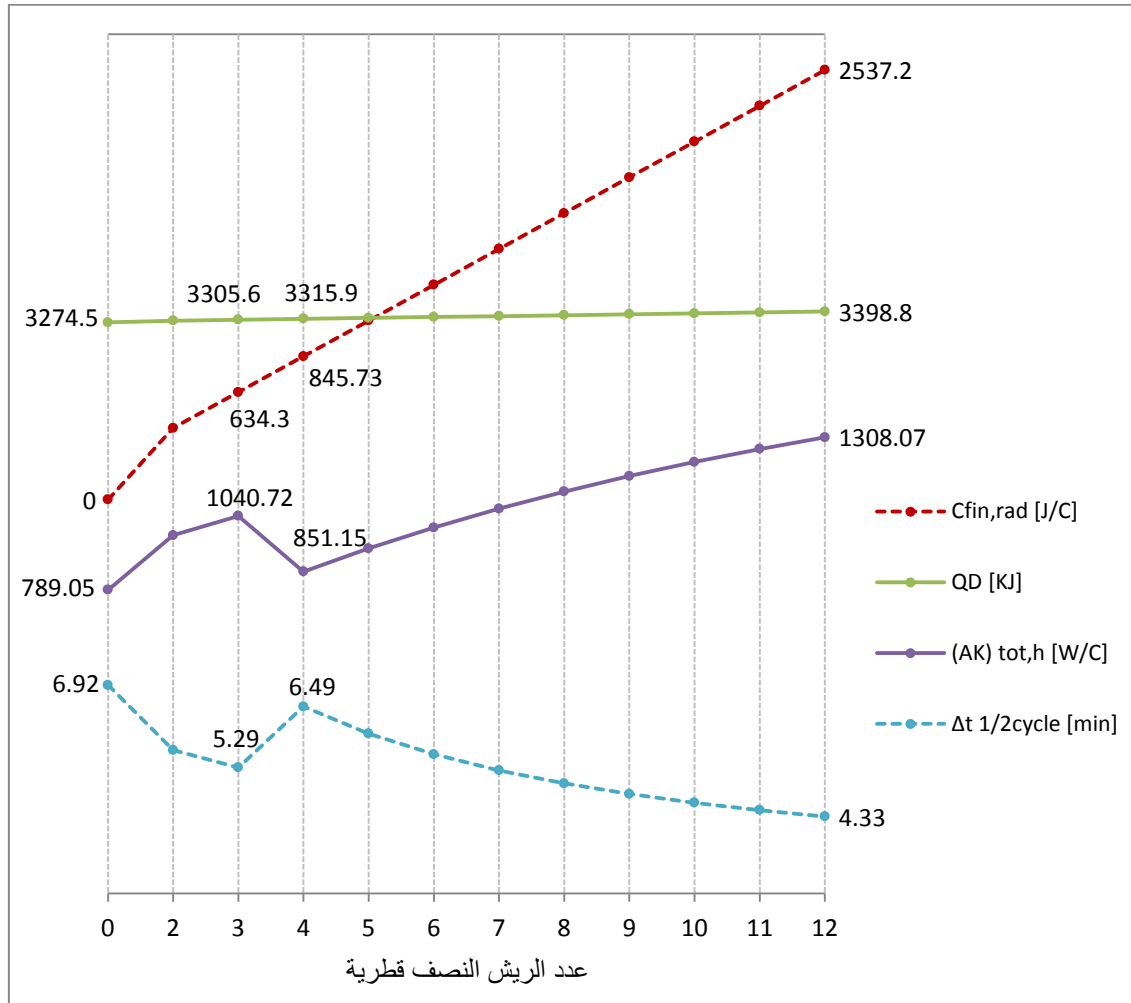
الشكل (5-20) تأثير زيادة عدد الريش النصف قطرية على معامل انتقال الحرارة الكلي للسرير.

5-4-3- تأثير زيادة عدد الريش النصف قطريّة على زمن نصف الدّورة:

نتيجة زيادة عدد الريش النصف قطريّة زادت الكتلة الحرارية الكلية للوعاء C_{tot} وبالتالي زادت كمية الحرارة Q_D الواجب تقديمها خلال فترة التسخين. لكن نتيجة الزيادة الكبيرة في معامل انتقال الحرارة للوعاء $(AK)_{tot,h}$ انخفض زمن نصف الدّورة $\Delta t_{1/2cycle}$.

وبالتالي وُجِدَ أنَّه عند زيادة عدد الريش القطريّة من 0 إلى 3 نقص $\Delta t_{1/2cycle}$ من 6.92 min إلى 5.29 min أي بمقدار 1.63 min .

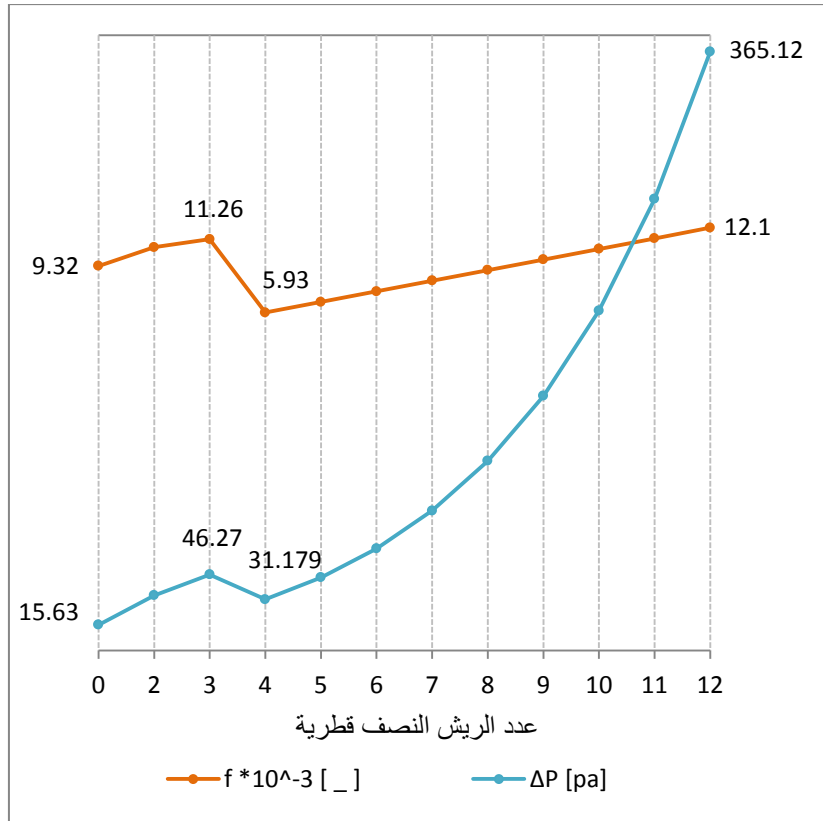
وعند زيادة عدد الريش من 0 إلى 12 نقص $\Delta t_{1/2cycle}$ إلى 4.33 min أي بمقدار 2.59 min . نستنتج هنا عدد الريش 4 و 5 و 6 لأنّ زمن نصف الدّورة عند هذه الخيارات أكبر من زمن نصف الدّورة عند عدد ريش 3. الشكل (5-21).



الشكل (5-21) تأثير زيادة عدد الريش النصف قطريّة على زمن نصف الدّورة.

5-4-4- تأثير زيادة عدد الريش النصف قطريّة على هبوط الضغط في الأنابيب:

عند إضافة 3 ريش نصف قطريّة زاد فاقد الضغط في الأنبوب ΔP من 15.63 pa إلى 46.27 pa أي بمقدار 1.96 مرّة. وعند إضافة 12 ريشة زاد ΔP إلى 365.12 pa أي بمقدار 22.36 مرّة، وإنّ قيمة فاقد الضغط هذه كبيرة جداً وغير مقبولة عند مقارنتها بجدول الأنابيب (ASHRAE). وبالتالي تمّ اختيار إضافة 3 ريش نصف قطريّة فقط. الشكل (5-22).



الشكل (5-22) تأثير زيادة عدد الريش النصف قطريّة على هبوط الضغط في الأنابيب.

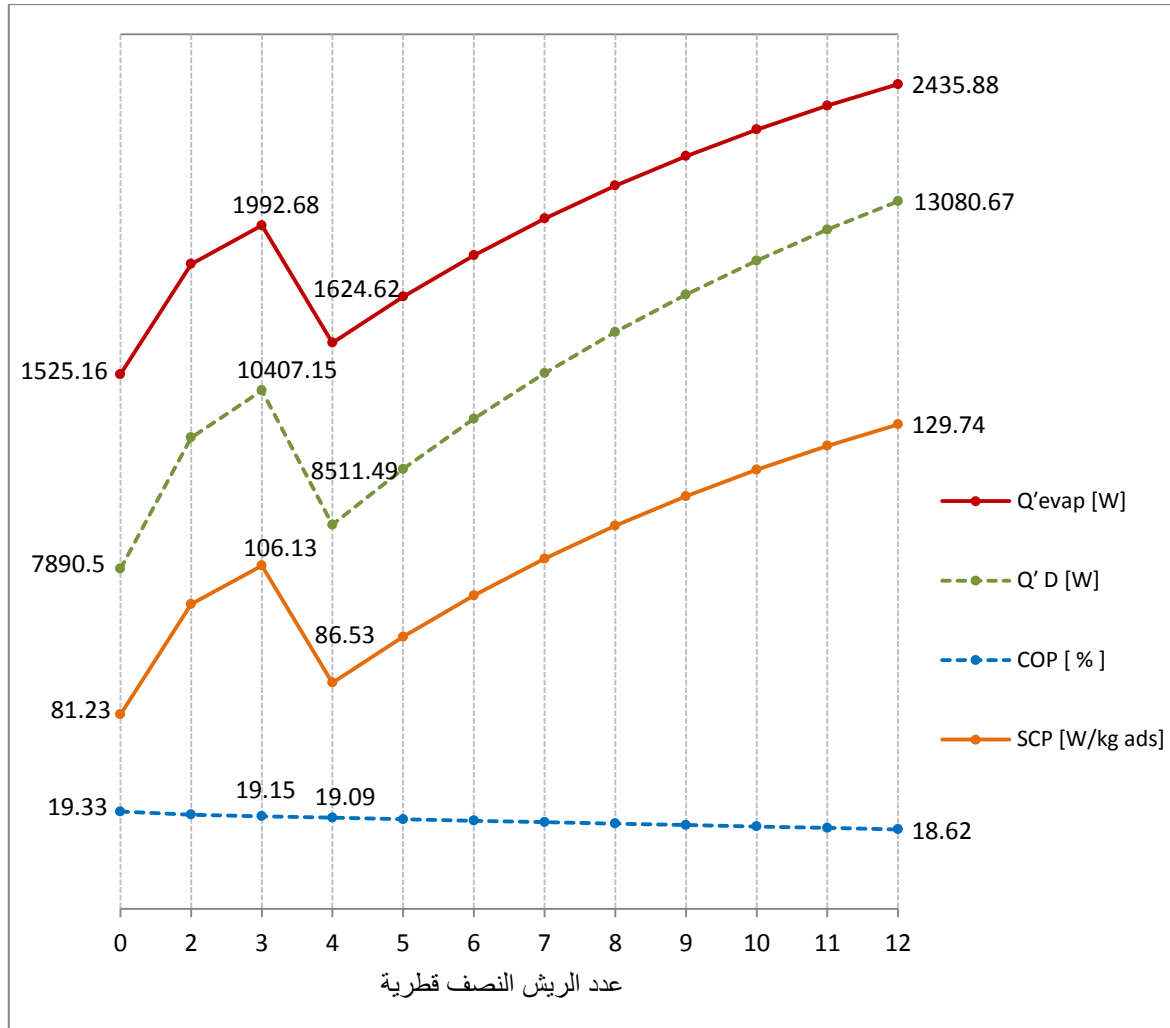
5-4-5- تأثير زيادة عدد الريش النصف قطريّة على مؤشرات الأداء للدّارة:

عند زيادة عدد الريش النصف قطريّة من 0 إلى 3 نتج مايلي:

زادت استطاعة التبريد $\dot{Q}_{evap}$ من 1525.76 W إلى 1992.68 W أي بنسبة 30.7% .

زادت استطاعة التسخين $\dot{Q}_D$ بنسبة 31.9% .

نقّص معامل الأداء COP من 0.1933 إلى 0.1915 أي بنسبة ضئيلة 0.94% (مقدار الفرق هو -0.0018). الشكل (5-23).



الشكل (5-23) تأثير زيادة عدد الريش النصف قطرية على مؤشرات الأداء للدّارة.

5-5- تأثير الاسترجاع الحراري والكتلي على أداء دورة التبريد الادمصاصية:

تمّ استخدام تقنيات الاسترجاع ومقارنة تأثيرها على أداء الدّارة.

دورة مع استرجاع حراري cycle with heat recovery (HR) .

دورة مع استرجاع كتلي cycle with mass recovery (MR) .

دورة مع استرجاع كتلي ثم حراري cycle with mass and heat recovery (MHR) .

دورة مع استرجاع حراري ثم كتلي cycle with heat and mass recovery (HMR) .

5-5-1- تأثير الاسترجاع الحراري على أداء دائرة التبريد الادمصاصية:

5-5-1-1- مفاهيم أساسية في الاسترجاع الحراري:

■ في عملية الاسترجاع الحراري بين سريرين (قبل تبديل الأدوار بينهما) يتم نقل جزءاً من حرارة السرير الواجب تبريده إلى السرير الواجب تسخينه، ومن أجل ذلك يتم تدوير الماء في الدارة بين السريرين بواسطة مضخة P-3 بعد إغلاق الصمامات إلى المسخن والمبرد كما هو موضح في الشكل (1-4).

■ بعد انتهاء عملية الاسترجاع الحراري بين السريرين تنخفض درجة حرارة السرير الساخن من T_D إلى T_I ، وترتفع درجة حرارة السرير البارد من T_A إلى T_J .

في نهاية عملية استرجاع حراري مثالية تتساوى درجة حرارة السرير الساخن والبارد وتساوي إلى:

$$T_I = T_J = \frac{T_D + T_A}{2} = \frac{85 + 36}{2} = 60.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (20-5)$$

إنَّ قيمة T_I تتراوح ضمن المجال $60.5 \text{ } ^\circ\text{C} > T_I > T_A$ ، وتقابلها قيمة T_J ضمن المجال $60.5 \text{ } ^\circ\text{C} < T_J < T_D$.

الشكل (5-24) وتمَّ فيه تمثيل دورة التبريد الأساسية بدون استرجاع للزوج Busofit/Ammonia على مخطط (P - T - x). والشكل (5-25) يوضِّح عملية استرجاع حراري مثالية حيث $T_I = T_J$.

