جامــعة قاصدي مرباح _ ورقلة
كلية الرياضيات وعلوم المادة
قسم الفيزياء

مذكرة مقدمة لاستكمال متطلبات شهادة الماستر أكاديمي

المجال: علوم المادة

الشعبة: فيزياء

التخصص: فيزياء طاقوية وطاقات متجددة

من إعداد الطالبتين: **رابحـــي نوال _ سلفاوي أم السعد**

بعنوان:

دراسة نظام التبريد بالامتصاص باستخدام مبردات منخفضة الاحتباس الحراري العالمي تعتمد على الطاقة الجيوحرارية

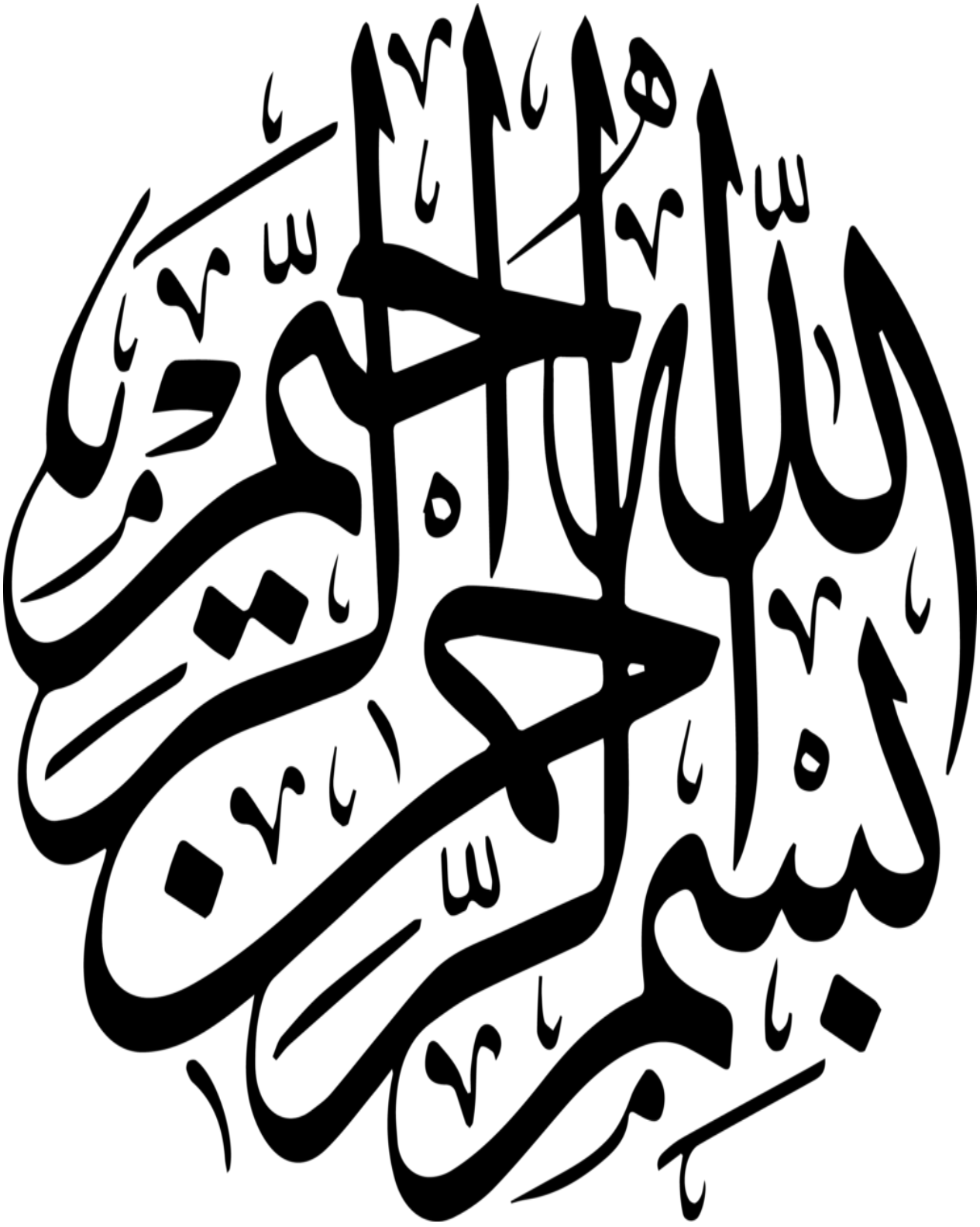
Analysis of Absorption Refrigeration Systems using low Global warming Potential Refrigerants based On Geothermal Heating

نوقشت و أجيزت علنا بتاريخ: 03/06/2026

أمام اللجنة المكونة من السادة:

أ.د/سوداني محمد البار	أستاذ	جامعة قاصدي مرباح – ورقلة –	رئيسا
د/بالحاج محمد صطفى	أستاذ محاضر – أ –	جامعة قاصدي مرباح – ورقلة –	مناقشا
د/صالحي خليفة	أستاذ محاضر – أ –	جامعة قاصدي مرباح – ورقلة –	مشرفا

السنة الجامعية : 2026/2025


بسم الله الرحمن الرحيم

إهداء

الحمد لله الذي مانجحنا ولا تفوقنا إلا برضاه الحمد لله الذي ما أجتزنا دربا ولا تخطينا جهدا إلا بفضله وإليه ينسب الفضل والكمان والاكمال.

أهدي هذا النجاح لنفسي أولا ثم إلى كل من سعى معي لإتمام هذه المسير.

إلى أمي وأبي وعائلتي العزيزة

اليوم وأنا أحتفل بتخرجي أود أن أخبركم أن هذا الإنجاز هو انعكاس لتعبكم ودعمكم الذي لم يتوقف يوما.

أبي الذي زين اسمي بأجمل الألقاب إلى من علمني أن الدنيا كفاح وسلاحها العلم والمعرفة داعمي الأول في مسيرتي إلى فخري وإعتزازي والدي الحبيب أدامك الله لنا.

وأمي التي ظلت دعواتها تضم اسمي دائما إلى من افنت عمرها في سبيل أن أحقق طموحي أطال الله في عمرك بالصحة والعافية يالغالية.

إلى اخوتي واخواتي كنتم دائما دعمي وسندي، وجودكم في حياتي كان الأمان والفرحة التي أحتاجها لأكمل هذا المشوار.

إلى من كان عونا وسندا في هذا الطريق إلى أمان أيامي إلى من شجعني دائما للوصول إلى طموحاتي.

هذا التخرج ليس مجرد شهادة، بل هو تتوج لكل لحظة كنتم فيها بجانبي، ولكل دعوة رفعتموها من أجلي، أحبكم جميعا من أعماق قلبي وأهديكم هذا النجاح الذي هو بفضلكم بعد الله.

نوال

إهداء

إلى من قال فيهما الرحمان:

﴿وَقُل رَّبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا﴾

إلى من غرسا في نفسي الأمل والطموح، وكانا نور طريقي ودعائي الدائم،

أبي الغالي وأمي الحبيبة، حفظهما الله وأطال في عمرهما.

إلى زوجي العزيز، شريك حياتي ورفيق دربي،

الذي كان دعمه واهتمامه مصدر قوة وسكينة لي،

والذي لم يبخل عليّ يومًا بالتشجيع والمساندة،

فكان خير سند في رحلة تعبي واجتهادي.

إلى عائلتي الكريمة، وكل من أحاطني بالمحبة والدعاء الصادق.

إلى أساتذتي الأفاضل الذين أناروا لنا طريق العلم والمعرفة بكل إخلاص وتفانٍ.

إلى كل صديق وزميل شاركني لحظات السعي والتعب،

وإلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل.

أهديكم ثمرة جهدي المتواضع، راجية من الله عز وجل

أن يجعله علمًا نافعًا وبداية لمستقبلي

أم السعد

شكر و عرفان

قال تعالى : " ...ولئن شكرتم لأزيدنكم..."

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على سيد الخلق أجمعين رسولنا النبي الأكرم الأمين وعلى آله وصحبه أجمعين.