■ إنَّ كمية الحرارة التي يطرحها الوعاء الساخن خلال عملية الاسترجاع الحراري = كمية الحرارة التي يكتسبها الوعاء البارد = كمية الحرارة المسترجعة Q_{reg} ، وبالتالي في دورة بدون استرجاع حراري تكون كمية الحرارة المقدمة لتسخين الوعاء من T_A إلى T_D تساوي $Q_D = Q_{A-D}$ ، و تكون كمية الحرارة المطروحة لتبريد الوعاء من T_D إلى T_A تساوي $Q_A = Q_{D-A}$. أما في دورة مع استرجاع حراري تصبح كمية الحرارة المقدمة لتسخين الوعاء من T_I إلى T_D تساوي:

$$Q_D = Q_{ID} = Q_{A-D} - Q_{reg} \quad \dots\dots\dots (21-5)$$

وتصبح كمية الحرارة المطروحة لتبريد الوعاء من T_J إلى T_A تساوي:

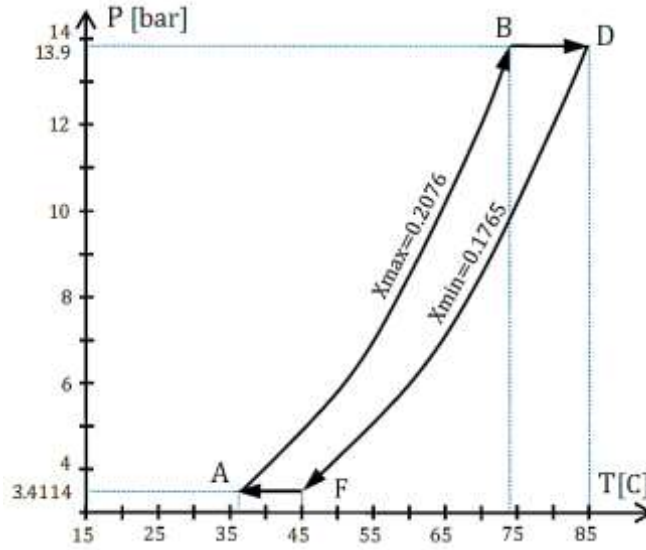
$$Q_A = Q_{JA} = Q_{D-A} - Q_{reg} \quad \dots\dots\dots (22-5)$$

■ إنَّ الطّاقة الحراريّة التي يطرحها الوعاء الساخن = الطّاقة الحراريّة التي يكتسبها الوعاء البارد = الطّاقة الحراريّة التي ينقلها الماء بين الوعاءين (الطاقة الحرارية المسترجعة) وتساوي:

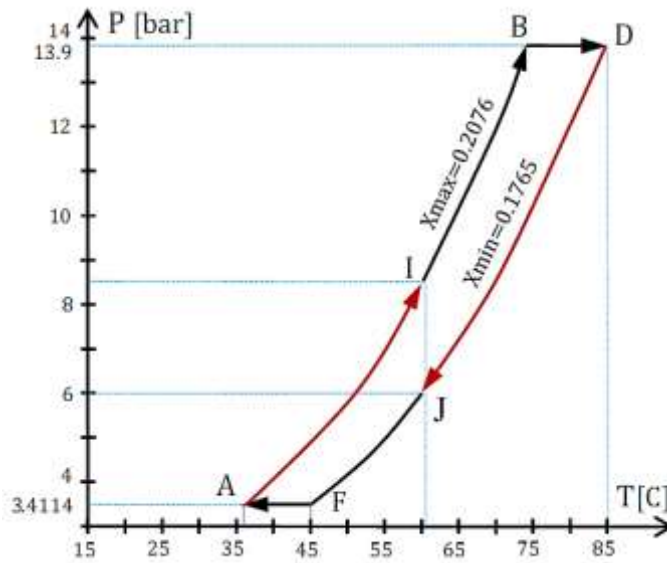
$$\dot{Q}_{reg} = \dot{Q}_{w,r} = \dot{M}_{w,r} \cdot C_{w,r} \cdot \Delta T_{w,r} \dots\dots\dots(23-5)$$

حيث $\Delta T_{w,r}$ هو الفرق بين درجة حرارة دخول وخروج الماء من المبادل في كل سرير .
وإنَّ درجة الحرارة الوسطيّة للماء المتدفق بين مبادلي السّريين هي:

$$T_{w,r} = \frac{T_{w,h,1} + T_{w,c,1}}{2} = \frac{95 + 36}{2} = 60.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$



الشكل (24-5) دورة التبريد الأساسيّة للزوج Busofit/Ammonia .



الشكل (25-5) دورة التبريد مع استرجاع حراري للزوج Busofit/Ammonia .

5-5-1-2- دراسة تأثير عملية استرجاع حراري مثالية على أداء دورة التبريد:

يُوضّح الشكل (5-25) دورة التبريد للزوج *Busofit/Ammonia* مع استرجاع حراري.

1. في عملية استرجاع حراري مثالية ترتفع درجة حرارة السّيرير البارد من T_A إلى $T_I = 60.5^\circ\text{C}$.

2. حساب كمية الحرارة المسترجعة:

$$Q_{reg} = Q_{AI} = C_{tot}(T_I - T_A) + M_{ads} \cdot x_{max}(h_{L,I} - h_{L,A}) = 1231.78 \text{ [kJ]} \dots (24-5)$$

حيث $C_{tot} \text{ [kJ/}^\circ\text{C]}$ هي الكتلة الحرارية الكلية للوعاء الادمصاص وتساوي إلى:

$$C_{tot} = M_{ads} \cdot c_{p,ads} + M_{shell} \cdot c_{p,shell} + M_{tube} \cdot c_{p,tube} + M_{fin,ex} \cdot c_{p,fin,ex} + M_{fin,rad} \cdot c_{p,fin,rad} = 30.605 \text{ [kJ/}^\circ\text{C]} \dots (25-5)$$

3. حساب درجة الحرارة T_J التي يبلغها السّيرير الساخن في نهاية عملية الاسترجاع الحراري:

$$Q_{reg} = Q_{DJ} = C_{tot}(T_D - T_J) + M_{ads} \cdot x_{min}(h_{L,D} - h_{L,J}) = 1231.78 \text{ [kJ]} \dots (26-5)$$

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

4. حساب كمية الحرارة المقدّمة للوعاء لرفع درجة حرارته من T_I إلى T_D :

$$Q_D = Q_{ID} = Q_{A-D} - Q_{reg} = 2073.77 \text{ [kJ]} \dots (27-5)$$

5. حساب كمية الحرارة المطروحة من الوعاء لتخفيض درجة حرارته من T_J إلى T_A :

$$Q_A = Q_{JA} = Q_{D-A} - Q_{reg} = 1934.92 \text{ [kJ]} \dots (28-5)$$

6. حساب زمن نصف الدّورة مع استرجاع حراري.

- حساب الطّاقة الحراريّة المسترجعة:

$$\dot{Q}_{reg} = \dot{Q}_{w,r} = \dot{M}_{w,r} \cdot C_{w,r} \cdot \Delta T_{w,r} = 9.485 \text{ [kW]} \dots (29-5)$$

حيث قطر الأنبوب الواصل بين المبادلين يساوي قطر الأنبوب الرئيسي للمبادل 20 mm ، وسرعة تدفق الماء فيه نفسها 2.5 m/sec ، وبالتالي يكون التدفق الكتلي للماء بين المبادلين هو نفسه

$$\dot{M}_{w,r} = 0.7555 \text{ [kg/sec]}$$

السعة الحرارية للماء عند درجة الحرارة $T_{w,r} = 60.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ تساوي $C_{w,r} = 4.1852 \text{ [kJ/kg.}^{\circ}\text{C]}$ وإن $\Delta T_{w,r} = 3[^{\circ}\text{C}]$.

ويكون زمن الاسترجاع الحراري:

$$\Delta t_{reg-h} = \frac{Q_{reg}}{\dot{Q}_{reg}} = 129.86 \text{ [sec]} = 2.16 \text{ [min]} \dots\dots\dots(30-5)$$

- تمّ حساب معامل انتقال الحرارة الكلي للسرير في مرحلة التسخين من $T_I = 60.5$ إلى $T_D = 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ وعند درجة حرارة وسطية للسرير: $T_{ads} = \frac{85+60.5}{2} = 72.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ وقيمته تساوي:

$$(AK)_{tot,h} = 1060.03 \text{ [W/}^{\circ}\text{C]}$$

ويكون الزمن اللازم لمرحلة التسخين هو:

$$\Delta t_D = \Delta t_{ID} = \frac{Q_{ID}}{(AK)_{tot,h} \cdot \Delta T_{w-ads}} = 195.63 \text{ [sec]} = 3.26 \text{ [min]} \dots\dots\dots(31-5)$$

- ويكون زمن الدورة كاملة:

$$\Delta t_{cycle} = 2\Delta t_{ID} + \Delta t_{reg-h} = 521.13 \text{ [sec]} \dots\dots\dots(32-5)$$

ويكون زمن نصف الدورة مع استرجاع حراري:

$$\Delta t_{1/2cycle} = \frac{\Delta t_{cycle}}{2} = 260.56 \text{ [sec]} = 4.34 \text{ [min]} \dots\dots\dots(33-5)$$

وأخيراً تمّ حساب استطاعة التجهيزات ومعامل الأداء في حال استخدام تقنية الاسترجاع الحراري وذلك ضمن الشروط السابقة وتمّ ترتيبها في الجدول (5-15) للمقارنة.

5-5-2- تأثير الاسترجاع الكتلي على أداء دائرة التبريد الادمصاصية:

5-5-2-1- مفاهيم أساسية في الاسترجاع الكتلي:

■ تتم عملية الاسترجاع الكتلي بين الوعاءين (قبل تبديل الأدوار بينهما) بفصلهما عن المبخر والمكثف وفتح صمام البخار A على الأنبوب الواصل بين الوعاءين كما هو موضح في الشكل (4-1)، فيتدفق بخار وسيط التبريد من الوعاء الساخن ذي الضغط العالي P_{cond} إلى الوعاء البارد ذي الضغط المنخفض P_{evap} ، حتى يتعادل الضغط بين الوعاءين وتساوي قيمته تبعاً لشروط التشغيل:

$$P_m = \frac{P_{cond} + P_{evap}}{2} = \frac{3.4114 + 13.9}{2} = 8.6557 \text{ [bar]} \dots\dots\dots(34-5)$$

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

5-5-2-2-دراسة تأثير عملية استرجاع كتلى مثاليّة على أداء دارة التبريد:

أ- الإجراء D-Y وهو إجراء انخفاض الضغط من P_{cond} إلى P_m بثبات التركيز x_D ، وبالتالي تنخفض درجة حرارة السّير من T_D إلى T_Y ويتم طرح كمية من الحرارة Q_{DY} .
يتم الحصول على قيمة T_Y بواسطة البرنامج الحاسوبي:

$$x_D = 0.1765, P_m = 8.6557 \text{ bar} \rightarrow T_Y = 71 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

وتُحسب كمية الحرارة المطروحة في هذا الإجراء من المعادلة:

$$Q_{DY} = C_{tot}(T_D - T_Y) + M_{ads} \cdot x_D (h_{L,D} - h_{L,Y}) = 688.77 \text{ [kJ]} \dots\dots\dots (35-5)$$

ب- الإجراء Y-M وهو إجراء الفصل وفيه ينقص التركيز في السرير عند ضغط ثابت P_m ، حيث يتم إجراء الفصل على حساب الحرارة المطروحة في الإجراء D-Y .
يتم تحديد درجة الحرارة T_M في نهاية هذا الإجراء من المعادلة:

$$Q_{YM} = Q_{DY} = C_{tot}(T_M - T_Y) + M_{ads} \cdot \frac{x_M + x_D}{2} (h_{L,M} - h_{L,Y}) + M_{ads}(x_D - x_M) \cdot h_{ads} = 688.77 \text{ [kJ]} \dots\dots\dots (36-5)$$

وبالحل البياني باستخدام البرنامج الحاسوبي كانت القيمة هي: $T_M = 76 \text{ }^\circ\text{C}$

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

$$x_M = \omega_o \cdot \rho_M \cdot \exp \left[-D \left(T_M \cdot \ln \frac{P_M}{P_m} \right)^n \right] = 0.1592 \text{ [kg/kg]} \dots\dots\dots (37-5)$$

حساب تغير فرق التركيز في كل سرير:

$$\delta x = x_D - x_M = 0.0173 \text{ [kg/kg]} \dots\dots\dots (38-5)$$

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

$$x_G = x_A + \delta x = 0.2249 \text{ [kg/kg]} \dots\dots\dots (39-5)$$

حساب فرق التركيز في السرير بعد عملية استرجاع كتلي:

$$\Delta x^* = \Delta x + \delta x = x_G - x_D = 0.0484 \text{ [kg/kg]} \dots\dots\dots (40-5)$$

3. حساب درجات الحرارة المجهولة بواسطة البرنامج الحاسوبي.

$$x_M = 0.1592 , P_{evap} = 3.4114 \text{ bar} \rightarrow T_N = 49 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$x_G = 0.2249 , P_m = 8.6557 \text{ bar} \rightarrow T_G = 56 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$x_G = 0.2249 , P_{cond} = 13.9 \text{ bar} \rightarrow T_K = 69 \text{ }^\circ\text{C}$$

4. حساب كمية الحرارة المقدّمة للسرير خلال عملية التسخين G-K-D :

$$Q_{GK} = C_{tot}(T_K - T_G) + M_{ads} \cdot x_G (h_{L,K} - h_{L,G}) = 686.74 \text{ [kJ]} \dots\dots\dots (41-5)$$

$$Q_{KD} = C_{tot}(T_D - T_K) + M_{ads} \cdot \frac{x_G + x_D}{2} (h_{L,D} - h_{L,K}) + M_{ads}(x_G - x_D) \cdot h_{ads} = 2099.38 \text{ [kJ]} \dots\dots\dots(42-5)$$

كمية الحرارة المقدّمة خلال إجراء التسخين كاملاً:

$$Q_D = Q_{GD} = Q_{GK} + Q_{KD} = 2786.12 \text{ [kJ]} \dots\dots\dots(43-5)$$

5. حساب كمية وسيط التبريد العاملة في الدّارة:

$$M_{ref} = M_{ads} \cdot \Delta x^* = 0.9081 \text{ [kg]} \dots\dots\dots(44-5)$$

6. حساب زمن نصف الدّورة مع استرجاع كتلي:

- حساب زمن تسخين السّريّر:

تمّ حساب معامل انتقال الحرارة الكلّي للسّريّر في مرحلة التسخين عند درجة الحرارة الوسطيّة للسّريّر:

$$(AK)_{tot,h} = 1056.46 \text{ [W/}^\circ\text{C]} \text{ ، وكانت قيمة } T_{ads} = \frac{85+56}{2} = 70.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

ويكون الزمن اللازم لمرحلة التسخين هو:

$$\Delta t_D = \Delta t_{GD} = \frac{Q_{GD}}{(AK)_{tot,h} \cdot \Delta T_{w-ads}} = 263.72 \text{ [sec]} = 4.4 \text{ [min]} \dots\dots\dots(45-5)$$

- حساب زمن الاسترجاع الكتلي:

تمّ حساب معامل انتقال الحرارة الكلّي للسّريّر في مرحلة الاسترجاع الكتلي عند درجة الحرارة الوسطيّة

$$\text{للسّريّر: } T_{ads} = \frac{85+76}{2} = 80.5 \text{ }^\circ\text{C} \text{ ، وكانت قيمة } (AK)_{tot,r} = 1072.59 \text{ [W/}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_{reg-m} = \Delta t_{DM} = \frac{2 Q_{DY}}{(AK)_{tot,r} \cdot \Delta T_{w-ads}} = 128.4 \text{ [sec]} = 2.14 \text{ [min]} \dots\dots\dots(46-5)$$

- يكون زمن الدّورة كاملة:

$$\Delta t_{cycle} = 2\Delta t_{GD} + \Delta t_{reg-m} = 655.84 \text{ [sec]} \dots\dots\dots(47-5)$$

- يكون زمن نصف الدّورة مع استرجاع كتلي:

$$\Delta t_{1/2cycle} = \frac{\Delta t_{cycle}}{2} = 327.92 \text{ [sec]} = 5.47 \text{ [min]} \dots\dots\dots(48-5)$$

وأخيراً تمّ حساب قدرة المكثّف والمبخر وكتلة الجليد المنتجة، وكذلك حساب استطاعة التجهيزات

ومعامل الأداء ومعامل استطاعة التبريد النوعيّة في حال استخدام تقنيّة الاسترجاع الكتلي وذلك ضمن

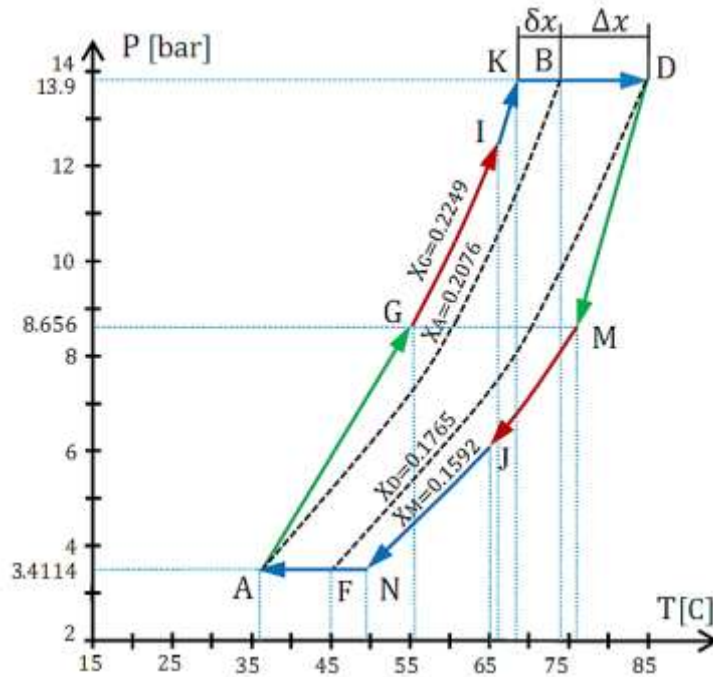
الشروط السابقة. تمّ ترتيب جميع البارامترات في الجدول (5-15) للمقارنة.

5-5-3- تأثير عملية استرجاع كتلي تليها عملية استرجاع حراري على أداء دورة التبريد الادمصاصية:

5-5-3-1- مفاهيم أساسية في الاسترجاع الكتلي ثم الحراري:

تم توضيح مسارات الاسترجاع الكتلي ثم الاسترجاع الحراري في هذه الدورة على الشكل (5-27):

- عملية الاسترجاع الكتلي: يُمثّلها المسار D-M والمسار A-G.
- عملية الاسترجاع الحراري: يُمثّلها المسار M-I والمسار G-I.
- عملية تسخين السرير وُيُمثّلها المسار I-K-D ، وعملية تبريد السرير يُمثّلها المسار J-N-A.