الحمد و الشكر لله الذي وفقنا وأعاننا لإنجاز هذه المذكرة و الوصول لمنزلة العلم هذه.

بالبد نتقدم بجزيل الشكر والإمتنان والعرفان للأستاذ " صالحي خليفة"

لما قدمه لنا من الدعم العلمي والتشجيع طوال مدة إنجاز البحث

نسأل الله أن يرزقه كل الخير ويزيده من علمه وفضله ويرزقه

العمل به ، شكرا ....

أما بعد نتقدم بأسمى عبارات الشكر والتقدير و الاحترام للجنة المناقشة شكرا لكم أساتذتنا الكرام

ويطيب لنا أن نتقدم بالشكر الجزيل والامتنان لجميع العاملين في قسم الفيزياء وبوجه الخصوص إلى كل الأساتذة لدورهم وتوجيههم لنا في مسيرتنا العلمية خلال الخمس سنوات

شكرا لكم جميعا....

ملخص البحث

تندرج هذه الدراسة في إطار البحث عن حلول مستدامة وفعالة لتقليل استهلاك الطاقة والحد من التأثيرات البيئية لأنظمة التبريد التقليدية. وتهدف إلى دراسة وتحليل نظام تبريد بالامتصاص يعتمد على موائع تبريد منخفضة الاحتباس الحراري، مع توظيف الطاقة الجيوحرارية كمصدر حراري لتشغيله.في هذا العمل، تم التطرق أولًا إلى الجوانب النظرية لنظام التبريد بالامتصاص، من خلال عرض مبدأ اشتغاله ومكوناته الأساسية، إضافة إلى تطبيق معادلات توازن الكتلة والطاقة لتحليل سلوك النظام وتقييم أدائه. كما تم التركيز على دراسة موائع التبريد الحديثة، خاصة المزيجين R1234yf–NMP و R1234yf–DMTrEG، من خلال تحليل خصائصهما الحرارية والفيزيائية وتأثيرهما على كفاءة الدورة و معامل الأداء (COP. من جهة أخرى، تم إبراز أهمية الطاقة الجيوحرارية كمصدر طاقة متجدد ومستقر يمكن استغلاله في تشغيل أنظمة التبريد بالامتصاص، مما يساهم في تقليل الاعتماد على الطاقة الكهربائية والوقود الأحفوري. وقد أظهرت نتائج الدراسة أن استخدام موائع تبريد منخفضة الاحتباس الحراري، بالتكامل مع مصدر حراري متجدد، يمكن أن يحسن من الأداء الطاقوي للنظام ويقلل من تأثيره البيئي.

وفي ضوء هذه النتائج، تؤكد هذه الدراسة على أهمية تطوير واعتماد تقنيات تبريد صديقة للبيئة، وتشجع على توسيع استخدام الطاقة الجيوحرارية في التطبيقات الحرارية و التبريد، مع ضرورة إجراء المزيد من الدراسات لتحسين كفاءة هذه الأنظمة وتعميم استخدامها على نطاق أوسع.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الحرارية الأرضية، التبريد بالامتصاص، محاكاة

Abstract

This study is part of the ongoing search for sustainable and efficient solutions aimed at reducing energy consumption and minimizing the environmental impact of conventional refrigeration systems. It focuses on the analysis and investigation of an absorption refrigeration system using low Global Warming Potential (GWP) refrigerants powered by geothermal energy as a renewable heat source.

The first part of this work presents the theoretical background of absorption refrigeration systems, including their operating principle, main components, and different configurations. In addition, mass and energy balance equations were applied to evaluate the system behavior and performance. Particular attention was given to modern refrigerant mixtures, especially R1234yf–NMP and R1234yf–DMTrEG, through the study of their thermophysical properties and their influence on system performance parameters such as the coefficient of performance (COP) and circulation ratio

Furthermore, the study highlights the importance of geothermal energy as a stable and renewable energy source that can effectively drive absorption cooling systems while reducing dependence on electrical energy and fossil fuels. The obtained results indicate that the integration of low-GWP refrigerants with renewable thermal energy sources can significantly improve the energetic performance of the system and reduce its environmental impact.

Based on these findings, this work emphasizes the importance of developing environmentally friendly refrigeration technologies and encourages the wider use of geothermal energy in thermal applications. It also recommends further theoretical and experimental investigations to enhance the efficiency and practical implementation of absorption refrigeration systems.

Keywords: Geothermal Energy, Absorption Refrigeration, Simulation

فهرس المحتويات:

المحتويات	الصفحة
الإهداء	I
شكر وعرفان	III
الملخص	IV
فهرس المحتويات	VI
قائمة الجداول	X
قائمة الأشكال	XI
قائمة الرموز	XIII
قائمة المختصرات	XIV
المقدمة العامة	2
الفصل الأول: نظام التبريد بالامتصاص	
تمهيد.	5
I. نظام التبريد بالامتصاص.	5
1.I. تعريف نظام التبريد بالامتصاص.	5
2.I. لمحة تاريخية	6
3.I. مبدأ عمل دورة التبريد بالامتصاص.	6
4.I. مكونات دورة التبريد بالامتصاص.	7
II. أنواع نظام التبريد بالامتصاص.	8
1.II. نظام التبريد بالامتصاص أحادي التأثير.	8
2.II. نظام التبريد بالامتصاص ثنائي التأثير.	10
III. معادلات توازن الكتل والطاقة لآلة التبريد الامتصاصية.	11

IV. الخصائص الفيزيائية لسوائل التشغيل.	14
قائمة المصادر و المراجع.	15
الفصل الثاني: أزواج الموائع المستعملة في دورة التبريد بالامتصاص	
I.أزواج الموائع في دورات التبريد الامتصاص.	17
II.أنواع سوائل التشغيل في دورات الامتصاص	17
1.II. سلسلة المبردات باستخدام الأمونيا	17
2.II. سلسلة المبردات باستخدام H_2O	18
3.II. سلسلة المبردات التي تستخدم الكحول	19
4.II. سلسلة المبردات التي تستخدم الهيدروكربونات المهلجنة	20
5.II. سلسلة الأمزجة الأيونية الحديثة	21
III.خلاصة الفصل الثاني	22
قائمة المراجع	24
الفصل الثالث : المنابع الجيوحرارية في الجزائر	
تمهيد	**26**
I.الطاقة الحرارية الأرضية	**26**
1.I.تعريف الينابيع الحرارية.	**26**
2.I.تعريف الطاق الحرارية الأرضية.	**27**
3.I.أصول(مصادر) الطاقة الحرارية الأرضية.	**27**
II. التدرج الحرارة الأرضية.	**28**
III.أنواع الطاقة الحرارية الأرضية.	**29**
1.III. الطاقة الحرارية الأرضية عالية الطاقة.	**29**
2.III.الطاقة الحرارية الأرضية متوسطة الطاقة.	**29**
3.III.الطاقة الطاقة الحرارية الأرضية منخفضة الطاقة جدا.	**30**

IV.الطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر.	**30**
1.IV.تصنيف المناطق المناخية في الجزائر.	**30**
2.IV.الإستكشاف.	**31**
3.IV.المنابع الجيوحرارية في الجزائر.	**31**
4.IV.الإستغلال.	**32**
5.IV.إمكانات الطاقة الحرارية الأرضية.	**33**
V.استخدامات الطاقة الحرارية الأرضية.	**33**
1.V.الاستخدام المباشر.	**33**
2.V.التدفئة والتبريد.	**33**
3.V.توليد الطاقة الكهربائية.	**34**
VI.بعض تطبيقات الطاقة الحرارية الأرضية في جنوب الجزائر.	**34**
1.VI.تدفئة البيوت الزجاجية.	**34**
2.VI.تربية الأحياء المائية.	**34**
VII.إيجابيات وسلبيات الطاقة الحرارية الأرضية.	**35**
1.VII.الإيجابيات.	**35**
2.VII.السلبيات.	**36**
VIII. خلاصة الفصل الثالث	**36**
قائمة المصادر و المراجع.	**37**
الفصل الرابع : النتائج والمناقشات	
تمهيد.	**40**
I. تأثير درجة حرارة المولد.	**40**
1.I.معامل الأداء (COP) أزواج الموائع العاملة عند درجات حرارة مختلفة للمولد	**40**
2.I. تركيزات المحلول في دورة التبريد بالامتصاص عند درجات حرارة مختلفة	**41**

للمولد(Tg)	
I.3. نسبة الدوران(f) في دورة التبريد بالامتصاص عند درجات حرارة مختلفة للمولد	**42**
I.4. تغير القدرة الحرارية للمولد(Qg) بدلالة درجة حرارة المولد(Tg)	**44**
II. تأثير درجة حرارة المكثف.	**45**
II.1. تأثير درجة حرارة المكثف (Tc) على معامل الأداء (COP)	**45**
II.2. تغير نسبة الدوران بدلالة درجة حرارة المكثف	**46**
III. تأثير درجة حرارة المبخر.	**47**
III.1. تغير معامل الأداء (COP) بدلالة درجة حرارة المبخر.	**47**
III.2. تغير تركيزات المحاليل بدلالة درجة حرارة المبخر.	**49**
III.3. تغير نسبة الدوران بدلالة درجة حرارة المبخر.	**50**
III.4. معامل الأداء لمختلف الخلائط مقارنة بالخلائط التقليدية عند درجات حرارة مختلفة للمولد.	**51**
الخاتمة العامة.	**54**

قائمة الجداول:

رقم الجدول	العنوان	الصفحة
1-III	درجات الحرارة لبعض المنابع الحرارية في الجزائر	32

قائمة الأشكال:

رقم الشكل	العنوان	الصفحة
	الفصل الأول	
I – 1	(a) آلة نظام التبريد بالامتصاص . (b) مخطط عام لنظام التبريد بالامتصاص.	7
I – 2	مخطط تخطيطي لنظام التبريد بالامتصاص أحادي التأثير.	10
I – 3	مخطط تخطيطي لنظام التبريد بالامتصاص ثنائي التأثير.	11
I – 4	مخطط دارة التبريد امتصاصية تستخدم (LiBr + H2O) وبوجود مبادل حراري استرجاعي	12
	الفصل الثالث	
III – 1	الينابيع الحارة بولاية قالمة (حمام المسخوطين).	26
III – 2	التركيب الداخلي للأرض ودرجات الحرارة فيها و التدرج الحراري الأرضي.	27
III – 3	الطاقة الحرارية الأرضية عالية الطاقة.	29
III – 4	الطاقة الحرارية الأرضية المتوسطة الطاقة.	30
III – 5	الطاقة الحرارية الأرضية منخفضة الطاقة جدا.	30
III -6	إستخدام الطاقة الحرارية الأرضية في التدفئة و التبريد.	33
III – 7	توزيع إجمالي القدرة المركبة للطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر	34
III -8	مزرعة حاسي بن عبد الله للاستزراع المائي بورقلة.	35
	الفصل الرابع	
IV-1	معامل الأداء(COP) لمختلف أزواج الموائع العاملة عند درجات حرارة للمولد.	41
IV-2	تركيزات المحلول في دورة التبريد بالامتصاص عند درجات حرارة مختلفة للمولد(Tg).	42
IV-3	نسبة الدوران(f) عند درجات حرارة مختلفة للمولد	43
IV-4	تغير القدرة الحرارية للمولد(Qg) بدلالة درجة حرارة المولد(Tg)	44
IV-5	تأثير درجة حرارة التكثيف(Tc) على معامل الأداء(COP)	46

6-IV	تغير نسبة الدوران بدلالة درجة حرارة المكثف.	47
7-IV	تغير معامل الأداء(COP) بدلالة درجة حرارة المبخر.	48
8-IV	تغير تركيزات المحاليل بدلالة درجة حرارة المبخر.	49
9 -IV	تغير نسبة الدوران بدلالة درجة حرارة المبخر.	50
10 -IV	معامل الأداء لمختلف الخلائط مقارنة بالخلائط التقليدية عند درجات حرارة مختلفة للمولد.	52

قائمة الرموز:

الرمز	العبارة	الوحدة
h	الأنتالبي الحراري النوعي	KJ/Kg
ŋ	المردود الحراري	/
EX	معامل التبادل الحراري	/
$\dot{m}_a$	التدفق الكتلي للمحلول الفقير	Kg/s
$\dot{m}_r$	تدفق وسيط التبريد	Kg/s
$\dot{m}_d$	تدفق بخار وسيط التبريد الخارج من المولد	Kg/s
P_E	ضغط المبخر	Pa
P_c	ضغط المكثف	Pa
W_p	استطاعة المضخة	KW
ρ	الكتلة النوعية للمحلول الغني	Kg/m^3
Q_E	كمية الحرارة داخل المبخر	KJ/s
Q_A	كمية الحرارة داخل جهاز الماص	KJ/s
Q_G	كمية الحرارة داخل المولد	KJ/s
Q_C	كمية الحرارة داخل المكثف	KJ/s
T_E	درجة الحرارة في المبخر	K
T_A	درجة الحرارة في الجهاز الماص	K
T_G	درجة الحرارة في المولد	K
T_C	درجة الحرارة في المكثف	K

قائمة المختصرات:

الاختصار	العبارة
COP	**معامل الأداء الكلي**
COP_{max}	**معامل الأداء الأعظمي**
C.D.E.R	**مركز تنمية الطاقات المتجددة**
GWP	**كمون او مبردات منخفضة الاحتباس الحراري**

المقدمة العامة

المقدمة العامة:

يشهد العالم في العقود الأخيرة تزايدًا ملحوظًا في الطلب على الطاقة، خاصة في قطاع التبريد والتكييف الذي يُعد من أكبر المستهلكين للطاقة الكهربائية. وقد أدى الاعتماد المكثف على أنظمة التبريد التقليدية (الانضغاطية) إلى تفاقم المشكلات البيئية، نتيجة استخدام موائع تبريد ذات تأثير مرتفع على الغلاف الجوي (ثقب الأوزون و ظاهرة الاحتباس الحراري) ، إضافة إلى ارتفاع استهلاك الطاقة وما يرافقه من انبعاثات غازات دفيئة. وفي هذا الإطار، أصبح البحث عن بدائل تكنولوجية صديقة للبيئة وذات كفاءة طاقوية عالية ضرورة ملحّة لتحقيق أهداف التنمية المستدامة.

يُعد نظام التبريد بالامتصاص أحد الحلول الواعدة في هذا المجال، حيث يعتمد على الطاقة الحرارية بدلًا من الطاقة الكهربائية لتشغيله، مما يتيح إمكانية استغلال مصادر طاقة بديلة ومتجددة. ويتميز هذا النظام بقدرته على العمل باستخدام مصادر حرارية منخفضة أو متوسطة درجة الحرارة، مثل الطاقة الشمسية أو الطاقة الجيوحرارية، وهو ما يجعله خيارًا مناسبًا خاصة في المناطق التي تتوفر فيها هذه الموارد الطبيعية.

تُعتبر الطاقة الجيوحرارية من أهم مصادر الطاقة المتجددة، حيث تعتمد على استغلال الحرارة المختزنة في باطن الأرض، وتمتاز باستمراريتها واستقرارها مقارنة ببعض المصادر الأخرى. كما أنها توفر مصدرًا حراريًا موثوقًا يمكن استخدامه لتشغيل أنظمة التبريد بالامتصاص، مما يساهم في تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وخفض الانبعاثات الملوثة للبيئة.

بالتوازي مع ذلك، شهد مجال موائع التبريد تطورًا كبيرًا في السنوات الأخيرة، حيث تم التوجه نحو تطوير واستخدام موائع تبريد ذات تأثير منخفض على الاحتباس الحراري (Low GWP)، استجابة للتشريعات البيئية الدولية والاتفاقيات المتعلقة بحماية المناخ. ومن بين هذه الموائع، برزت بعض المزيجات الحديثة مثل R1234yf–NMP و R1234yf–DMTrEG، والتي تتميز بخصائص حرارية وبيئية تجعلها مناسبة للاستخدام في أنظمة التبريد بالامتصاص، مع تحقيق أداء جيد وتقليل التأثير البيئي مقارنة بالموائع التقليدية.