الشكل (5-27) دورة التبريد مع استرجاع كتلي ثم حراري للزوج Busofit/Ammonia .

5-5-3-2- دراسة تأثير عملية استرجاع كتلي يليها عملية استرجاع حراري على أداء دورة التبريد:

يُوضّح الشكل (5-27) دورة التبريد للزوج Busofit/Ammonia مع استرجاع كتلي ثم حراري. تم إجراء حسابات الاسترجاع الكتلي كما ورد سابقاً في (الفقرة 5-5-2-2) وفق العلاقات من (5-35) حتى (5-48) وقيم البارامترات نفسها. تم إجراء حسابات الاسترجاع الحراري في الحالة المثالية حيث تتساوى درجة حرارة السريرين في نهاية العملية وتصبح مساوية إلى:

$$T_I = T_J = \frac{T_M + T_G}{2} = \frac{76 + 56}{2} = 66 \text{ } ^\circ\text{C} \dots\dots\dots(49-5)$$

1. في عملية الاسترجاع الحراري المثالية (القصى) ترتفع درجة حرارة السّيرير البارد من القيمة $T_G = 56 \text{ } ^\circ\text{C}$ إلى $T_I = 66 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$Q_{reg} = Q_{GI} = 527.07 \text{ [kJ]} \dots\dots\dots 2. \text{ كمية الحرارة المسترجعة}$$

$$T_J = 65 \text{ } ^\circ\text{C} \dots\dots 3. \text{ درجة الحرارة التي يبلغها السّيرير الساخن في نهاية عملية الاسترجاع الحراري}$$

$$Q_D = Q_{ID} = 2259.05 \text{ [kJ]} \dots\dots\dots 4. \text{ كمية الحرارة المقدّمة خلال فترة التسخين}$$

5. زمن نصف الدّورة مع استرجاع حراري.

$$\Delta t_{reg-h} = 55.57 \text{ [sec]} \dots\dots\dots \text{ زمن الاسترجاع الحراري}$$

$$(AK)_{tot,h} = 1064.44 \text{ [W/} ^\circ\text{C]} \dots\dots\dots \text{ وتمّ حساب معامل انتقال الحرارة للسّيرير في مرحلة التسخين عند درجة حرارة وسطية للسّيرير}$$

$$\left(\frac{85+66}{2} = 75.5 \text{ } ^\circ\text{C} \right) \text{ وقيمته تساوي}$$

$$\Delta t_D = \Delta t_{ID} = 212.23 \text{ [sec]} \dots\dots\dots \text{ ويكون الزمن اللازم لمرحلة التسخين هو}$$

ويكون زمن نصف الدّورة مع استرجاع كتلي وحراري:

$$\Delta t_{1/2cycle} = (2\Delta t_{ID} + \Delta t_{reg-m} + \Delta t_{reg-h})/2 = 5.07 \text{ min} \dots\dots\dots(50-5)$$

تمّ إجراء الحسابات السابقة باستخدام نفس علاقات الاسترجاع الحراري من (24-5) إلى (31-5) مع استبدال قيمة T_A بـ T_G ، وقيمة T_D بـ T_M .

وأخيراً تمّ حساب استطاعة التجهيزات ومعامل الأداء في حال استخدام تقنيّة الاسترجاع الكتلي والحراري وتمّ ترتيبها في الجدول (5-15) للمقارنة.

الجدول (5-15) المقارنة بين دورات 0R و HR و MR و MHR.

	البارامتر	الواحدة	0R	HR	MR	MHR
1	x_{max}	kg/kg	0.20762	0.20762	0.2249	0.2249
2	x_{min}	kg/kg	0.17654	0.17654	0.1592	0.1592
3	δx	kg/kg	0	0	0.0173	0.0173
4	δM_{ref}	kg	0	0	0.3246	0.3246
5	Δx	kg/kg	0.03108	0.03108	0.0484	0.0484
6	M_{ref}	kg	0.5836	0.5836	0.9081	0.9081
7	Q_{cond}	kJ	746.42	746.42	1161.55	1161.55
8	Q_{evap}	kJ	632.92	632.92	984.92	984.92
9	M_{ice}	kJ	1.469	1.469	2.286	2.286
10	Q_D	kJ	3305.55	2073.77	2786.12	2259.05
11	Q_{reg-h}	kJ	0	1231.77	0	527.07
12	$(AK)_{tot,h}$	W/°C	1040.72	1060.03	1056.46	1064.44
13	Δt_D	sec	317.62	195.63	263.72	212.23
14	Δt_{reg-h}	sec	0	129.86	0	55.57
15	Δt_{reg-m}	sec	0	0	128.4	128.4
16	Δt_{reg}	sec	0	0	128.4	183.97
17	$\Delta t_{1/2cycle}$	sec	317.62	260.56	327.92	304.21
		min	5.29	4.34	5.47	5.07
18	$\dot{M}_{ref}$	g/sec	1.837	2.240	2.769	2.985
19	$\dot{Q}_{cond}$	kW	2.35	2.865	3.542	3.818
20	$\dot{Q}_{evap}$	kW	1.993	2.429	3.004	3.238
21	$\dot{Q}_D$	kW	10.407	7.959	8.496	7.426
22	COP	-	0.1915	0.3052	0.3535	0.4360
23	SCP	W/kg _{ads}	106.13	129.37	159.97	172.44

5-5-4- مقارنة الدّورة الأساسيّة 0R مع دورات استرجاع حراري HR واسترجاع

كتلي MR واسترجاع كتلي ثم حراري MHR:

1) كتلة الجليد المنتجة:

- إنّ إجراء عملية استرجاع حراري HR لا تؤثر على كتلة وسيط التبريد في الدارة وبالتالي تبقى قدرة المبخّر Q_{evap} ثابتة، وكذلك كتلة الجليد المنتجة خلال دورة واحدة تبقى ثابتة $M_{ice} = 1.469 \text{ kg}$.

- نتيجة إجراء عملية استرجاع كتلي MR تنتقل كمية من بخار وسيط التبريد مقدارها 325 g من سرير الفصل الساخن إلى سرير الادمصاص البارد، وبالتالي تزداد كتلة وسيط التبريد العاملة في الدارة بالمقدار نفسه، مما يؤدي إلى ازدياد كتلة الجليد المنتجة خلال الدّورة إلى 2.286 kg أي بمقدار 817 g.

- في عملية استرجاع كتلي ثم حراري MHR، أيضاً تزداد كتلة الجليد المنتجة بمقدار 817 g نتيجة الاسترجاع الكتلي، ولا تؤثر عملية الاسترجاع الحراري التالية على هذه الكتلة. الشكل (5-28).

(2) كمية الحرارة المقدّمة خلال التسخين:

- عند إجراء عملية استرجاع حراري مثالية بين السّيرين حيث $T_I = T_J = 60.5\text{ }^\circ\text{C}$ تنتقل كمية من الحرارة Q_{reg} من السّير الساخن إلى السّير البارد، وبالتالي تنخفض كمية الحرارة Q_D الواجب تقديمها في مرحلة التسخين من 3305.55 kJ إلى 2073.77 kJ بمقدار كمية الحرارة المسترجعة.

- في عملية الاسترجاع الكتلي MR تكون كمية الحرارة Q_D الواجب تقديمها أكبر مقارنةً بدورة مع استرجاع حراري HR حيث تنخفض Q_D من 3305.55 kJ إلى 2786.12 kJ فقط، وذلك نتيجة حصول ادمصاص إضافي في السّير البارد وبالتالي فإنّ عملية تحرير وسيط التبريد المدمص تستلزم كمية أكبر من الحرارة.

- إنّ إتباع عملية الاسترجاع الكتلي بعملية استرجاع حراري حيث $T_I \approx T_J = 66\text{ }^\circ\text{C}$ يُخفّض كمية الحرارة Q_D المقدّمة للسّير إلى 2259.05 kJ أي بمقدار كمية الحرارة المسترجعة 527.07 kJ . الشكل (5-29).

(3) زمن نصف الدّورة:

إنّ زمن تسخين السّير Δt_D ينخفض بانخفاض كمية الحرارة Q_D اللازمة لتسخين السّير، ومع الأخذ بالاعتبار زمن الاسترجاع في كل دورة (زمن الاسترجاع الحراري 130 sec ، زمن الاسترجاع الكتلي 128 sec ، زمن الاسترجاع الكتلي والحراري 184 sec) وُجِدَ أنّ زمن نصف الدّورة مع MR هو الأطول ويساوي 5.47 min ، يليه زمن نصف الدّورة مع MHR ويساوي 5.07 min ، وكان زمن نصف الدّورة مع HR هو الأقصر ويساوي 4.34 min . الشكل (5-29).

(4) استطاعة التجهيزات والأداء:

- مقارنة الدورة مع HR مع الدورة الأساسية OR :
انخفضت استطاعة التسخين $\dot{Q}_D$ من 10.407 kW إلى 7.959 kW أي بنسبة -23.53%
زادت استطاعة التبريد $\dot{Q}_{evap}$ من 1.993 kW إلى 2.429 kW أي بنسبة 22% .

زاد معامل الأداء COP من 0.1915 إلى 0.3052 أي بنسبة 59.4% (بمقدار 0.1137).

- مقارنة الدورة مع MR مع الدورة الأساسية OR :

انخفضت استطاعة التسخين $\dot{Q}_D$ من 10.407 kW إلى 8.496 kW أي بنسبة 18.36%.

زادت استطاعة التبريد $\dot{Q}_{evap}$ من 1.993 kW إلى 3.004 kW أي بنسبة 50.73% .

زاد معامل الأداء COP من 0.1915 إلى 0.3535 أي بنسبة 84.6% (بمقدار 0.162).

- مقارنة الدورة مع MHR مع الدورة الأساسية OR :

انخفضت استطاعة التسخين $\dot{Q}_D$ من 10.407 kW إلى 7.426 kW أي بنسبة 28.65%.

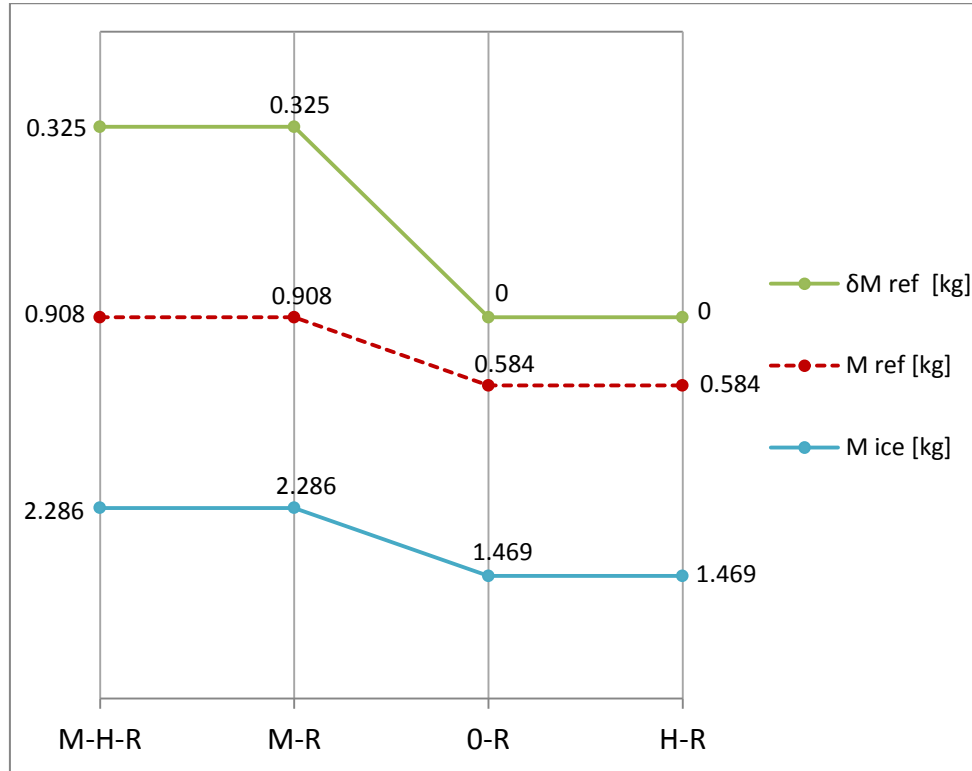
زادت استطاعة التبريد $\dot{Q}_{evap}$ من 1.993 kW إلى 3.238 kW أي بنسبة 62.48%.

زاد معامل الأداء COP من 0.1915 إلى 0.436 أي بنسبة 127.7% (بمقدار 0.2445).

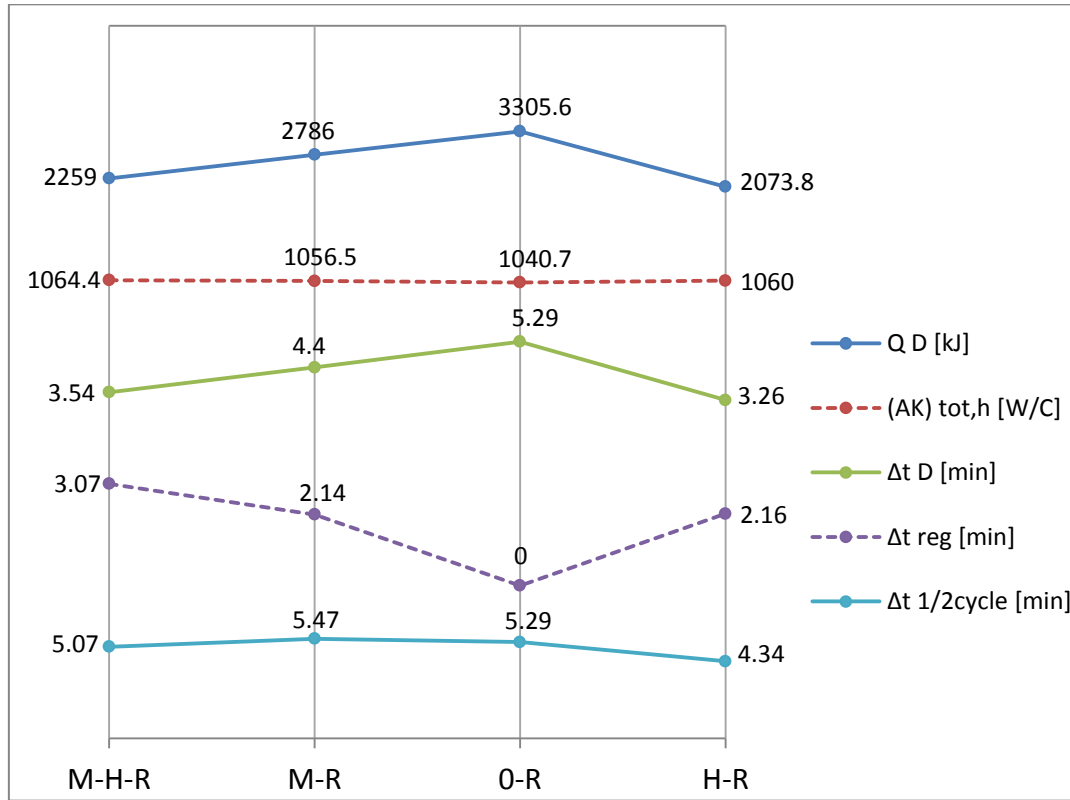
الشكل (5-30).

إذاً إنَّ استخدام تقنية MHR حقَّق أعلى زيادة في استطاعة التبريد ومعامل الأداء للدَّارة، يليها استخدام

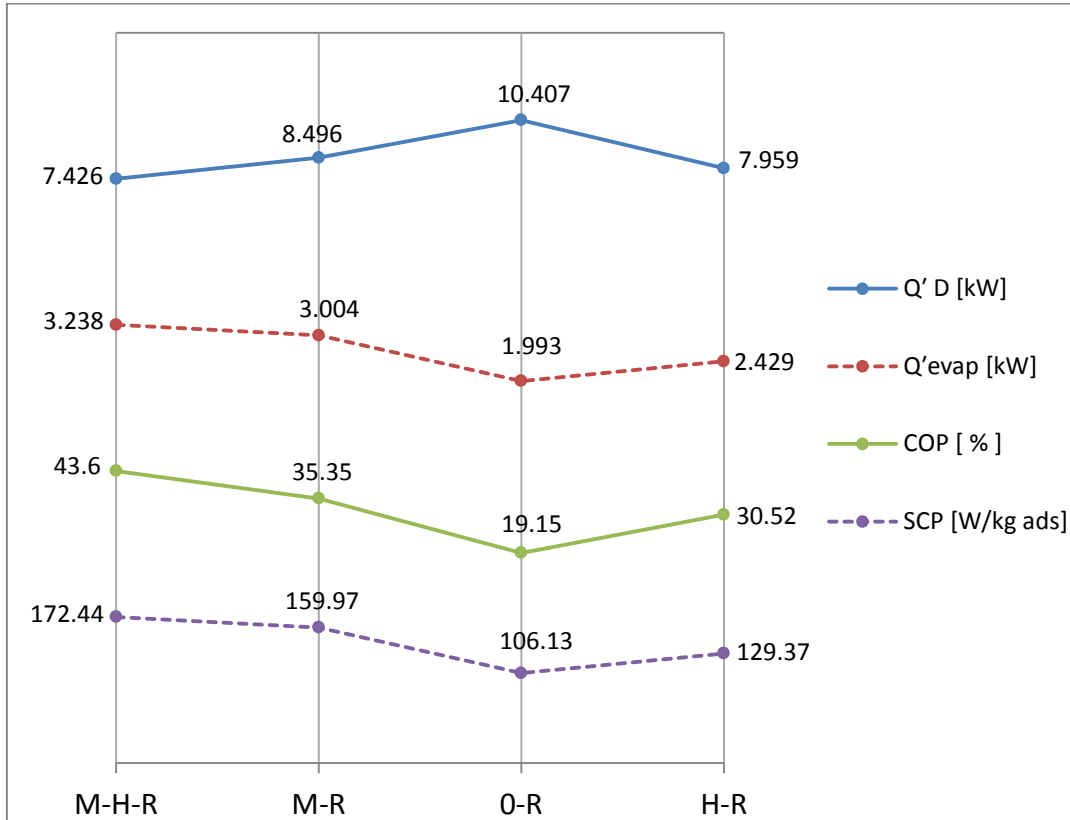
تقنية MR ، يليها استخدام تقنية HR.



الشكل (5-28) تأثير عمليات الاسترجاع HR و MR و MHR على M_{ice} .



الشكل (5-29) تأثير عمليات الاسترجاع HR و MR و MHR على Q_D و $\Delta t_{1/2cycle}$.



الشكل (5-30) تأثير عمليات الاسترجاع HR و MR و MHR على COP و SCP.

5-5-5- تأثير عملية استرجاع حراري تليها عملية استرجاع كتلي على أداء دورة التبريد الادمصاصية:

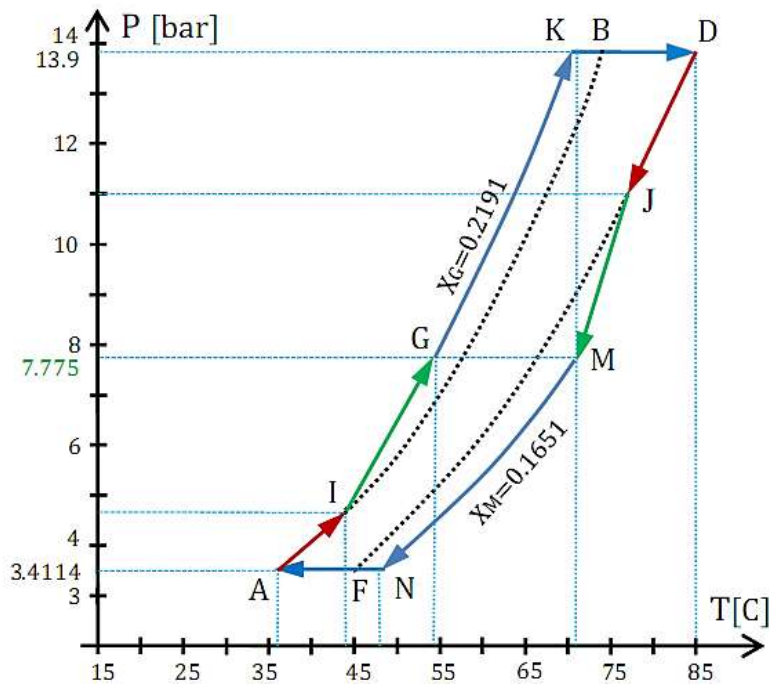
5-5-5-1 مفاهيم أساسية في الاسترجاع الحراري ثم الكتلي:

يُبين الشكل (5-31) دورة التبريد الادمصاصية على مخطط $(P - T - x)$ وتمّ توضيح مسارات الاسترجاع الحراري ثم الاسترجاع الكتلي كمايلي:

- عملية الاسترجاع الحراري يُمثّلها المسار A-I والمسار D-J.
- عملية الاسترجاع الكتلي يُمثّلها المسار I-G والمسار J-M ، وفي هذه العملية يتعادل الضغط بين الوعاءين ويصبح مساوياً:

$$P_m = \frac{P_I + P_J}{2} \dots\dots\dots(51-5)$$

- عملية تسخين السرير ويُمثّلها المسار G-K-D ، وعملية تبريد السرير يُمثّلها المسار M-N-A .



الشكل (5-31) دورة التبريد مع استرجاع حراري ثم كتلي للزوج Busofit/Ammonia .

5-5-5-2- دراسة تأثير عملية استرجاع حراري يليها عملية استرجاع كتلي على

أداء دورة التبريد الادمصاصية:

- تم دراسة عملية الاسترجاع الحراري بين السّيرين ضمن المجال الحراري $T_A < T_I < 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- عند كل قيمة لـ T_I تم حساب قيمة T_J المقابلة لها وذلك بواسطة البرنامج الحاسوبي.
- من مخطّط $(P - T - x)$ للزوج Busofit/Ammonia تم إيجاد قيمة الضغط في كلّ من الوعاءين P_I و P_J عند درجات الحرارة T_I و T_J في نهاية عملية الاسترجاع الحراري.
- بعد إجراء عملية استرجاع كتلي بين الوعاءين يتعادل الضغط بينهما ويصبح مساوياً P_m ، والجدول (5-16) يبيّن ضغط التعادل للوعاءين نتيجة الاسترجاع الكتلي بعد عملية استرجاع حراري.

الجدول (5-16): ضغط التعادل بين الوعاءين نتيجة الاسترجاع الكتلي بعد عملية استرجاع حراري.

T_I [$^{\circ}\text{C}$]	P_I [bar]	T_J [$^{\circ}\text{C}$]	P_J [bar]	P_m [bar]
36	3.4114	85	13.9	8.6557
38	3.65	83	13	8.325
40	4	81	12.3	8.15
42	4.35	79	11.6	7.975
44	4.65	77	10.9	7.775
46	5	75	10.15	7.575
48	5.3	73	9.5	7.4
50	5.8	71	8.8	7.3
52	6.15	69	8.2	7.175
54	6.65	67	7.7	7.175
56	7.12	65	7.12	7.12
58	7.85	63	6.65	7.25
60	8.3	61	6.15	7.225

الحسابات:

تمّ عرض الدراسة لحالة استرجاع حراري حيث ترتفع درجة حرارة السّير البارد من T_A إلى $T_I = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$. وبالمقابل تنخفض درجة حرارة السّير الساخن من T_D إلى $T_J = 77\text{ }^{\circ}\text{C}$. وتمّ إتباع الاسترجاع الحراري باسترجاع كتلي وكان ضغط التعادل للوعاءين هو $P_m = 7.775\text{ bar}$

1. التركيز في السّيرين في نهاية الاسترجاع الكتلي x_G, x_M :

$$x_M = 0.1651, \quad x_G = 0.2191, \quad \delta x = 0.01148, \quad \Delta x^* = 0.04256 \text{ [kg/kg]}$$

2. درجات الحرارة للسّيرين في نهاية الاسترجاع الكتلي T_G و T_M :

$$T_M = 71\text{ }^{\circ}\text{C} , T_G = 55\text{ }^{\circ}\text{C} , T_N = 47.5\text{ }^{\circ}\text{C} , T_K = 71\text{ }^{\circ}\text{C}$$

3. كمية الحرارة المقدّمة للسّيرير خلال إجراء التسخين:

$$Q_{GK} = C_{tot}(T_K - T_G) + M_{ads} \cdot x_G (h_{L,K} - h_{L,G}) = 836.89 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{KD} = C_{tot}(T_D - T_K) + M_{ads} \cdot \frac{x_D + x_G}{2} (h_{L,D} - h_{L,K}) + M_{ads}(x_G - x_D) \cdot h_{ads} = 1480.19 \text{ kJ}$$

$$Q_D = Q_{GD} = Q_{GK} + Q_{KD} = 2677.08 \text{ [kJ]}$$

$$M_{ref} = 0.799 \text{ [kg]} \quad 4. \text{ كمية وسيط التبريد في الدارة:}$$

$$Q_{evap} = 866.61 \text{ [kJ]} \quad 5. \text{ قدرة المبخر:}$$

$$M_{ice} = 2.011 \text{ [kg]} \quad 6. \text{ كمية الجليد المنتجة:}$$

$$COP = 0.3237 \quad 7. \text{ معامل الأداء:}$$

5-5-6- تأثير ازدياد درجة حرارة السّيرير البارد في نهاية عملية الاسترجاع الحراري على معامل الأداء لدورة مع استرجاع حراري HR ودورة مع استرجاع كتلي ثم حراري MHR ودورة مع استرجاع حراري ثم كتلي HMR:

تمّ دراسة تأثير ازدياد T_I حتى القيمة $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ وتمّت المقارنة بين الدورات HR و MHR و HMR من حيث (كتلة وسيط التبريد في الدارة، كتلة الجليد المنتجة خلال الدّورة، كمية الحرارة المستهلكة خلال الدّورة، معامل الأداء التبريدي للدّارة).

(1) كتلة وسيط التبريد في الدّارة: الشكل (5-32).

■ في دورة مع استرجاع حراري HR: تبقى كتلة وسيط التبريد ثابتة في الدارة مع زيادة T_I وتساوي 0.584 kg .

■ في دورة مع استرجاع كتلي ثم حراري MHR: تزداد كتلة وسيط التبريد في الدارة نتيجة الاسترجاع الكتلي إلى 0.908 kg ولا تتغيّر هذه القيمة خلال عملية الاسترجاع الحراري التي تليها مع ازدياد T_I .

■ في دورة استرجاع حراري ثم كتلي HMR: وُجِدَ أنَّه في عملية الاسترجاع الحراري كلما زادت درجة حرارة وعاء الادمصاص البارد T_I قابلها انخفاض في درجة حرارة وعاء الفصل الساخن T_J ، وبالتالي يقل فرق الضغط بين الوعاءين ما يُخَفِّضُ فعالية عملية الاسترجاع الكتلي التالية، حيث تنقص كمية بخار وسيط التبريد المنتقلة وبالتالي ينخفض مقدار الزيادة في كمية وسيط التبريد، لكن كمية وسيط التبريد في الدارة تبقى أعلى مقارنةً بالدورة مع استرجاع حراري (أو الدورة الأساسية).

عندما تصبح درجة الحرارة $T_I = 56^\circ\text{C}$ عندها يصبح الضغط في وعاء الادمصاص البارد يساوي الضغط في وعاء الفصل الساخن، وبالتالي لن تحدث عملية انتقال للكتلة.

وعندما تصبح $T_I > 56^\circ\text{C}$ عندها يصبح الضغط في وعاء الادمصاص أكبر منه في وعاء الفصل، وبالتالي يحدث انتقال معاكس لبخار وسيط التبريد من سرير الادمصاص (حيث تحدث فيه عملية فصل تلقائي) إلى سرير الفصل (الذي تحدث فيه عملية ادمصاص تلقائي)، مما يؤدي إلى نقص كمية وسيط التبريد في الدارة بمقدار الكمية المنتقلة. عند درجة حرارة $T_I = 60^\circ\text{C}$ تنقص كتلة وسيط التبريد العاملة في الدارة إلى القيمة 0.494 kg .

تمّ توضيح ثلاث حالات مختلفة للاسترجاع الحراري ثم الكتلي على الشكل (5-33-a,b,c) وهي:

$$a) 36^\circ\text{C} < T_I < 56^\circ\text{C} , \quad b) T_I = 56^\circ\text{C} , \quad c) 56^\circ\text{C} < T_I \leq 60^\circ\text{C}$$

(2) قدرة المبخر أو قدرة التبريد وإنتاج الجليد: الشكل (5-32).

إنّ قدرة المبخر وبالتالي كمية الجليد المنتجة تتبع لكمية وسيط التبريد العاملة في الدارة، وبالتالي فإنّ كمية الجليد المنتجة تنقص بازدياد T_I كما هو موضح في الجدول (5-17) :

الجدول (5-17) الحالات الحدية الثلاثة للاسترجاع الحراري ثم الكتلي.

1	$T_I = 36^\circ\text{C}$	لا يوجد استرجاع حراري، وبالتالي حالة استرجاع كتلي فقط	$M_{erf} = 0.908\text{ [kg]}$	$M_{ice} = 2.286\text{ [kg]}$
2	$T_I = 56^\circ\text{C}$	استرجاع حراري، ولا تحدث عملية انتقال كتلي	$M_{erf} = 0.584\text{ [kg]}$	$M_{ice} = 1.469\text{ [kg]}$
3	$T_I = 60^\circ\text{C}$	استرجاع حراري، وتحدث عملية انتقال معاكس للكتلة	$M_{erf} = 0.494\text{ [kg]}$	$M_{ice} = 1.244\text{ [kg]}$

(3) كمية الحرارة المقدّمة خلال فترة التسخين: الشكل (5-32).

■ في دورة مع استرجاع حراري HR: نتيجة الاسترجاع الحراري تزداد درجة حرارة الوعاء البارد T_I وتنقص درجة حرارة الوعاء الساخن T_J ، ما يعني ازدياد كمية الحرارة المسترجعة وهذا يؤدي إلى انخفاض كمية الحرارة المطلوبة خلال فترة التسخين Q_D . عندما تزداد T_I من 36°C إلى 60°C تنخفض Q_D من 3305.55 kJ إلى 2099.32 kJ .

■ في دورة مع استرجاع كتلي ثم حراري MHR: تبدأ عملية الاسترجاع الحراري عند قيم لـ T_I أكبر من $T_G = 56^\circ\text{C}$ (حيث T_G هي درجة حرارة سرير الادمصاص البارد في نهاية عملية الاسترجاع الكتلي). ومع ازدياد قيمة T_I من 56°C إلى 60°C تنخفض Q_D من 2786.12 kJ إلى 2576.31 kJ .

■ في دورة استرجاع حراري ثم كتلي HMR: إنّ ازدياد T_I في عملية الاسترجاع الحراري يعني ازدياد كمية الحرارة المسترجعة، وبالتالي كلما زادت T_I كلما انخفضت كمية الحرارة Q_D المطلوبة خلال فترة التسخين. وإنّ Q_D في حالة الاسترجاع الحراري ثم الكتلي HMR عند ازدياد T_I من 36°C إلى 60°C هي دائماً أقل مقارنةً بدورات HR و MHR. عندما تزداد T_I من 36°C إلى 60°C تنخفض Q_D من 2786.12 kJ إلى 2094 kJ .