تهدف هذه الدراسة الى تحليل نظام تبريد بالامتصاص يعتمد على موائع تبريد منخفضة الاحتباس الحراري، مع توظيف الطاقة الجيوحرارية كمصدر حراري لتشغيله. وتشمل هذه الدراسة تحليلًا نظريًا (محاكاة باستعمال برنامج ماتلاب و بعض برامج خصائص الموائع) لمبدأ عمل النظام،

إضافة إلى تطبيق معادلات توازن الكتلة والطاقة لتقييم أدائه، ودراسة تأثير خصائص الموائع المستخدمة على معامل الأداء ونسبة الدوران.

ولتحقيق أهداف هذه الدراسة، تم تقسيم العمل إلى أربع فصول رئيسية والتي تتمثل في ما يلي:

الفصل الأول: يتناول نظام التبريد بالامتصاص، حيث يتم تعريفه وشرح مبدأ عمله ومكوناته الأساسية، إضافة إلى عرض أهم أنواعه، مع التطرق إلى معادلات توازن الكتلة والطاقة التي تحكم سير هذا النظام.

الفصل الثاني: يُخصص لدراسة موائع التبريد واستعمالاتها، مع التركيز على المزيجين R1234yf–NMP و R1234yf–DMTrEG، وتحليل خصائصهما الحرارية وتأثيرهما على أداء نظام التبريد بالامتصاص.

الفصل الثالث: يتناول الطاقة الجيوحرارية، من حيث تعريفها ومصادرها وأنواعها، إضافة إلى دراسة إمكانية استغلالها في تشغيل أنظمة التبريد بالامتصاص.

الفصل الرابع والأخير: يستعرض مناقشة النتائج المتوصل إليها وتحليل المنحنيات البيانية ، مع تقديم مجموعة من التوصيات والآفاق المستقبلية في هذا المجال.

الفصل الأول:

نظام التبريد بالامتصاص

تمهيد:

يُعتبر نظام التبريد بالامتصاص من بين التقنيات الحديثة والمهمة في مجال التبريد والتكييف، حيث يعتمد على استخدام الطاقة الحرارية بدلًا من الاعتماد الكبير على الطاقة الكهربائية كما هو الحال في أنظمة التبريد الانضغاطي التقليدية. ويتميز هذا النظام بقدرته على استغلال مصادر حرارية متنوعة مثل الطاقة الشمسية، والطاقة الحرارية الأرضية، والحرارة المهدورة الناتجة عن العمليات الصناعية، مما يجعله حلًا اقتصاديًا وبيئيًا يساهم في تقليل استهلاك الكهرباء والحد من الانبعاثات الملوثة للبيئة.

يقوم مبدأ عمل نظام التبريد بالامتصاص على استخدام زوج من الموائع، يتكون عادةً من مادة مبردة ومادة ماصة، حيث تتم عملية التبريد نتيجة امتصاص بخار المبرد بواسطة السائل الماص ثم فصلهما باستعمال مصدر حراري. ومن أكثر الأزواج استخدامًا في هذا المجال زوج الأمونيا/الماء (NH_3/H_2O) وزوج الماء/بروميد الليثيوم ($H_2O/LiBr$)، نظرًا لخصائصهما الحرارية الجيدة وكفاءتهما العالية في تطبيقات التبريد المختلفة.

وقد عرف هذا النظام اهتمامًا متزايدًا في السنوات الأخيرة بسبب التوجه العالمي نحو الطاقات المتجددة والحفاظ على البيئة، إضافة إلى إمكانية تشغيله في المناطق التي تعاني من ارتفاع استهلاك الكهرباء أو محدودية مصادر الطاقة الكهربائية. كما يُستخدم نظام التبريد بالامتصاص في عدة مجالات، مثل التكييف، وحفظ المواد الغذائية، والتطبيقات الصناعية، والمباني الكبيرة.

وعليه، فإن دراسة نظام التبريد بالامتصاص تُعد ذات أهمية كبيرة لفهم آلية عمله، وتحليل أدائه الحراري، والتعرف على العوامل المؤثرة في كفاءته، إضافة إلى مقارنة موائعه العاملة المختلفة من أجل الوصول إلى أفضل أداء ممكن وتحقيق أعلى معامل أداء (COP) بأقل استهلاك للطاقة.

I. نظام التبريد بالامتصاص :

I.1. تعريف نظام التبريد بالامتصاص :

يعدّ نظام التبريد بالامتصاص نوعًا من تقنيات التبريد التي تعمل بمصادر حرارة منخفضة الدرجة، بما في ذلك الحرارة المهدرة في الصناعة والطاقة الحرارية المتجددة، مثل الطاقة الشمسية والطاقة الحرارية الأرضية وطاقة الكتلة الحيوية. ويتميز هذا النظام باستهلاكه المنخفض للطاقة، وقلة أجزائه المتحركة، وأدائه التشغيلي المستقر. وهو تقنية فعّالة يستخدم مواد منخفضة أو عديمة الكربون ، للتسخين او على نطاق واسع للتبريد [1، 2]. ونظرًا لتزايد الطلب على الطاقة وتنامي المخاوف بشأن

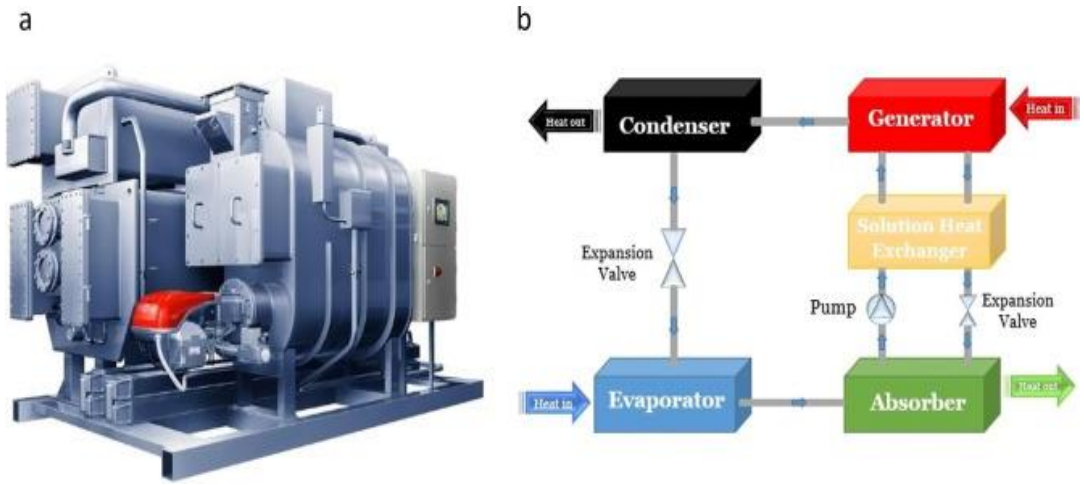
انبعاثات الكربون، فقد برزت أهمية تكنولوجيا التبريد بالامتصاص بشكل متزايد. وتشمل الأبحاث الحالية في هذا المجال، على سبيل المثال لا الحصر، استخدام الطاقة الشمسية و الجيوحرارية ذات درجات الحرارة خاصة المتوسطة والمنخفضة. وفي ظل التطبيقات والمواد وأزواج الامتصاص العاملة الجديدة، يمكن اقتراح دورات امتصاص مبتكرة ذات كفاءة عالية ونطاقات أوسع.