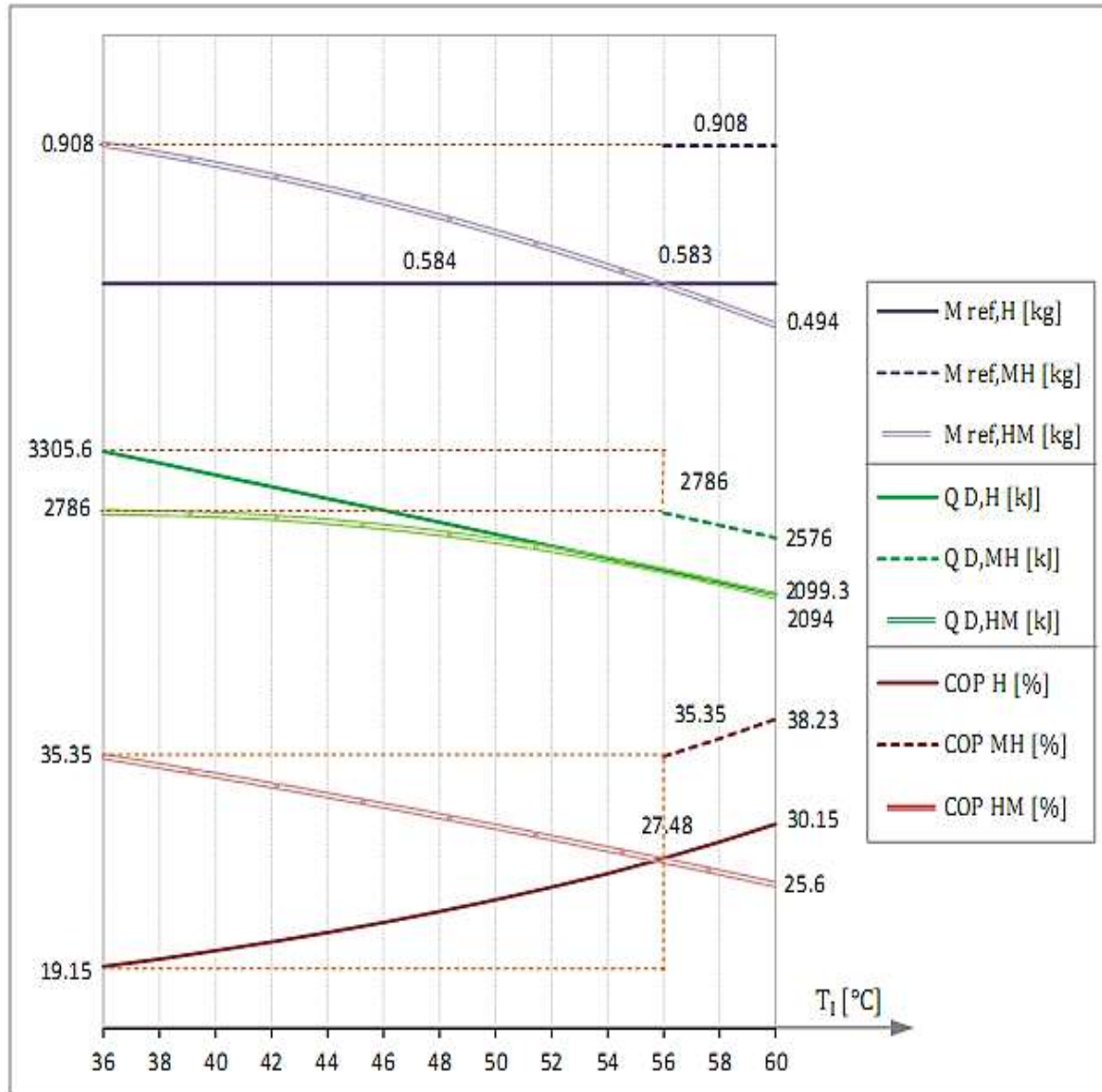
(4) معامل الأداء التبريدي COP: الشكل (5-32).

■ في دورة مع استرجاع حراري HR: تزداد قيمة COP مع ازدياد T_I نتيجة ازدياد كمية الحرارة المسترجعة وبالتالي انخفاض كمية الحرارة Q_D الواجب تقديمها خلال تسخين مرحلة السرير. حيث أنّه مع ازدياد T_I من 36°C إلى 60°C تزداد COP من 0.1915 إلى 0.3015 أي بنسبة 57.4% (بمقدار 0.11).

■ في دورة مع استرجاع كتلي ثم حراري MHR: نتيجة الاسترجاع الكتلي تزداد قيمة COP من 0.1915 إلى 0.3535 أي بنسبة 84.6%. وفي عملية الاسترجاع الحراري التي تليها ومع ازدياد T_I من 56°C إلى 60°C تزداد COP إلى 0.3823 أي بنسبة 8.2% . وبالنتيجة مع استرجاع كتلي ثم حراري حتى $T_I = 60^\circ\text{C}$ تزداد COP بنسبة 99.6% (بمقدار 0.1908).

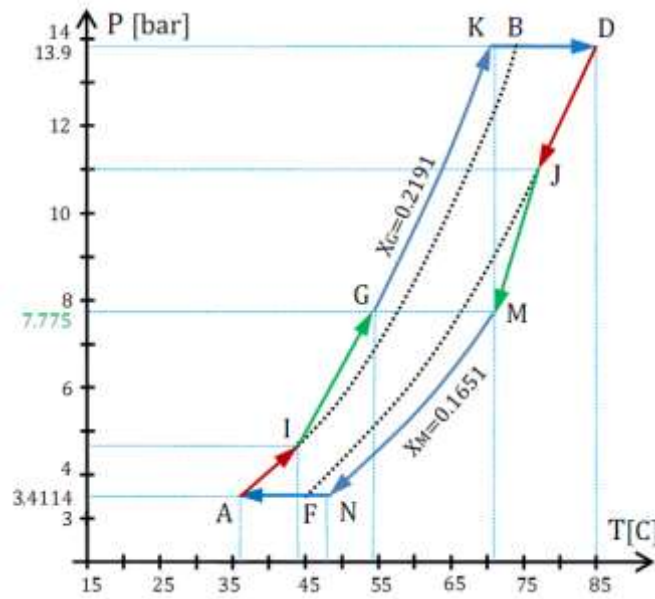
■ في دورة استرجاع حراري ثم كتلي HMR: إنَّ إجراء عملية استرجاع حراري قبل عملية الاسترجاع الكتلي تُخفِّض فعالية انتقال الكتلة، وبالتالي بازدياد T_I من 36°C إلى 60°C ينخفض COP من 0.3535 إلى 0.257 أي بنسبة -27.3% (بمقدار -0.0965).

في دورة مع HMR تنخفض قيمة COP بازدياد T_I لكنها تبقى أعلى مقارنةً بدورة مع HR طالما $T_I < 56^\circ\text{C}$ وذلك بسبب الاسترجاع الكتلي الذي يلي الاسترجاع الحراري، ومن ناحية أخرى تبقى قيمتها أخفض مقارنةً بدورة مع MHR.

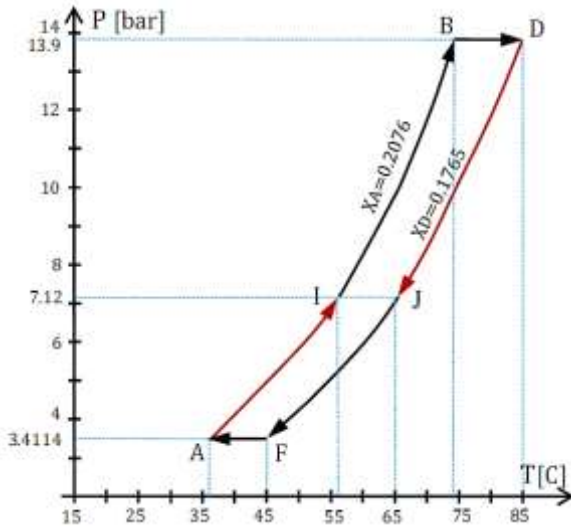


الشكل (5-32) تأثير زيادة T_I في دورات مع RH و RM و RMH على M_{ref} و Q_D و COP .

وبالتالي فإنَّ الدورة مع MHR هي التي تعطي COP و SCP الأعلى مقارنةً بالدورات مع HR ومع MR و مع HMR.

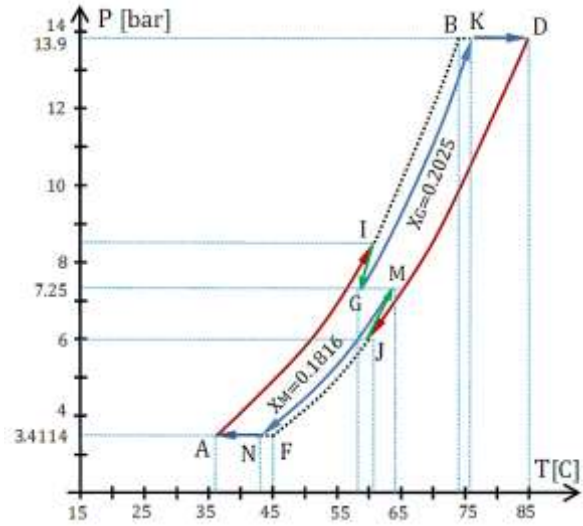


الشكل (a-33-5) دورة مع HMR حيث $T_A < T_I < 56\text{ °C}$.



الشكل (b-33-5) دورة مع HMR حيث

$$T_I = 56\text{ °C}$$



الشكل (c-33-5) دورة مع HMR حيث

$$60.5\text{ °C} \geq T_I > 56\text{ °C}$$

الشكل (33-5) ثلاث حالات مختلفة للاسترجاع الحراري ثم الكتلي.

تم استخدام تقنية MHR في دورة التبريد المدروسة (إجراء استرجاع كتلي ثم استرجاع حراري حتى $T_I = 66\text{ °C}$) وبالتالي تم رفع معامل أداء الدارة من 0.1915 إلى 0.436 أي بنسبة 127.7%، كما تم رفع استطاعة التبريد من 1.993 kW إلى 3.238 kW أي بنسبة 62.5%.

5-6- البرنامج الحاسوبي

■ تم إنشاء برنامج حاسوبي بلغة *visual basic* من أجل مقارنة قيم *COP* و *SCP* وباقي البارامترات الأخرى قبل وبعد كل إجراء من إجراءات تطوير سرير الادمصاص بهدف اختيار الحل الأمثل الذي يحقق قيمة أعلى لكل من *SCP* و *COP*.

■ مدخلات البرنامج الحاسوبي:

1. الشروط الحرارية التصميمية للدّارة من الفقرة 3-4.
2. جدول الإشباع لوسيط التبريد المستخدم (*Ammonia* ، *R134a*) من الملحق 1.
3. جدول الإشباع لسائل نقل الحرارة المستخدم (الماء) من الملحق 1.
4. المواصفات الفيزيوجحرارية للمادة الادمصاصية الصلبة المستخدمة (*ACF - A20* ، *ACG* ، *ACP - MaxsorbIII* ، *ACP - Busofit505*) من الجداول (1-5)، (3-5)، (5-5)، (7-5).
5. معاملات (*D - A*) للزوج العامل المستخدم من الجداول (2-5)، (4-5)، (6-5)، (8-5).
6. الخواص الفيزيوجحرارية لمعادن وعاء الادمصاص من الجدول (2-4).
7. الأبعاد الهندسية المفروضة لوعاء الادمصاص من الجدول (3-4).

■ مخرجات البرنامج الحاسوبي:

- تم إخراج النتائج على شكل جداول ومخططات بيانية تُقارن بين *COP* و *SCP* وباقي بارامترات الدّارة قبل وبعد كل إجراء من إجراءات تطوير سرير الادمصاص.
1. جداول المواصفات الهندسية لكل جزء من أجزاء وعاء الادمصاص (الغلاف، الأنابيب، الرّيش الخارجية، الرّيش النصف قطرية، المادة الادمصاصية).
 2. جدول بيانات لرسم دورة التبريد على مخطط (*P - T - x*) للزوج العامل ضمن شروط التشغيل.
 3. جدول بارامترات نقاط الدّورة (*A, B, D, F, C, E*) وهي (الإنْتالبي والكثافة وضغط الإشباع).
 4. الحسابات الحرارية للدّورة بعد كل إجراء:

$$M_{ref} , M_{ice} , Q_{evap} , Q_{cond} , Q_D , Q_A , (AK)_{tot,h} , (AK)_{tot,c} , \Delta t_D , \Delta t_{reg} , \Delta t_{1/2cycle} , \dot{M}_{ref} , \dot{Q}_{evap} , \dot{Q}_{cond} , \dot{Q}_D , \dot{Q}_A .$$

الفصل السادس

النتائج والتوصيات

6-1- النتائج:

- 1- إنَّ تخفيض درجة حرارة الادمصاص T_A مع ثبات الضغط يؤدي إلى ازدياد قابليّة المادة الادمصاصيّة لاستيعاب كمّيّات أكبر من وسيط التبريد وبالتالي يزداد زمن الادمصاص.
 - 2- إنَّ زيادة الضغط مع ثبات درجة حرارة الادمصاص T_A يؤدي إلى ازدياد قابلية المادة الادمصاصيّة لاستيعاب كمّيّات أكبر من وسيط التبريد.
 - 3- حقّق الزّوج ACG/R134a سعة ادمصاص أعلى من الزّوج ACG/407C عند كافّة أنماط الادمصاص، فعند درجة حرارة ادمصاص 25°C وضغط 70 psi كانت ساعات الادمصاص للزّوجين 0.4125 g/g و 0.2219 g/g على الترتيب، لذلك يُفضّل استخدام R134a وسيطاً للتبريد في دارات التبريد الادمصاصيّة على استخدام الوسيط R407C.
 - 4- في هذا البحث تمّ استخدام الجهاز المخبري لإجراء تجارب ادمصاص عند درجات حرارة من 25°C إلى 55°C ، علماً أنه يمكن إجراء تجارب فصل عند درجات حرارة حتى 85°C كحدّ أقصى نتيجة استخدام الماء كسائل لنقل الحرارة. لكن إجراء تجارب الفصل لعدة مرّات أدّى إلى احتراق المادة العازلة المحيطة بالحساس داخل وعاء الكربون مما أدّى إلى حدوث التسرّب وتوقّف التجربة.
 - 5- في حال استخدام وسيط التبريد نفسه مع مواد ادمصاصيّة مختلفة عندئذٍ فإنّ تغيّر الحسابات الحرارية يتبع لمساميّة المادة الادمصاصيّة.
- كلما كانت المادة الادمصاصيّة ذات مساميّة أعلى فإنّ انتقال الكتلة يتم بشكل أفضل وبالتالي تكون كتلة وسيط التبريد العاملة في الدارة أكبر وينتج عنه قدرة تبريد أعلى. ووُجِدَ أنّه باستخدام الكربون $ACF - A20$ ذي المساميّة الأعلى $\varepsilon = 0.57$ كانت كمّيّة الجليد المنتجة هي الأكبر وتساوي 0.851 kg ، يليه الكربون $MaxsorbIII$ ذو المساميّة $\varepsilon = 0.527$ بكميّة جليد مقدارها 0.748 kg ، يليه الكربون ACG ذو المساميّة $\varepsilon = 0.222$ بكميّة جليد مقدارها 0.288 kg .
- من جهة ثانية تبطّئ المساميّة العالية عملية انتقال الحرارة ما يعني انخفاض معامل انتقال الحرارة الكلي في الوعاء وبالتالي ازدياد زمن نصف الدّورة. ووُجِدَ أنّه باستخدام الكربون $ACF - A20$ كان زمن نصف الدّورة هو الأطول ويساوي 22.19 min ، يليه الكربون $MaxsorbIII$ بزمن 17.39 min ، يليه الكربون ACG بزمن 10.73 min .

■ وتبعاً لذلك حَقَّق استخدام الكربون *MaxsorbIII* مع *R134a* أعلى معامل أداء ويساوي إلى 0.1766 ، يليه الكربون *ACF – A20* ثم *ACG* بمعاملات أداء 0.1662 و 0.0969.

6- في حال تغيير وسيط التبريد عندئذٍ فإنَّ خواصه الفيزيوقحرارية تُؤدِّي دوراً هاماً في تحديد معامل الأداء بالإضافة للخواص الفيزيوقحرارية للمادة الادمصاصية. وُجِدَ أنَّ *Busofit/Ammonia* حَقَّق أعلى معامل أداء ويساوي 0.2093 مقارنة بالأزواج الأخرى كما هو مُوضَّح في الجدول (6-1). ويُلاحظ بالمجمل أنَّ الاستطاعات ومعاملات الأداء صغيرة جداً.

الجدول (6-1): تأثير تغيير الزوج العامل على مؤشرات الأداء لدارة التبريد الادمصاصية.

البارامتر	الواحدة	ACG/R134a	A20/R134a	maxsorb/ R134a	Busofit/ amonia
M_{ads}	kg	10.261	11.855	6.768	18.775
$\dot{Q}_D$	W	1989.7	1657.2	1748.9	2071.6
$\dot{Q}_{evap}$	W	192.82	275.34	308.8	433.64
COP	-	0.0969	0.1662	0.1766	0.2093
SCP	W/kg	18.79	23.23	45.63	23.10

7- إنَّ استخدام ريشة خارجية متعرّجة وزيادة عدد الرِّيش الخارجية على أنابيب المبادل من 50 إلى 150 وإضافة 3 ريش نصف قطرية داخل الأنابيب أدَّى ذلك إلى زيادة مساحة سطح التبادل الحراري وبالتالي زادت استطاعة التبريد بنسبة كبيرة، لكن بالمقابل زادت الكتلة المعدنية لوعاء الادمصاص وبالتالي زادت استطاعة التسخين بنسبة أكبر، وبالنتيجة انخفض معامل الأداء بنسبة ضئيلة كما هو موضَّح في الجدول (6-2).

الجدول (6-2): تأثير زيادة مساحة سطوح التبادل الحراري على مؤشرات الأداء لدارة التبريد الادمصاصية.