I.2. لمحة تاريخية:

يعود تاريخ تقنية التبريد بالامتصاص إلى عام 1777، عندما لاحظ إدوارد نيرن لأول مرة قدرة حمض الكبريتيك المركز على امتصاص بخار الماء، وبالتالي تبريد الماء المتبقي [3]. وفي عام 1859، حصل فرديناند كاريه على براءة اختراع لنظام تبريد بالامتصاص يعمل بالأمونيا والماء، حيث يستخدم فرنًا يعمل بالفحم كمصدر رئيسي للحرارة [4]. في 1922 حدث تطور ثوري آخر على يد الطالبين السويديين بالتزار فون بلاتن وكارل مونترز في المعهد الملكي للتكنولوجيا في ستوكهولم حيث اخترعا دورة امتصاص ثلاثية السوائل (أمونيا، ماء، وغاز الهيدروجين كغاز خامل ,ألغى هذا التصميم الحاجة إلى وجود مضخة ميكانيكية . والجدير بالذكر أنه في أربعينيات القرن العشرين، طوّر كاريه أول نظام تبريد بالامتصاص باستخدام بروميد الليثيوم في الولايات المتحدة، مما أدى إلى تحسين الكفاءة والسلامة بشكل ملحوظ مقارنةً بالوحدات السابقة. ثم توالت الدراسات و الابحاث الى اليوم.

I.3. مبدأ عمل دورة التبريد بالامتصاص:

يتألف النظام بشكل أساسي من أربعة مكونات أساسية (المولد، والممتص، والمكثف، والمبخر)، بالإضافة إلى مضخة المحلول وعنصري التمدد و مبادل حراري للمحلول الشكل **(I- 1)** . في البداية، يقوم المولد بتسخين المزيج –ماص و مبرد-، مما يؤدي إلى تبخر جزئي للمبرد وزيادة تركيز المادة الممتصة في المحلول. بعد ذلك، يتكثف بخار المبرد إلى سائل في المكثفٍ ثم يُخفَّض الضغط عبر الممدد، مما يسمح له بالتبخر وامتصاص الحرارة في المبخر، وبالتالي يُنتج تأثير التبريد. وأخيرًا، يمتص المحلول المركز بخار المُبرّد منخفض الضغط لتكوين محلول مخفف في الممتص، والذي يُضخ بعد ذلك عائدًا إلى المولد، مُكملاً بذلك دورة التبريد بالامتصاص [5].



الشكل (I- 1): (b) مخطط عام لنظام التبريد بالامتصاص . (a) آلة نظام التبريد بالامتصاص. [6]

تعتمد دورة التبريد بالامتصاص على انتقال الحرارة والكتلة بين مجموعة من العناصر المرتبطة داخل النظام. تبدأ العملية داخل المبخر، حيث يتبخر المائع المبرد عند ضغط منخفض ويمتص الحرارة من الوسط المراد تبريده، ثم ينتقل بخار المبرد إلى الماص حيث يتم امتصاصه بواسطة المادة الماصة. بعد ذلك يضخ المحلول إلى المولد ويتم تسخينه لفصل المائع المبرد عن المادة الماصة، ثم يتجه بخار المبرد إلى المكثف ليعود إلى الحالة السائلة ويعاد تدويره داخل الدورة من جديد. تسمح هذه المراحل المتتابعة بالحصول على عملية تبريد مستمرة وفعالة.

I.4.مكونات دورة التبريد بالامتصاص:

المبخر:

يعتبر المبخر الجزء المسؤول عن إنتاج التأثير التبريدي داخل النظام، حيث يدخل إليه المائع المبرد في حالة سائلة منخفضة الضغط، ثم يتبخر نتيجة امتصاصه للحرارة من الوسط المحيط، مما يؤدي إلى انخفاض درجة الحرارة وتحقيق عملية التبريد المطلوبة.

الماص:

تقوم المادة الماصة في الماص بامتصاص بخار المائع المبرد الخارج من المبخر، ثم يضخ الممزيج الى المولد بواسطة المضخة.

- **المولد:**

يعد المولد من أهم مكونات النظام، حيث يتم فيه تسخين المحلول الغني بالمبرد باستعمال مصدر حراري خارجي، مما يؤدي إلى فصل بخار المائع المبرد عن المادة الماصة وإرساله نحو المكثف لاستكمال الدورة.

- **المكثف:**

يعمل المكثف على تبريد بخار المبرد وتحويله من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة من خلال طرح الحرارة إلى الوسط الخارجي، وبعدها ينتقل المبرد السائل إلى صمام التمدد.

- **المضخة:**

تُستخدم المضخة لنقل المحلول بين الماص والمولد مع رفع ضغطه لضمان استمرارية حر كة الموائع داخل النظام، كما أنها تستهلك قدرة كهربائية صغيرة جدا تكتد تهمل مقارنة بالضاغط في أنظمة التبرد بالانضغاط.

- **صمام التمدد:**

يقوم صمام التمدد بخفض ضغط ودرجة حرارة المائع المبرد السائل قبل دخوله إلى المبخر، مما يساعد على تسهيل عملية التبخر وامتصاص الحرارة.

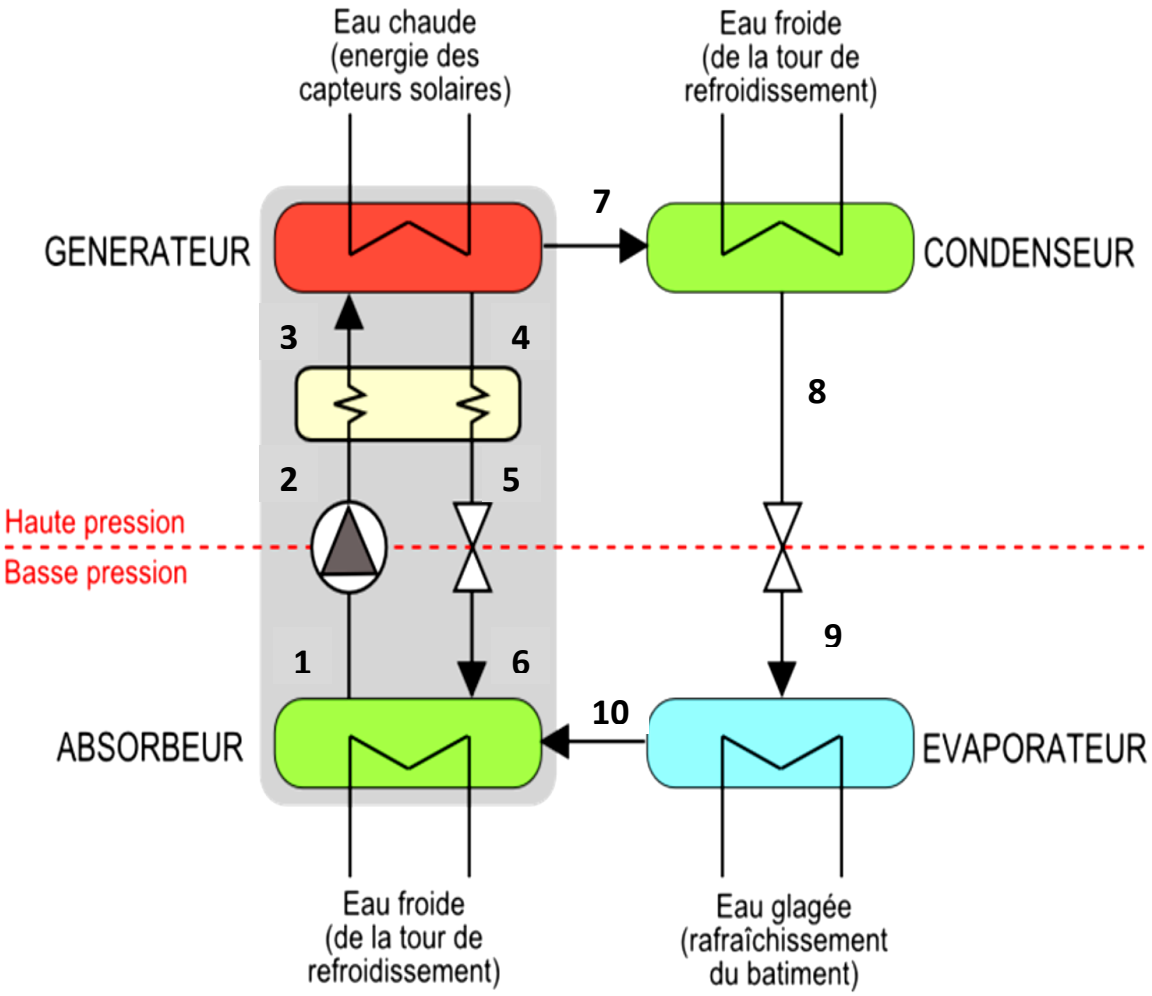
II. أنواع نظام التبريد بالامتصاص:

يمكن تصميم نظام التبريد بالامتصاص بعدة طرق مختلفة بناءً على ترتيب المولد. يتكون نظام التبريد بالامتصاص البسيط، المعروف أيضًا بنظام التبريد بالامتصاص أحادي التأثير، من مولد، وممتص، ومكثف، ومبخر، ومضخة، وصمامين للتمدد. تتناول هذه الدراسة عدة تصاميم لأنظمة التبريد بالامتصاص، بما في ذلك أنظمة التبريد بالامتصاص أحادية التأثير، وثنائية التأثير، وثلاثية التأثير، ومتعددة التأثير.

II.1. نظام التبريد بالامتصاص احادي التأثير:

يعد نظام التبريد بالامتصاص أحادي التأثير أبسط أنواع أنظمة التبريد بالامتصاص. ويتكون من مولد، وممتص، ومكثف، ومبخر، ومبادل حراري لاستعادة الحرارة، ومضخة، وصمامين للتمدد، كما هو موضح في الشكل **(I-2)**.

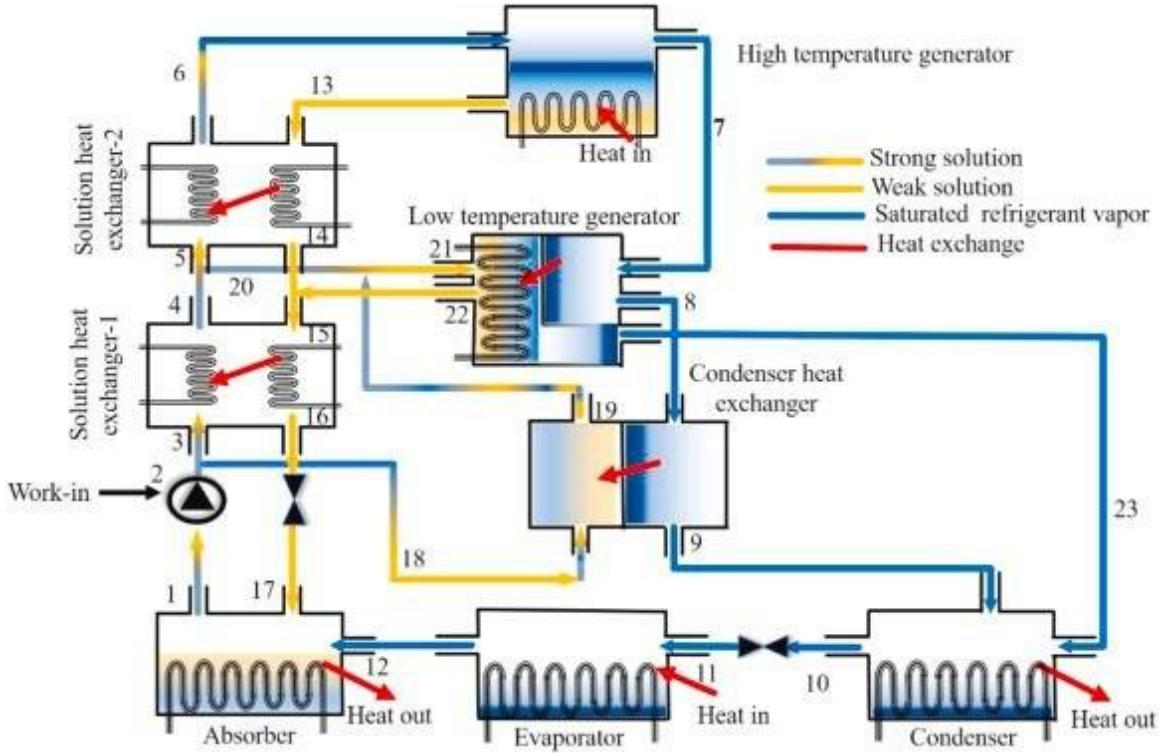
تبدأ العملية عندما يخرج المحلول المركز من الممتص في الحالة 1 ليدخل المضخة. في المضخة، يرتفع ضغط المحلول المركز إلى ضغط المولد، ويخرج عند الحالة 2. ثم يدخل المحلول المركز إلى مبادل استعادة الحرارة عند الحالة 2، حيث يكتسب حرارة من المحلول المخفف العائد، ليخرج عند درجة حرارة أعلى قليلاً عند الحالة 3. بعد ذلك، يدخل المحلول المركز عند الحالة 3 إلى المولد، حيث يكتسب حرارة من مصدر الحرارة ويبدأ المبرد بالتبخر. يتبخر المبرد المختلط بالمحلول المركز قبل المادة الماصة، ويخرج عند الحالة 7. بمجرد تبخر المبرد من المحلول المركز، يتبقى في المولد محلول مخفف يخرج عند الحالة 4. يدخل المبرد المتبخر الخارج عند الحالة 8 لاحقًا إلى المكثف، حيث يطرد الحرارة إلى المحيط ليخرج عند درجة حرارة منخفضة نسبيًا عند الحالة 8. ثم يدخل المبرد المبرد مسبقًا إلى صمام التمدد، حيث يتعرض لانخفاض مفاجئ في الضغط ليخرج عند الحالة 9 على شكل خليط مشبع غني بالبخار. يدخل هذا المزيج المشبع الغني بالبخار لاحقًا إلى المبخر، حيث يكتسب حرارة من الحيز المبرد ليخرج عند الحالة 10. ثم يدخل المبرد الخارج للممتص عند الحالة 10. [7]



الشكل (1-2):مخطط تخطيطي لنظام التبريد بالامتصاص أحادي التأثير[6]

II.2. نظام التبريد بالامتصاص ثنائي التأثير:

يختلف نظام التبريد بالامتصاص ثنائي التأثير عن النظام أحادي التأثير باحتوائه على مولدين ومكثفين، مما يسمح بتبخر كمية أكبر من مادة التبريد من محلول الامتصاص، كما هو موضح في الشكل **(I-3).** ويمكن تحسين كفاءة الطاقة لهذا النظام باستعادة جزء من الحرارة التي تُهدر عادةً في دائرة التبريد. تُحقق وحدة إعادة تدوير مياه التبريد ذات المرحلتين هذه الغاية عن طريق سحب الأبخرة الناتجة عن تسخين مولد المرحلة الأولى، مما يُؤدي إلى تبخير المزيد من الماء في المرحلة الثانية. ويُقدم العديد من المصنّعين هذا البديل عالي الكفاءة. [8]

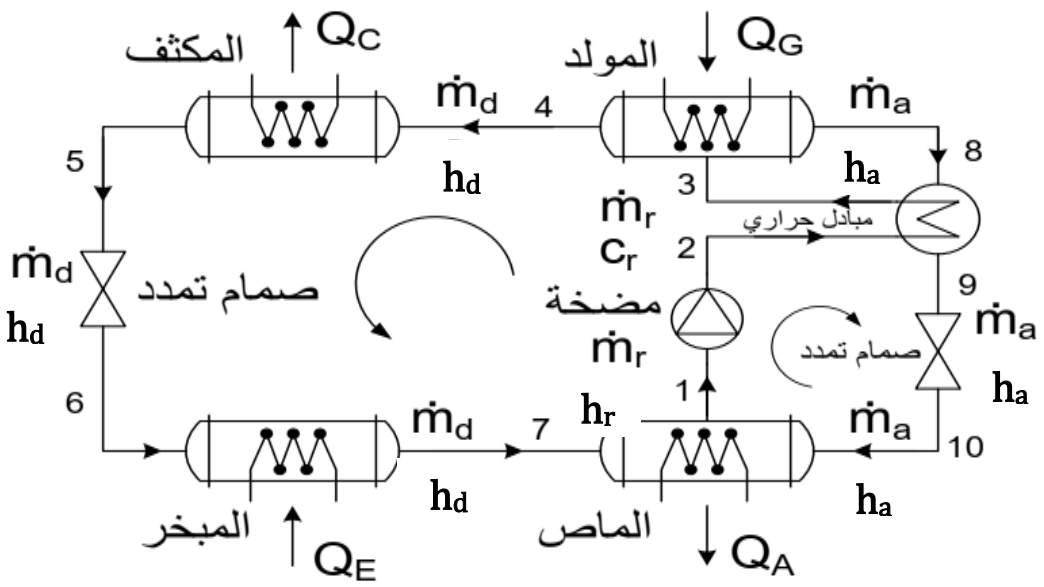


الشكل (I-3): مخطط تخطيطي لنظام التبريد بالامتصاص ثنائي التأثير[6]