البارامتر	الواحدة	نموذج أولي Busofit/ ammonia	استبدال الريشة المسطحة بمتعرجة	زيادة الريش الخارجية من 50 إلى 150	إضافة 3 ريش قطرية	نسبة الزيادة الكلية
$(AK)_{tot,h}$	W/C	207.16	264.35	789.1	1040.72	402.4%
Q_D	kJ	3023.7	3044.3	3274.5	3305.6	9.3%
$\Delta t_{1/2}$	min	24.33	19.19	6.92	5.29	-78.3%
$\dot{Q}_D$	W	2071.6	2643.5	7890.5	10407.2	402.4%
$\dot{Q}_{evap}$	W	433.64	549.6	1525.2	1992.7	359.5%
COP	-	0.2093	0.2079	0.1933	0.1915	-8.5% الفرق -0.0178
SCP	W/kg	23.1	29.3	81.23	106.13	359.5%

8- مقارنة الدورات مع استرجاع حراري وكتلي:

- في دورات مع MR و MHR يُؤدّي استرجاع الكتلة إلى زيادة كتلة وسيط التبريد العاملة في الدارة بسبب انتقال بخار وسيط التبريد من سرير الفصل الساخن إلى سرير الادمصاص البارد نتيجة فرق الضغط بينهما، وكلما زاد فرق الضغط كلما كانت كتلة البخار المنتقلة أكبر. وبالنسبة لزيادة كتلة الجليد المنتجة خلال دورة عمل واحدة.
- في دورة تبريد من دون استرجاع OR يجب رفع درجة حرارة السّير من درجة حرارة الادمصاص إلى درجة حرارة الفصل. بينما في دورات مع HR و MHR يتم إنجاز تبريد مسبق للسّير الساخن وتسخين مسبق للسّير البارد وبذلك ينقص استهلاك الحرارة من مصدر التسخين الخارجي.
- في دورة مع MHR يتم الحصول على ميزات الاسترجاع الكتلي والحراري حيث تمّ تحقيق أعلى استطاعة تبريد وأعلى معامل أداء مقارنةً بدورات مع HR و MR كما هو موضح في الجدول (3-6). (علماً أنّ نسبة الزيادة في بارامترات دورات الاسترجاع الثلاثة محسوبة بالنسبة للدورة الأساسية).

الجدول (3-6): تأثير عمليات الاسترجاع على استطاعة التبريد ومعامل الأداء للدورة.

البارامتر	الواحدة	OR	HR	$\Delta\%$	MR	$\Delta\%$	MHR	$\Delta\%$
M_{ice}	Kg	1.469	1.469	0%	2.286	55.6%	2.286	55.6%
$\Delta t_{1/2}$	min	5.29	4.34	-18%	5.47	3.3%	5.07	-4.2%
$\dot{Q}_D$	kW	10.407	7.959	-23.5%	8.496	-18.4%	7.426	-28.7%
$\dot{Q}_{evap}$	kW	1.993	2.429	21.9%	3.004	50.7%	3.238	62.5%
COP	-	0.1915	0.3052	59.4%	0.3535	84.6%	0.4360	127.7%
				فرق 0.1137		فرق 0.162		فرق 0.2445
SCP	W/kg	106.13	129.37	21.9%	159.97	50.7%	172.44	62.5%

- 9- إنّ قدرة التبريد (الإنتاج التبريدي) في دورة مع HMR أعلى مقارنةً بدورة مع HR بسبب الزيادة في كتلة وسيط التبريد الذي تُحقّقه عملية الاسترجاع الكتلي، وهي أخفض مقارنةً بدورة مع MHR لأنّ إجراء عملية استرجاع حراري أولاً تُخفّض فرق الضغط بين السّيرين مما يُخفّض فعالية عملية الاسترجاع الكتلي اللاحقة. وإنّ قيمة معامل الأداء في دورة مع HMR أعلى مقارنةً بدورة HR، وأخفض مقارنةً بدورة مع MHR.

6-2- مقارنة نتائج الأطروحة مع نتائج أبحاث سابقة:

(1) مقارنة نتائج بحثنا مع نتائج Kulkarni&Kapatkar [1] (2016) الموضحة في الجدول (4-6)

الجدول (4-6): نتائج بحث Kulkarni& Kapatkar .

عند درجة حرارة فصل 100 °C
باستخدام الزوج ACG/410a كان معامل الأداء $COP = 0.11$
باستخدام الزوج ACG/R134a كان $COP = 0.2$
عند درجة حرارة فصل 150 °C
باستخدام الزوج ACG/R410a كان معامل الأداء $COP = 0.152$
وباستخدام الزوج ACG/R143a كان $COP = 0.255$

كان معامل أداء الدارة في بحثنا باستخدام وسيط التبريد R134a مع ACG أقل منه مقارنة بنتائج Kulkarni لأن معامل الأداء يزداد بازدياد درجة حرارة الفصل، حيث كانت درجة حرارة الفصل في بحثنا 85°C بينما في بحث Kulkarni كانت 100°C وما فوق كما هو موضح في الجدول (5-6).
التعليق: إنَّ زيادة درجة حرارة الفصل (مع بقاء درجة حرارة الادمصاص ثابتة) يؤدي إلى تغيير أكبر في تركيز المادة المدمصة في السريبر وبالتالي تصبح كتلة وسيط التبريد العاملة في الدارة أكبر، وهذا يعني إنتاج تبريدي أعلى وبالتالي معامل أداء أعلى.

الجدول (5-6) مقارنة نتائج بحثنا مع نتائج بحث Kulkarni& Kapatkar .

COP	درجة حرارة الفصل	الزوج العامل	
0.2	100 °C	ACG/R134a	Kulkarni(2016)
0.0969	85 °C	ACG/R134a	بحثنا

(2) مقارنة نتائج بحثنا مع نتائج Shabir&Sultan [2] (2018) الموضحة في الجدول (6-6) :

الجدول (6-6) نتائج بحث Shabir&Sultan .

باستخدام Dezorex /methanol هي: $SCE = 128.8 \text{ kJ/kg}$ ، $COP = 0.57$
باستخدام Supersorbon/methanol هي: $SCE = 180.1 \text{ kJ/kg}$ ، $COP = 0.64$

كانت معاملات الأداء في بحث Shabir أكبر بكثير مقارنةً بمعاملات بحثنا بالرغم من أنَّ الإنتاج التبريدي للأمونيا أكبر منه للميثانول (الحرارة الكامنة لتبخر الأمونيا عند ضغط جوي 1at هي 1368 kJ/kg بينما للميثانول هي 1100 kJ/kg) لكنَّ استخدام أنواع الكربون المعدَّل أدَّى للحصول على معاملات أداء أعلى.

3) مقارنة نتائج بحثنا مع نتائج Wang&Li [3] (2003) الموضحة في الجدول (6-7):

الجدول (6-7): مقارنة نتائج بحثنا مع نتائج Wang&Li.

بحثنا	Wang(2003)	
دائرة تبريد بدون استرجاع	دائرة تبريد بدون استرجاع تستخدم الوعاء 3	دائرة التبريد المستخدمة
Busofit / أمونيا	كربون منشط مقسّى / ميثانول	الزوج العامل
18.775	60	كمية الكربون [kg]
خليطة ألومنيوم T81 2545	ستانلس ستيل 3822	معادن الغلاف [kJ/m ³ .°C] (ρ. Cp)
خليطة ألومنيوم T6 2447	نحاس 3440	معادن الأنابيب [kJ/m ³ .°C] (ρ. Cp)
1.989	21.34	استطاعة التسخين [kW]
433.64	1580	استطاعة التبريد [W]
0.2093	0.074	COP
23.1	26.33	SCP [W/kg]

نلاحظ في بحث Wang أنّ معاملات الأداء منخفضة جداً حيث تمّ الحصول على أعلى معامل أداء باستخدام الوعاء 3 وكانت قيمته $COP = 0.074$ ، بينما في بحثنا وعند استخدام الزوج الادمصاصي Busofit/ Ammonia تمّ الحصول على قيمة أعلى $COP = 0.2093$.

التعليق: استخدم Wang في بحثه الستانلس ستيل في تصنيع الوعاء واستخدم النحاس في تصنيع أنابيب المبادل. تمتاز هذه المعادن بحمل حراري عالي لوادة الحجم $(\rho. c_p)$ وقيمته للستانلس ستيل $3822 \text{ kJ/m}^3.^\circ\text{C}$ و للنحاس $3440 \text{ kJ/m}^3.^\circ\text{C}$ وبالتالي أدى ذلك إلى ازدياد استطاعة التسخين الواجب تقديمها للسريز لرفع درجة حرارته إلى الدرجة المطلوبة ما أدى إلى انخفاض معامل الأداء، بينما في بحثنا استخدمنا خلاط ألومنيوم نوع T6 و T81 حيث الحمل الحراري لوادة الحجم لها $2447 \text{ kJ/m}^3.^\circ\text{C}$ و $2545 \text{ kJ/m}^3.^\circ\text{C}$ على الترتيب وهذا أدى إلى انخفاض استطاعة التسخين وبالتالي ازدياد معامل الأداء مقارنةً ببحث Wang.

4) مقارنة نتائج بحثنا بعد إجراء استرجاع كتلي وحراري مع نتائج Wang [13] (2008):

كانت نسبة الزيادة في قيم كل من COP و SCP نتيجة عملية الاسترجاع MHR (بالنسبة لقيمهم بدون استرجاع 0R) في بحثنا أعلى منها مقارنةً ببحث Wang (2008) كما هو موضح في الجدول (8-6):

الجدول (8-6): مقارنة نتائج بحثنا بعد إجراء استرجاع كتلي وحراري مع نتائج Wang.

تحسن COP						
	الزوج المستخدم	درجة الفصل	COP(0R)	COP(MHR)	الفرق ΔCOP	$\Delta COP\%$
بحثنا	كربون Busofit / أمونيا	85°C	0.1915	0.436	0.2445	127.7%
Wang (2008)	كربون مركّب / أمونيا	145°C	0.15	0.22	0.07	46.7%
تحسن SCP [W/kg _{ads}]						
	الزوج المستخدم	درجة الفصل	SCP(0R)	SCP(MHR)	$\Delta SCP\%$	
بحثنا	كربون Busofit / أمونيا	85°C	129.37	172.44	62.5%	
Wang (2008)	كربون مركّب / أمونيا	145°C	286.4	367.8	28.4%	

التعليق: كلما زادت درجة حرارة الفصل انخفض تركيز المادة المدمصة في السرير في نهاية عملية الفصل، وبالتالي في عملية الاسترجاع الكتلي تقل كمية بخار وسيط التبريد المنتقلة من سرير الفصل الساخن إلى سرير الادمصاص البارد وبالتالي ينخفض مقدار الزيادة في كمية وسيط التبريد العاملة في الدارة وبالتالي ينخفض مقدار الزيادة في استطاعة التبريد ومعامل الأداء.

5) مقارنة نتائج بحثنا بعد إجراء استرجاع كتلي وحراري مع نتائج Duong&Hong [4] (2017):

تمت المقارنة عند درجة حرارة فصل 85°C كما هو موضح في الجدول (9-6):

الجدول (9-6): مقارنة نتائج بحثنا بعد إجراء استرجاع كتلي وحراري مع نتائج Duong&Hong.

البارامتر	الواحدة	OR	$\Delta\%$ بعد HR	$\Delta\%$ بعد MR	القيمة بعد MHR	$\Delta\%$ بعد MHR
COP (بحثنا)		0.1915	59.4%	84%	0.436	127.7%
						فرق 0.2445
COP (Duong)	-	0.437	12%	5.5%	0.531	21.5%
						فرق 0.094
SCP (بحثنا)	W/kg	106.13	21.9%	50.7%	172.44	62.5%
SCP (Duong)	W/kg	116	-8%	16%	121.8	5%

1. إن معامل الأداء لدارة التبريد الأساسية في بحث Duong أكبر بكثير مقارنةً ببحثنا وذلك لأن درجة حرارة التبخر عند Duong عالية ($T_{evap} = 15^\circ C$) مقارنةً ببحثنا ($T_{evap} = -6^\circ C$).

ودرجة حرارة التكاثف عنده ($T_{cond} = 30\text{ °C}$) أخفض مقارنةً ببحثنا ($T_{cond} = 36\text{ °C}$) كما أنّ الإنتاجية التبريدية للماء أكبر منها للأمونيا.

2. إنّ مقدار الزيادة في COP و SCP بعد إجراء عملية MR و MHR أقل بكثير مقارنةً ببحثنا ويعود ذلك لسببين:

i. تزداد كتلة البخار المنتقلة خلال عملية الاسترجاع الكتلي بازدياد فرق الضغط بين الوعاءين.

- عند Duong كان الفارق صغيراً

$$T_{evap} = 15\text{ °C} \rightarrow P_{evap} = 17.1\text{ mbar}$$

$$T_{cond} = 30\text{ °C} \rightarrow P_{cond} = 42.5\text{ mbar}$$

أي أنّ ضغط التكاثف أكبر من ضغط التبخر بـ 2.49 مرة.

- في بحثنا الفارق أكبر

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

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

أي أنّ ضغط التكاثف أكبر من ضغط التبخر بـ 4.1 مرة.

لذلك كانت كتلة البخار المنتقلة في بحثنا أكبر بكثير وهذا ما جعل نسبة الزيادة المئوية في COP و SCP في بحثنا أكبر بكثير مقارنةً ببحث Duong.

ii. أيضاً هناك سبب جوهري لهذه النتائج هو طريقة المقارنة التي اعتمدها Duong ، حيث تمّ تقييم عملية الاسترجاع الحراري والاسترجاع الكتلي وذلك بتنشيط زمن الدورة (14 min) ومن ثمّ انقاص زمن (الادمصاص - فصل) بمقدار الزمن المطلوب للاسترجاع، وبالتالي يتحدد الأداء الكلي بمعاملين.

a. تحسين الأداء تبعاً لعملية الاسترجاع.

b. انخفاض الأداء تبعاً لانخفاض زمن (الادمصاص - فصل).

لاحظنا أنّه كان لكل بحث منهجية خاصة لرفع كلاً من استطاعة التبريد و COP و SCP ، وكذلك انتهجنا في بحثنا طريقاً مختلفاً لرفع هذه المؤشرات.

6-3- الاستنتاجات والتوصيات

- 1- يُنصَح باستخدام الزوج Maxsorb/R134a في برادات حفظ اللقاحات والأغذية التي تستخدم في الأماكن النائية كونه حقق معامل الأداء الأعلى مقارنة بالزوجين A20/R134a و ACG/R134a من جهة، ومن جهة ثانية بسبب كون الفريونات غير سامة بينما غاز الأمونيا شديد السميّة ويحتاج لمختص صيانة في حال حدوث تسرب وهذا غير متوفر في الأماكن النائية.
- 2- يُنصَح استخدام مواد مركبة أو مقساة أو معدلة بالأحماض، فهذه المواد تتميز بالتوصيل الحراري العالي والذي يمكن أن يعتبر كأكثر الحلول الواعدة لتحسين انتقال الحرارة ضمن سرير الادمصاص.
- 3- إنّ زيادة سطح المبادل كان له الدور الأكبر في زيادة SCP بنسبة 359.5% بينما أدّى إلى نقص COP بنسبة قليلة 8.5%-،. لذلك يُنصَح بزيادة مساحة منطقة التبادل الحراري بتحسين عملية تريبش المبادل أو باستخدام المبادلات الحرارية الصفائحية.
- 4- لا يُنصَح بعملية تريبش ضمن أنابيب المبادل لأنها تؤدي إلى زيادة فاقد الضغط بشكل كبير مما يؤدي إلى وجوب زيادة استطاعة الضخ.
- 5- كان لعملية الاسترجاع الكتلي ثمّ الحراري الدور الأساسي في زيادة COP بنسبة 127.7% بالإضافة إلى أنّها أدّت إلى زيادة في SCP بنسبة 62.5% ، لذلك يُنصَح بتسلسل MHR بالرغم من أنّه يُؤدّي إلى تعقيد نظام التحكم لكن بالمقابل يتم رفع استطاعة التبريد ومعامل أداء الدارة بمقدارٍ معتبر.
- 6- لا يُنصَح باستخدام تسلسل HMR وذلك لأنّ دورة مع MR تُحقّق قدرة تبريد ومعامل أداء أعلى للدّارة ولا تُؤدّي إلى تعقيد نظام التحكم.
- 7- أخيراً يُنصَح باستخدام كافة إجراءات تطوير الوعاء للحصول على معامل أداء COP أعلى باستهلاك حراري أقل، وللحصول على استطاعة تبريد نوعية SCP أعلى بكتلة وحجم أقل للمادة الادمصاصيّة. الهدف من ذلك هو تخفيض الكلفة التأسيسية للأنظمة الادمصاصيّة لتصبح رديفاً جيداً للأنظمة التبريد المختلفة.