نكتفي بذكر هذين النوعين مع العلم انه توجد تصنيفات اخرى لدورات التبريد بالامتصاص بناءً على **المواد المستخدمة** أو **عدد المراحل** أو **مصدر الحرارة المستخدم.**

III. معادلات توازن الكتلة و الطاقة لآلة التبريد الامتصاصية :

ان حساب آلة التبريد الامتصاصية وحيدة المرحلة يمكن أن يتم بكتابة معادلات التوازن الطاقي و الكتلي لكل عنصر من عناصر الدورة الأساسية (المولد ، الماص ، المبخر، المكثف ، الممدد، المضخة ، المبادل الحراري) المبينة على الشكل **(I-4)** كما يلي :



الشكل (I-4): مخطط دارة التبريد امتصاصية تستخدم ($LiBr + H_2O$) وبوجود مبادل حراري استرجاعي

1. **الماص :** بتطبيق التوازن الحراري و الكتلي على الماص نجد :

$$q_A = (h_7 - h_{10}) + f.(h_{10} - h_1) \quad (1)$$

2. المولد:

$$q_G = (h_4 - h_8) + f.(h_8 - h_3) \quad (2)$$

3. المكثف : بتطبيق مبدأ التوازن الحراري و الكتلي فان كمية الحرارة النوعية المطروحة في المكثف :

$$q_c = h_4 - h_5 \quad (3)$$

4. **المبخر:** كمية الحرارة المقدمة للمبخر من المكان المراد تبريده (الانتاجية التبريدية)هي :

$$Q_E = \dot{m}_d.(h_7 - h_6) \quad (4)$$

وبالتقسيم على $\dot{m}_d$ نحصل على حمل التبريد النوعي :

$$q_E = h_7 - h_6 \quad (5)$$

5- **المضخة** : الاستطاعة الواجب تقديمها للمضخة هي:

$$\dot{W}_P = \dot{m}_r.(h_2 - h_1) \quad \text{او} \quad \dot{W}_P = \dot{m}_r.(P_c - P_E)/\rho \qquad (6)$$

حيث : ρ - الكتلة النوعية للمحلول الغني الذي تضخه المضخة $[Kg/m^3]$ ، P_C و P_E - ضغط كل من المكثف و المبخر على الترتيب .

6- المبادل الحراري: معدل كمية الحرارة التي يكتسبها المحلول الغني تساوي معدل كمية الحرارة التي يخسرها المحلول الفقير .

$$Q_{HE} = \dot{m}_r.(h_3 - h_2) = \dot{m}_a(h_8 - h_9) \qquad (7)$$

أو

$$q_{HE} = f.(h_3 - h_2) = (f-1)(h_8 - h_9) \qquad (8)$$

وباعتبار أن قيمة استطاعة المضخة صغيرة جدا بالمقارنة مع الاستطاعات الأخرى بحيث يمكن اهمالها، وبالتالي تصبح معادلة التوازن الحراري لآلة التبريد الامتصاصية كما يلي :

$$Q_E + Q_G = Q_A + Q_C \qquad (9)$$

عامل أداء آلة التبريد الامتصاصية هو النسبة بين استطاعة التبريد الى الاستطاعة الحرارية المقدمة الى المولد و استطاعة المضخة :

$$C.O.P = Q_E/(Q_G + \dot{W}_P) \cong Q_E/Q_G = q_E/q_G \qquad (10)$$

ويعطى عامل الأداء الأعظمي $C.O.P_{max}$ بالعلاقة التالية :

$$C.O.P_{max} = \frac{T_E}{T_C - T_E}.\frac{T_G - T_A}{T_G} \qquad (11)$$

وباعتبار أن التبريد المكثف و الماص يتم عن طريق وسيط التبريد عند درجة حرارة الوسط الخارجي T_0 ، فان $T_C = T_A = T_0$ وبالتالي :

$$C.O.P_{max} = \frac{T_E}{T_0 - T_E} \cdot \frac{T_G - T_0}{T_G} \quad (12)$$

أما مردود الدارة η فيعطى بالعلاقة :

$$\eta = \frac{C.O.P}{C.O.P_{max}} \quad (13)$$

IV- الخصائص الحرارية الفيزيائية لسوائل التشغيل:

لإجراء تحليل الطاقة السابق ، يلزم معرفة الخصائص الفيزيائية و الحرارية لموائع التشغيل والمخاليط. استُخدم برنامج EES لحساب الخصائص الفيزيائية الحرارية لمادة التبريد R1234yf النقية.

حُسبت إنثالبي المخاليط الثنائية R1234yf-DMETrEG وR1234yf-MNP باستخدام المعادلة التالية.

$$h_{mix} = x_{R1234yf} h_{R1234yf} + x_{absorbent} h_{absorbent} + h_e \quad (14)$$

حيث تمثل $h_{R1234yf}$ المحتوى الحراري للسائل R1234yf، والذي تم حسابه باستخدام برنامج ESS كما ذُكر سابقًا، و $h_{absorbent}$ هو المحتوى الحراري لـ DMETrEG أو MNP. أما الجزء الثالث من المعادلة فهو المحتوى الحراري الزائد he. تم باستعمال المراجع [**12-10**] لحساب $h_{absorbent}$ و he

قائمة المصادر و المراجع :

[1] Zhu, H.; Guo, B.; Geng, W.; Chi, J.; Guo, S. Simulation of an improved solar absorption refrigeration system with phase change materials. *Energy Rep.* **2022**, *8*, 3671–3679.

[2] Li, Q.; Zhao, S.; Wang, D.; Song, Q.; Zhou, S.; Wang, X.; Li, Y. Simulation Study on Solar Single/Double-Effect Switching LiBr-H2O Absorption Refrigeration System. *Energies* **2023**, *16*, 3220.

[3] Nairne, E. An Account of some experiments made with an air pump on Mr. Smeaton's Principle; together with some experiments with a common air pump. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* **1777**, *67*, 614–648.

[4]Srikhirin, P.; Aphornratana, S.; Chungpaibulpatana, S. A review of absorption refrigeration technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2001**, *5*, 343–372.

[5] Nikbakhti, R.; Wang, X.; Hussein, A.K.; Iranmanesh, A. Absorption cooling systems—Review of various techniques for energy performance enhancement. *Alex. Eng. J.* **2020**, *59*, 707–738.

[6] https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/absorption-refrigeration-system.

[7] Ibrahim Dincer and T. A.H Ratlamwala , Integrated Absorption Refrigeration Systems Green Energy and Technology , DOI 10 . 1007 978 -3- 319- 33658- 9 Springer International Publishing Switzerland 2016.

[8] Ong, Bon, Hau, Thermodynamic Aanlysis of Absorption Refrigeration Sestem (ARS) Bachelor this ,Faculty of Chemical and Natural Resources Emgineering ,Universitin Malysia Pahang , Malaysia , May 2010.

[9] مصطفى محمد السيد / قدري أحمد فتحي / إبراهيم السعيد مجاهد، "النماذج الحسابية للنظم الحرارية الشمسية"، جامعة الملك عبد العزيز، الطبعة الثانية 1465هـ.

[10] Fang, Y., Guan, W., Bao, K., Wang, Y., Han, X., & Chen, G. (2018). Isothermal Vapor–Liquid Equilibria of the Absorption Working Pairs (R1234yf+ NMP, R1234yf+ DMETrEG) at Temperatures from 293.15 K to 353.15 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*, *63*(5), 1212-1219.