المراجع

- [1] Kulkarni, P.P., Kapatkar, V.N., Lohokare, A. C., (2016), “Design and comparative analysis of adsorption refrigeration system for refrigerants R-134a and R-410a” , International Journal of Current Engineering and Technology.
- [2] Shabir, F., Sultan, M., Shamshiri, R. R., Khan, Z. M., (2018) “Investigation of carbon based adsorbents for the development of thermally-driven adsorption cooling systems”, Conference Series: Materials Science and Engineering.
- [3] Wang, L.W., Wu, J.Y., Xu, Y.X., Wang, S.G., Li, X.R., (2003) “Study of the performance of activated carbon–methanol adsorption systems concerning heat and mass transfer”, Applied Thermal Engineering 23, 1605–1617.
- [4] 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.
- [5] Stefanski, S., Mika, L., Sztekler, K., Kalawa, W., Lis, L., Nowak, W., (2018) “Adsorption bed configurations for adsorption cooling application” , Energy and Fuels.
- [6] 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 and Sustainable Energy Reviews 5, 313–342.
- [7] Shabir, F., Sultan, M., Miyazaki, T., Shamshiri, . R. R., Niaz, Y., Khan, Z. M., (2018) “Overview of equilibrium adsorption uptake by adsorbent–refrigerant pairs for adsorption cooling application” , 5th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development.
- [8] Shmroukh, A. N., Ali, A. H., Abel-Rahman, A. K., Ookwara, S., (2015) “Experimental Investigation on Adsorption Capacity of a Variety of Activated Carbon/Refrigerant Pairs” , Journal of Engineering Research and Applications 5, 66-76.
- [9] Astina, I., Zidni, M. I., Hasugian, H. R., Darmanto, P. S., (2018) “Experiment of adsorption refrigeration system with working pairs of difluoromethane and activated carbon modified by sulfuric and nitric acids” , International Conference on Thermal Science and Technology.

- [10] Palomba, V., Vasta, S., Giacoppo, G., Calabrese, L., Gulli, G., La Rosa, D., Freni, A., (2015) “Design of an innovative graphite exchanger for adsorption heat pumps and chillers” , Science Direct, Energy Procedia 81, 1030 – 1040.
- [11] 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.
- [12] kabir, K. M., Alam, K. C., Sarker, M. M., Rouf, R. A., (2016) “The Effect of Mass Recovery Adsorption Cooling Cycle to Optimize the Collector Number and Time Allocation” , International Conference on Mechanical Engineering.
- [13] 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.
- [14] J, White,J,(2010) “Literature Review On Adsorption Cooling Technology”, School of Engineering University of Birmingham UK.
- [15] Wang, R.Z., Oliveira, R.G., (2006), “Adsorption refrigeration—An efficient way to make good use of waste heat and solar energy”, Progress in Energy and Combustion Science 32 , 424–458.
- [16] Ramos, M., Espinoza, R., Horn, M., (2003), “Evaluation Of A Zeolite-Water Solar Adsorption Refrigerator”, ISES Solar World Congress.
- [17] Henning, H., (2000), “Air Conditioning with Solar Energy”, Fraunhofer-Institut for Solare Energiesysteme ISE, Freiburg/Germany.
- [18] Henning, H., (2007), “olar Air-Conditioning and Refrigeration - Introduction”, Fraunhofer-Institut for Solare Energiesysteme ISE, Freiburg/Germany.
- [19] Best, R., (2008), “Recent Developments In Thermal Driven Cooling And Refrigeration Systems”, European Conference on Polygeneration.
- [20] Bakker, E. J., Boer, R., (2010), “Devlopment of a new 2.5 kW adsorption cooling”, Energy research Centre of the Netherlands (ECN).
- [21] Chorowski, M., Pyrka, P., (2015), “Modelling and experimental investigation of an adsorption chiller using low-temperature heat from cogeneration”, ScienceDirect Energy.

- [23] Lewis, J. S., Chaer, I., 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.
- [24] Soong, L. W., (2010) “Experimental and theoretical studies of waste heat driven pressurized adsorption chillers” , PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering , National University of Singapore, pp.200.
- [25] Pridasawas, W., (2006) “Solar-Driven Refrigeration Systems with Focus on the Ejector Cycle” , Doctoral Thesis, Department of Energy Technology, School of Industrial Engineering and Management, Stockholm, pp.286.
- [26] Sumathy, K., Yeung, K.H., Yong, L., (2003) “Technology development in the solar adsorption refrigeration systems” , Science Direct, Progress in Energy and Combustion Science 29, 301–327.
- [27] Demir, H., Mobedi, M., Ulku, S., (2008) “A review on adsorption heat pump: Problems and solutions” , Science Direct, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12, 2381–2403.
- [28] Boubakri, A., (2005) “Performance of an adsorptive solar ice maker operating with a single double function heat exchanger (evaporator/condenser)” , Science Direct, Renewable Energy 31, 1799–1812.
- [29] Askalany, A. A., Salem, M., Ismael, I. M., Ali, A. H., Morsy, M. G., (2013) “An overview on adsorption pairs for cooling” , Science Direct, Renewable and Sustainable Energy Reviews 19, 565–572.
- [30] Askalany, A., Habib, K., Ghazy, M., Assadi, M. K., (2016) “Adsorption cooling system employing activated carbon/HFC410a adsorption pair” , Journal of Engineering and Applied Sciences.
- [31] Telto, Z. T., (2016) “Novel method using Dubinin-Astakhov theory in sorption reactor design for refrigeration and heat pump applications” , Science Direct, Applied Thermal Engineering 107, 1123–1129.
- [32] Sharkawy, I. I., Hassan, M., Saha, B. B., Koyama, S., Nasr, M., (2009) “Study on adsorption of methanol onto carbon based adsorbents” , Science Direct, International Journal of Refrigeration 32, 1579 – 1586.
- [33] 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.

- [34] Wang, R. Z., (2001) “Performance improvement of adsorption cooling by heat and mass recovery operation” , International Journal of Refrigeration 24, 602 – 611.
- [35] Anyanwu, E. E., (2004) “Review of solid adsorption solar refrigeration II: An overview of the principles and theory” , Energy Conversion and Management 45, 1279–1295.
- [36] Suzuki, M., (1990) “Adsorption Engineering” , kodansha LTD., Tokyo.
- [37] Jin, Z., Zhao, G., (2014) “Porosity evolution of activated carbon fiber prepared from liquefied wood” , BioResources 9, 2237-2247.
- [38] Younes , M. M., EL-Sharkawy , I. I., Kabeel , A., Saha , B. B., (2016) “A review on adsorbent-adsorbate pairs for cooling applications”, Applied Thermal Engineering.
- [39] Elsayed, A. M., Askalany, A. A., . Shea, A. D., Dakkama, H. J., Mahmoud, S., Dadah, R., Kaialy, W., (2017) “A state of the art of required techniques for employing activated carbon in renewable energy powered adsorption applications” , University of Bath.
- [40] Wang, L. W., Wang, R. Z., Lu, Z. S., Chen, C. J., Wang, K., Wu, J. Y., (2006) “The performance of two adsorption ice making test units using activated carbon and a carbon composite as adsorbents” , Science Direct, Carbon 44, 2671–2680.
- [41] Bergman, T. L., Lavine, A. S., (2015) “Fundamentals of heat and mass transfer” , 8th ed. Wiley.
- [42] Lambert, M. A., (2007) “Design of solar powered adsorption heat pump with ice storage” , Science Direct, Applied Thermal Engineering 27, 1612–1628.
- [43] Shmroukh, A. N., Ali, A. H., Abel-Rahman, A. K., Ookwara, S., (2015) “Investigation of Heat and Mass Transfer in Activated Carbon Granules/R-134a Adsorbent Pair for Compact Adsorption Chiller”, Research Gate.
- [44] Kılıç, M., Gönül, E., (2016) “Adsorption characteristics evaluation of R134A and R404A on different adsorbents”, Research Gate, Bulgarian Chemical Communications 48, 306 – 311.
- [46] Lee, H., (2011) “Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells” , Wiley.
- [47] Diallo, S. O., (2016) “Pore-size dependence and characteristics of water diffusion in slit-like micropores” , Chemical and Engineering Materials.

[48] Saha, B. B., Sharkawy, I. I., Thorpe, R., Critoph, R. E., (2012). “Accurate adsorption isotherms of R134a onto activated carbons for cooling and freezing applications”. Science Direct, International Journal of Refrigeration 35, 499-505.

[49] Habib, K., Saha, B. B., Rahman, K. A., Chakraborty, A., Koyama, S., Choon, K., (2010) “Experimental study on adsorption kinetics of activated carbon/R134a and activated carbon/R507A pairs” , Science Direct, International Journal of Refrigeration 33, 706-713.

[50] Vasiliev, L. L., (2003) “Solar sorption refrigerator” , Research Gate.

المراجع العربية

[22] مخير نديم، (2008) ” آلات التبريد“، جامعة دمشق.

[45] مخير نديم، (1982) ” انتقال الحرارة“، جامعة دمشق.

ملحق 1 – جدول الإشباع لوسيط التبريد R134a

Thermophysical Properties of Refrigerants									
Ref 134a (1,1,1,2-Tetrafluoroethane) Properties of Saturated Liquid and Vapor									
Tem	Pressure	Density	Volume	Enthalpy		Viscosity		Thermal Cond	
°C	MPa	kg/m ³	m ³ /kg	kJ/kg		μPa.s		mW/m.K	
		liquid	vapor	liquid	vapor	liquid	vapor	liquid	vapor
-20	0.13273	1358.3	0.14739	173.64	386.55	353.00	9.92	101.1	9.82
-18	0.14460	1352.1	0.13592	176.23	387.79	343.50	10.01	100.1	9.98
-16	0.15728	1345.9	0.12551	178.83	389.02	334.30	10.09	99.2	10.15
-14	0.17082	1339.7	0.11605	181.44	390.24	325.40	10.17	98.3	10.32
-12	0.18524	1333.4	0.10744	184.07	391.46	316.90	10.25	97.4	10.49
-10	0.20060	1327.1	0.09959	186.70	392.66	308.60	10.33	96.5	10.66
-8	0.21693	1320.8	0.09242	189.34	393.87	300.60	10.41	95.6	10.83
-6	0.23428	1314.3	0.08587	191.99	395.06	292.90	10.49	94.7	11.00
-4	0.25268	1307.9	0.07987	194.65	396.25	285.40	10.57	93.8	11.17
-2	0.27217	1301.4	0.07436	197.32	397.43	278.10	10.65	92.9	11.34
0	0.29280	1294.8	0.06931	200.00	398.60	271.10	10.73	92.0	11.51
2	0.31462	1288.1	0.06466	202.69	399.77	264.30	10.81	91.1	11.69
4	0.33766	1281.4	0.06039	205.40	400.92	257.60	10.90	90.2	11.86
6	0.36198	1274.7	0.05644	208.11	402.06	251.20	10.98	89.4	12.04
8	0.38761	1267.9	0.05280	210.84	403.20	244.90	11.06	88.5	12.22
10	0.41461	1261.0	0.04944	213.58	404.32	238.80	11.15	87.6	12.40
12	0.44301	1254.0	0.04633	216.33	405.43	232.90	11.23	86.7	12.58
14	0.47288	1246.9	0.04345	219.09	406.53	227.10	11.32	85.9	12.77
16	0.50425	1239.8	0.04078	221.87	407.61	221.50	11.40	85.0	12.95
18	0.53718	1232.6	0.03830	224.66	408.69	216.00	11.49	84.1	13.14
20	0.57171	1225.3	0.03600	227.47	409.75	210.70	11.58	83.3	13.33
22	0.60789	1218.0	0.03385	230.29	410.79	205.50	11.67	82.4	13.53
24	0.64578	1210.5	0.03186	233.12	411.82	200.40	11.76	81.6	13.72
26	0.68543	1202.9	0.03000	235.97	412.84	195.40	11.85	80.7	13.92
28	0.72688	1195.2	0.02826	238.84	413.84	190.50	11.95	79.8	14.13
30	0.77020	1187.5	0.02664	241.72	414.82	185.80	12.04	79.0	14.33
32	0.81543	1179.6	0.02513	244.62	415.78	181.10	12.14	78.1	14.54
34	0.86263	1171.6	0.02371	247.54	416.72	176.60	12.24	77.3	14.76
36	0.91185	1163.4	0.02238	250.48	417.65	172.10	12.34	76.4	14.98
38	0.96315	1155.1	0.02113	253.43	418.55	167.70	12.44	75.6	15.21
40	1.01660	1146.7	0.01997	256.41	419.43	163.40	12.55	74.7	15.44
42	1.07220	1138.2	0.01887	259.41	420.28	159.20	12.65	73.9	15.68
44	1.13010	1129.5	0.01784	262.43	421.11	155.10	12.76	73.0	15.93
46	1.19030	1120.6	0.01687	265.47	421.92	151.00	12.88	72.1	16.18
48	1.25290	1111.5	0.01595	268.53	422.69	147.00	13.00	71.3	16.45
50	1.31790	1102.3	0.01509	271.62	423.44	143.10	13.12	70.4	16.72
52	1.38540	1092.9	0.01428	274.74	424.15	139.20	13.24	69.6	17.01
54	1.45550	1083.2	0.01351	277.89	424.83	135.40	13.37	68.7	17.31
56	1.52820	1073.4	0.01278	281.06	425.47	131.60	13.51	67.8	17.63
58	1.60360	1063.2	0.01209	284.27	426.07	127.90	13.65	67.0	17.96
60	1.68180	1052.9	0.01144	287.50	426.63	124.20	13.79	66.1	18.31
62	1.76280	1042.2	0.01083	290.78	427.14	120.60	13.95	65.2	18.68
64	1.84670	1031.2	0.01024	294.09	427.61	117.00	14.11	64.3	19.07
66	1.93370	1020.0	0.00969	297.44	428.02	113.50	14.28	63.4	19.50
68	2.02370	1008.3	0.00916	300.84	428.36	109.90	14.46	62.6	19.95
70	2.11680	996.2	0.00865	304.28	428.65	106.40	14.65	61.7	20.45
72	2.21320	983.8	0.00817	307.78	428.86	102.90	14.85	60.8	20.98
74	2.31300	970.8	0.00771	311.33	429.00	99.50	15.07	59.9	21.56
76	2.41610	957.3	0.00727	314.94	429.04	96.00	15.30	59.0	22.21
78	2.52280	943.1	0.00685	318.63	428.98	92.50	15.56	58.1	22.92
80	2.63320	928.2	0.00645	322.39	428.81	89.00	15.84	57.2	23.72
85	2.92580	887.2	0.00550	332.22	427.76	80.20	16.67	54.9	26.22
90	3.24420	837.8	0.00461	342.93	425.42	70.90	17.81	52.8	29.91
95	3.59120	772.7	0.00374	355.25	420.67	60.40	19.61	51.7	36.40
100	3.97240	651.2	0.00268	373.30	407.68	45.10	24.21	59.9	60.58
101.06	4.05930	511.9	0.00195	389.64	389.64	—	—	∞	∞

ملحق 1 – جدول الإشباع لوسيط التبريد R407C

Thermophysical Properties of Refrigerants						
Ref 407C [R-32/125/134a (23/25/52)] Properties of Liquid on Bubble Line and Vapor on Dew Line						
Tem		Pressure	Density	Volume		Enthalpy
°C	°C	MPa	kg/m3	m3/kg	kJ/kg	
Bubble	Dew		liquid	vapor	liquid	vapor
-28.41	-21.69	0.2	1333	0.11347	160.87	398.22
-26.09	-19.41	0.22	1325.5	0.10362	163.99	399.47
-23.93	-17.29	0.24	1318.4	0.09536	166.91	400.62
-21.9	-15.31	0.26	1311.8	0.08833	169.65	401.69
-19.99	-13.43	0.28	1305.5	0.08227	172.24	402.69
-18.19	-11.66	0.3	1299.5	0.07699	174.71	403.62
-16.47	-9.98	0.32	1293.7	0.07235	177.06	404.49
-14.83	-8.38	0.34	1288.2	0.06824	179.3	405.32
-13.27	-6.85	0.36	1282.9	0.06457	181.45	406.1
-11.77	-5.38	0.38	1277.8	0.06127	183.52	406.85
-10.33	-3.97	0.4	1272.8	0.0583	185.52	407.55
-8.94	-2.61	0.42	1268	0.05559	187.44	408.23
-7.61	-1.31	0.44	1263.4	0.05313	189.3	408.87
-6.31	-0.04	0.46	1258.8	0.05087	191.11	409.48
-5.06	1.18	0.48	1254.4	0.04879	192.86	410.07
-3.85	2.36	0.5	1250.1	0.04687	194.56	410.64
-0.98	5.17	0.55	1239.8	0.04267	198.61	411.95
1.7	7.79	0.6	1230	0.03915	202.42	413.15
4.22	10.24	0.65	1220.7	0.03615	206.02	414.25
6.6	12.56	0.7	1211.7	0.03356	209.44	415.25
8.85	14.76	0.75	1203.1	0.03131	212.71	416.18
11	16.85	0.8	1194.9	0.02933	215.83	417.03
13.04	18.84	0.85	1186.8	0.02757	218.83	417.83
15	20.74	0.9	1179.1	0.026	221.71	418.57
16.88	22.56	0.95	1171.5	0.0246	224.5	419.25
18.69	24.32	1	1164.1	0.02332	227.19	419.89
22.11	27.63	1.1	1149.9	0.02111	232.34	421.03
25.3	30.73	1.2	1136.2	0.01926	237.2	422.03
28.3	33.63	1.3	1123	0.01768	241.82	422.89
31.14	36.37	1.4	1110.2	0.01631	246.24	423.63
33.83	38.97	1.5	1097.7	0.01512	250.48	424.27
36.39	41.43	1.6	1085.5	0.01408	254.57	424.8
38.84	43.78	1.7	1073.5	0.01315	258.51	425.25
41.18	46.03	1.8	1061.7	0.01231	262.33	425.61
43.43	48.18	1.9	1050	0.01157	266.05	425.89
45.59	50.25	2	1038.5	0.01089	269.66	426.1
47.67	52.24	2.1	1027.1	0.01027	273.19	426.23
49.68	54.15	2.2	1015.7	0.00971	276.64	426.29
51.63	56	2.3	1004.4	0.00919	280.02	426.28
53.51	57.79	2.4	993.1	0.00871	283.34	426.2
55.34	59.51	2.5	981.8	0.00827	286.6	426.06
57.11	61.19	2.6	970.5	0.00786	289.82	425.85
58.83	62.81	2.7	959	0.00747	292.99	425.57
60.51	64.38	2.8	947.5	0.00711	296.12	425.21
62.14	65.91	2.9	935.9	0.00677	299.23	424.79
63.73	67.4	3	924.1	0.00645	302.31	424.29
66.8	70.25	3.2	899.9	0.00587	308.43	423.06
69.73	72.94	3.4	874.6	0.00533	314.54	421.46
72.53	75.5	3.6	847.6	0.00484	320.71	419.45
75.22	77.92	3.8	818.1	0.00439	327.02	416.91
77.82	80.21	4	785.1	0.00395	333.64	413.66
80.32	82.37	4.2	746	0.00352	340.83	409.34
86.03	86.03	4.63	484.2	0.00207	378.48	378.48

ملحق 1 – جدول الإشباع لوسيط التبريد Ammonia

Thermophysical Properties of Refrigerants									
Refrigerant 717 (Ammonia) Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor									
Tem	Pressure	Density	Volume	Enthalpy		Viscosity		Thermal Cond	
°C	MPa	kg/m ³	m ³ /kg	kJ/kg		μPa.s		mW/m.K	
		liquid	vapor	liquid	vapor	liquid	vapor	liquid	vapor
-26	0.14457	672.8	0.80614	81.52	1429.21	231.4	8.27	641.5	21.38
-24	0.15864	670.3	0.73896	90.51	1432.08	225.5	8.33	634.9	21.51
-22	0.17379	667.7	0.67840	99.52	1434.91	219.8	8.39	628.4	21.63
-20	0.19008	665.1	0.62373	108.55	1437.68	214.4	8.45	622.0	21.77
-18	0.20756	662.6	0.57428	117.60	1440.39	209.2	8.51	615.5	21.90
-16	0.22630	660.0	0.52949	126.67	1443.06	204.2	8.57	609.1	22.05
-14	0.24637	657.3	0.48885	135.76	1445.66	199.3	8.63	602.8	22.19
-12	0.26782	654.7	0.45192	144.88	1448.21	194.7	8.69	596.4	22.35
-10	0.29071	652.1	0.41830	154.01	1450.70	190.2	8.75	590.1	22.50
-8	0.31513	649.4	0.38767	163.16	1453.14	185.9	8.81	583.9	22.67
-6	0.34114	646.7	0.35970	172.34	1455.51	181.7	8.87	577.7	22.83
-4	0.36880	644.0	0.33414	181.54	1457.81	177.7	8.93	571.5	23.00
-2	0.39819	641.3	0.31074	190.76	1460.06	173.8	8.99	565.3	23.18
0	0.42938	638.6	0.28930	200.00	1462.24	170.1	9.06	559.2	23.37
2	0.46246	635.8	0.26962	209.27	1464.35	166.5	9.12	553.1	23.55
4	0.49748	633.1	0.25153	218.55	1466.40	162.9	9.18	547.1	23.75
6	0.53453	630.3	0.23489	227.87	1468.37	159.5	9.24	541.1	23.95
8	0.57370	627.5	0.21956	237.20	1470.28	156.2	9.30	535.1	24.15
10	0.61505	624.6	0.20543	246.57	1472.11	153.0	9.36	529.1	24.37
12	0.65866	621.8	0.19237	255.95	1473.88	149.9	9.43	523.2	24.58
14	0.70463	618.9	0.18031	265.37	1475.56	146.9	9.49	517.3	24.81
16	0.75303	616.0	0.16914	274.81	1477.17	144.0	9.55	511.5	25.04
18	0.80395	613.1	0.15879	284.28	1478.70	141.1	9.61	505.6	25.27
20	0.85748	610.2	0.14920	293.78	1480.16	138.3	9.68	499.9	25.52
22	0.91369	607.2	0.14029	303.31	1481.53	135.6	9.74	494.1	25.77
24	0.97268	604.3	0.13201	312.87	1482.82	133.0	9.80	488.4	26.03
26	1.03450	601.3	0.12431	322.47	1484.02	130.4	9.87	482.7	26.29
28	1.09930	598.2	0.11714	332.09	1485.14	127.9	9.93	477.0	26.57
30	1.16720	595.2	0.11046	341.76	1486.17	125.5	10.00	471.4	26.85
32	1.23820	592.1	0.10422	351.45	1487.11	123.1	10.06	465.7	27.14
34	1.31240	589.0	0.09840	361.19	1487.95	120.7	10.13	460.1	27.43
36	1.39000	585.8	0.09296	370.96	1488.70	118.4	10.19	454.6	27.74
38	1.47090	582.6	0.08787	380.78	1489.36	116.2	10.26	449.1	28.05
40	1.55540	579.4	0.08310	390.64	1489.91	114.0	10.33	443.5	28.38
42	1.64350	576.2	0.07863	400.54	1490.36	111.9	10.39	438.0	28.71
44	1.73530	572.9	0.07445	410.48	1490.70	109.8	10.46	432.6	29.06
46	1.83100	569.6	0.07052	420.48	1490.94	107.8	10.53	427.1	29.41
48	1.93050	566.3	0.06682	430.52	1491.06	105.8	10.60	421.7	29.78
50	2.03400	562.9	0.06335	440.62	1491.07	103.8	10.67	416.3	30.16
55	2.31110	554.2	0.05554	466.10	1490.57	99.0	10.86	402.9	31.16
60	2.61560	545.2	0.04880	491.97	1489.27	94.5	11.05	389.6	32.26
65	2.94910	536.0	0.04296	518.26	1487.09	90.1	11.25	376.4	33.47
70	3.31350	526.3	0.03787	545.04	1483.94	85.9	11.47	363.2	34.80
75	3.71050	516.2	0.03342	572.37	1479.72	81.9	11.70	350.2	36.30
80	4.14200	505.7	0.02951	600.34	1474.31	78.0	11.95	337.1	38.00
85	4.61000	494.5	0.02606	629.04	1467.53	74.2	12.23	324.1	39.95
90	5.11670	482.8	0.02300	658.61	1459.19	70.5	12.55	311.0	42.24
95	5.66430	470.2	0.02027	689.19	1449.01	66.8	12.91	297.9	44.99
100	6.25530	456.6	0.01782	721.00	1436.63	63.2	13.32	284.8	48.36
105	6.89230	441.9	0.01561	754.35	1421.57	59.6	13.82	271.5	52.65
110	7.57830	425.6	0.01360	789.68	1403.08	56.0	14.42	258.1	58.33
115	8.31700	407.2	0.01174	827.74	1379.99	52.3	15.19	244.6	66.28
120	9.11250	385.5	0.00999	869.92	1350.23	48.3	16.21	231.2	78.40
125	9.97002	357.8	0.00828	919.68	1309.12	43.8	17.73	219.1	100.01
130	10.89770	312.3	0.00638	992.02	1239.32	37.3	20.63	221.9	160.39
132.25	11.33300	225.0	0.00444	1119.22	1119.22	—	—	∞	∞

ملحق 1 – جدول الإشباع للماء

Refrigerant 718 (Water/Steam) Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor											
T	Pressure	Density	Volume	Enthalpy		Specific Heat		Viscosity		Thermal Cond	
°C	MPa	kg/m ³	m ³ /kg	kJ/Kg	kJ/Kg	kJ/kg.k	kJ/kg.k	μPa.s	μPa.s	mW/m.K	mW/m.K
		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor
5	0.00087	999.8	147.0100	21.02	2510.06	4.205	1.889	1518.3	9.34	570.5	17.34
10	0.00123	999.9	106.3000	42.02	2519.21	4.196	1.895	1306.0	9.46	580.0	17.62
15	0.00171	999.1	77.8750	62.98	2528.33	4.189	1.900	1137.6	9.59	589.3	17.92
20	0.00234	998.2	57.7570	62.98	2537.43	4.184	1.906	1001.6	9.73	598.4	18.23
25	0.00317	997.0	43.3370	104.83	2546.51	4.182	1.912	890.1	9.87	607.2	18.55
30	0.00425	995.6	32.8780	125.73	2555.55	4.180	1.918	797.4	10.01	615.5	18.89
35	0.00563	994.0	25.2050	146.63	2564.55	4.180	1.925	719.3	10.16	623.3	19.24
40	0.00738	992.2	19.5150	167.53	2573.51	4.180	1.931	653.0	10.31	630.6	19.6
45	0.00959	992.2	15.2520	188.43	2582.43	4.180	1.939	596.1	10.46	637.3	19.97
50	0.01235	988.0	12.0270	209.34	2591.29	4.182	1.947	546.8	10.62	643.6	20.36
55	0.01576	985.7	9.5643	230.26	2600.09	4.183	1.955	504.0	10.77	649.2	20.77
60	0.01995	983.2	7.6672	251.18	2608.83	4.185	1.965	466.4	10.93	654.3	21.19
65	0.02504	980.5	6.1935	272.12	2617.50	4.187	1.975	433.2	11.10	659.0	21.62
70	0.0312	977.7	5.0395	293.07	2626.10	4.190	1.986	403.9	11.26	663.1	22.07
75	0.0386	974.8	4.1289	314.03	2634.60	4.193	1.999	377.7	11.43	666.8	22.53
80	0.04741	971.8	3.4052	335.01	2643.02	4.197	2.012	354.3	11.59	670.0	23.01
85	0.05787	968.6	2.8258	356.01	2651.33	4.201	2.027	333.3	11.76	672.8	23.51
90	0.07018	965.3	2.3591	377.04	2659.53	4.205	2.043	314.4	11.93	675.3	24.02
95	0.08461	961.9	1.9806	398.09	2667.61	4.210	2.061	297.3	12.10	677.3	24.55

ملحق 2

الشروط التصميمية الخارجية لمعظم المدن السورية حسب الأرصاد الجوية (عام 2007)

الرقم	المدينة	درجة الحرارة التصميمية °C		الرطوبة النسبية التصميمية %		المدى اليومي °C	معدل الإشعاع الشمسي التصميمي [w/m2.day]		سرعة الرياح [m/s]	اتجاه الرياح		الإرتفاع [m]
		صيفاً	شتاءً	صيفاً	شتاءً		صيفاً	شتاءً		صيفاً	شتاءً	
1	دمشق	40	-2	20	75	19.69	7700	2820	5.5	NW	W	729
2	حلب	41	-3	20	75	14.82	7630	2165	5.5	W	E	385
3	حمص	38	-3	35	85	12.18	7500	2410	6	SW	W	483
4	حماء	40	-2	25	80	14.74	7700	2315	5	SW	W	305
5	الرستن	40	-3	30	75	15.3	7600	2350	4	W	W	390
6	السلمية	40	-2	30	80	16.74	7700	2315	4	SW	SW	448
7	ادلب	38	-2	32	75	12.1	7580	2275	7	W	W	451
8	طرطوس	34	4	60	65	6.43	7120	2530	4.5	SW	E	5
9	اللاذقية	34	4	60	65	5.18	6590	2300	5.5	S	NE	7
10	صافيتا	35	1	40	75	7.97	7170	2385	6.5	W	NE	370
11	مصياف	37	0	30	65	15.28	7200	2380	5.5	S	NE	530
12	صنلفة	33	-3	50	65	11	7200	3380	6	S	NE	1100
13	كسب	33	0	30	65	11.1	7650	2600	6	S	NE	730
14	القرداحة	35	1	50	65	9.78	7200	2380	3.5	S	NE	370
15	حميميم	35	3	50	70	8.76	6700	2300	5	S	SE	48
16	المسلمية	40	-4	22	75	15.33	7565	2350	5	W	E	415
17	درعا	39	-1	20	75	14.04	7280	2880	4.5	W	SW	543
18	السويداء	37	-3	25	75	14.57	7275	2570	5	W	SW	1015
19	إزرع	38	-2	20	70	17.75	7200	2900	4.5	W	SW	570
20	القيطرة	37	-2	32	85	13.65	7275	2800	8	NW	W	941
21	تدمر	43	-3	20	75	16.17	7640	2755	7	W	W	400
22	التف	42	-3	20	75	17.54	8000	3020	5.5	W	W	712
23	البوكمال	44	-3	20	65	15.16	7850	2940	4	W	W	175
24	دير الزور	43	-3	16	75	14.62	7320	2630	5.5	NW	NW	215
25	الرفقة	42	-3	20	75	14.95	7660	2490	5	W	E	246
26	القامشلي	43	-2	30	70	16.31	7255	3355	3.5	W	N	449
27	الحسكة	44	-4	18	75	18.44	7465	2380	4	W	NW	307
28	جرابلس	41	-3	20	70	17.5	7200	2275	4	W	SE	351
29	تل أبيض	42	-3	25	75	19.8	7300	2280	3	W	SE	348
30	اثريا	40	-1	30	80	15.18	7750	2760	7	W	SW	460
31	التبك	35	-5	25	75	14.69	7645	2610	5	N	S	1329
32	سرغايا	35	-5	25	75	18.5	7785	2630	5.5	NW	NW	1400
33	الزبداني	35	-5	20	75	15.61	7650	2610	5	NW	NW	1200
34	قتلنا	39	-3	25	75	18.14	7600	2700	5.5	NW	W	875
35	خرابو	40	-3	20	75	22.36	7720	2770	2	W	W	620
36	التل	38	-3	25	75	16.5	7700	2800	4.5	W	N	950

Abstract

In this thesis, several methods of increasing the cooling capacity and coefficient of performance of the adsorption cooling system were studied. This study was carried out in three steps:

I. A laboratory device has been manufactured for testing the adsorption capacities of different working pairs.

II. A prototype of an adsorbent bed has been designed to work in a refrigeration system to produce ice under specific conditions.

III. The adsorbent bed has been developed in a computational way in order to raise the specific cooling capacity and the coefficient of performance of the system.

It was found through laboratory experiments that using R134a with granular activated carbon gave a higher adsorption capacity compared to using R407C with the same carbon at all adsorption modes.

It was found through the analytical and computer study for the development of the bed the following:

The use of the pair (Activated Carbon Fiber Busofit/ Ammonia) gave the highest performance for the refrigeration system of 0.2093 and the highest cooling capacity of 433.64 W, compared to the pairs (Powdered Activated Carbon MaxsorbIII / R134a) and (Activated Carbon Fiber A20 / R134) and (Granular Activated Carbon/R134a), so it was chosen as the working pair in the cooling system.

Replacing the flat external fin with a zigzag fin, and then increasing the number of fins on the exchanger tubes from 50 to 150, and adding three radial fins within the exchanger tubes led to an increase in the cooling capacity to 1992.7 W (by 359.5%), on the other hand led to a slight decrease in the coefficient of performance to 0.1915 (by -8.5%).

The use of mass heat recovery technology MHR between the two beds achieved the highest increase in cooling capacity and performance compared to heat recovery HR and mass recovery MR technology. Where the cooling capacity increased to 3238 W (by 62.5%), and the coefficient of performance increased to 0.436 (by 127.7%).

Syrian Arab Republic
Damascus University
Faculty of Mechanical & Electrical Engineering
Department Of General Mechanical Engineering
Refrigeration Engineering



Developing Possibility of the Adsorbent Bed In Adsorption Cooling Machine and Evaluating the Effects on the Performance

A Thesis submitted for the degree of PhD in Refrigeration Engineering

**By Student
Rania Awari**

**Supervised by
Prof.Dr.Eng. Wajih Naimeh**

**Academic Year
2020 – 2021**