[11] Yokozeki, A. (2005). Theoretical performances of various refrigerant–absorbent pairs in a vapor-absorption refrigeration cycle by the use of equations of state. *Applied Energy*, *80*(4), 383-399.

[12] Zohar, A., Jelinek, M., Levy, A., & Borde, I. (2009). Performance of diffusion absorption refrigeration cycle with organic working fluids. *International Journal of Refrigeration*, *32*(6), 1241-1246.

الفصل الثاني: أزواج موائع التبريد المستعملة في آلة التبريد بالامتصاص

I.أزواج الموائع في دورات الامتصاص:

يعتمد أداء دورة الامتصاص بشكل حاسم على الخصائص الديناميكية الحرارية لسوائل التشغيل [1]. يجب أن يكون خليط المادة الماصة والمبرد مستقرًا كيميائيًا، وغير سام، وغير قابل للانفجار. تلخص متطلبات سوائل التشغيل في دورات الامتصاص في النقاط التالية [2]:

(1) يجب أن يكون فرق درجة الغليان (الفرق في درجة غليان المبرد النقي والمزيج عند نفس الضغط) كبيرًا قدر الإمكان.

(2) يجب أن يتمتع المبرد بحرارة تبخر عالية وتركيز عالٍ داخل المادة الماصة للحفاظ على معدل دوران منخفض بين المولد والممتص لكل وحدة من سعة التبريد.

(3) يجب أن تكون خصائص النقل التي تؤثر على انتقال الحرارة والكتلة، مثل اللزوجة والتوصيل الحراري ومعامل الانتشار، ملائمة.

(4) يجب أن يكون كل من المبرد والمادة الماصة غير قابلين للتآكل، وصديقين للبيئة، ومنخفضي التكلفة.

II.أنواع سوائل التشغيل في دورات الامتصاص:

تنقسم سوائل التشغيل إلى خمس سلاسل وفقًا لأنواع المواد الماصة المختلفة

II.1. سلسلة المبردات باستخدام الأمونيا:

منذ اختراع نظام التبريد بالامتصاص، شاع استخدام خليط الماء والأمونيا ($H_2O + NH_3$). يتميز كل من الأمونيا والماء بثبات عالٍ ضمن نطاق واسع من درجات حرارة وضغوط التشغيل. تُعد الأمونيا مادة تبريد جيدة نظرًا لارتفاع معدل تبخرها ودرجة تجمدها التي تبلغ ℃ 77-. نجد كذلك $NH_3 + LiNO_3$ يقرب في الخصائص $H_2O + NH_3$. كما نعلم، من الضروري إضافة جهاز تقويم في دورات الامتصاص باستخدام $H_2O + NH_3$، وهذا ناتج عن عدم اكتمال فصل H_2O و NH_3 في المولد [3].

➢ **إيجابيات الموائع القائمة على الأمونيا:**

- ✓ تبريد تحت الصفر :تصل إلى درجات حرارة منخفضة جداً (حتى°C 60-)، مما يجعلها مثالية للتجميد الصناعي.
- ✓ صديقة للبيئة تماماً :تمتلك معامل احتباس حراري (GWP = 0) وتأثير صفري على طبقة الأوزون.(ODP = 0)
- ✓ لا توجد مشكلة تبلور :على عكس بروميد الليثيوم، لا تتجمد الموائع أو تتبلور داخل الأنابيب عند التركيزات العالية.
- ✓ رخيصة ومتوفرة :الأمونيا والماء مواد متوفرة بكثرة في الأسواق وذات تكلفة اقتصادية منخفضة.
- ✓ حرارة كامنة عالية :تمتلك الأمونيا قدرة هائلة على امتصاص الحرارة أثناء التبخر، مما يقلل حجم تدفق المائع المطلوب.
- ✓ العمل في الأجواء الحارة :كفاءتها مستقرة ولا تتأثر سلباً بـارتفاع درجات حرارة الجو الخارجية المحيطة .

➢ **عيوب الموائع القائمة على الأمونيا:**

- سامة وخانقة :تشكل خطراً على السلامة وتمنع استخدامها في المباني السكنية.
- رائحة نفاذة :تسبب تهيجاً حاداً للجهاز التنفسي والعينين عند التسريب.
- تسبب التآكل :تهاجم النحاس وسبائكه، مما يفرض استخدام الفولاذ عالي التكلفة.
- تتطلب برج تقطير :بسبب تطاير الماء مع الأمونيا، مما يزيد من تعقيد وحجم النظام.
- ضغوط تشغيلية عالية :تعمل تحت ضغط مرتفع (15-20 par)، مما يتطلب أنابيب ومعدات سميكة.
- كفاءة أقل :(COP) معامل أدائها أقل في تطبيقات التكييف مقارنة بأنظمة بروميد الليثيوم [4].

2.II. سلسلة المبردات باستخدام H2O:

المزيج الاكثر استعمالا في هذه المجموعة هو $LiBr + H_2O$ الذي بدأ استخدامه منذ حوالي عام 1930 [17]. وقد ساهم ارتفاع معدل تبخر الماء (H_2O) وارتفاع فرق درجة الغليان بين الماء (H_2O) و (LiBr) في التطور االسريع لهذا المزيج.

أظهر $H_2O + LiI$ أداءً مشابهًا مع $H_2O + LiBr$ عند اعتماده في دورات الامتصاص للتدفئة. و نجد كذلك $H_2O + CaCl_2$ و يماثلهم في الخصائص.

➢ **إيجابيات الموائع القائمة على الماء:**

- ✓ آمنة وصديقة للبيئة :الماء غير سام، غير قابل للاشتعال، وصديق للبيئة تماماً (GWP =0)
- ✓ (0 / ODP = 0).
- ✓ كفاءة عالية :(COP) تمتلك معامل أداء أعلى من أنظمة الأمونيا في تطبيقات تكييف الهواء.
- ✓ حرارة تبخر هائلة :يمتلك الماء أعلى حرارة كامنة للتبخر، مما يعزز كفاءة تبادل الحرارة.
- ✓ رخيصة ومتوفرة :مائع التبريد (الماء) غير مكلف ومتوفر في كل مكان.
- ✓ استخدام النحاس :يمكن استخدام أنابيب النحاس في المبادلات الحرارية، وهي ممتازة في التوصيل الحراري وأقل تكلفة من الفولاذ الخاص

➢ **عيوب الموائع القائمة على الماء:**

- لا تصلح للتجميد :لا يمكنها التبريد تحت الصفر المئوي (لأن الماء يتجمد عند0 °C)، وتقتصر على التكييف فوق 5+ °C.
- خطر التبلور :(Crystallization) قد تتحول المادة الماصة (بروميد الليثيوم) إلى مادة صلبة تسد الأنابيب إذا انخفضت الحرارة أو زاد التركيز.
- العمل تحت تفريغ شديد :(Vacuum) يعمل النظام تحت ضغوط منخفضة جداً (قريبة من الفراغ التام)، وأي تسريب للهواء الخارجي يفسد عمل الدورة.
- التآكل الكيميائي :محلول بروميد الليثيوم يسبب تآكل المعادن في وجود الأكسجين، مما يتطلب إضافة مثبطات تآكل.(Inhibitors)
- حجم معدات كبير :بسبب الضغط المنخفض جداً، يكون حجم بخار الماء كبيراً، مما يتطلب أنابيب ومبادلات حرارية ذات أحجام ضخمة. [5]

3.II. سلسلة المبردات التي تستخدم الكحول:

في هذه الأنظمة، يُستخدم الكحول (غالباً الميثانول أو الإيثانول) كـ *مائع تبريد* (Refrigerant)نظراً لانخفاض درجة تجمدة وارتفاع حرارة تبخره. نجد في هذه المجموعة مزيج TFE + NMP، ومزيج TFE + E181، ومزيج TFE + PYR، وتبين أن مزيج H_2O + LiBr يتفوق على مزيجات TFE + NMP، وTFE + E181، وTFE + PYR عندما تكون درجة حرارة المولد أقل من 150 °C ، وهي أعلى درجة حرارة مولد لمزيج H_2O + LiBr بسبب مشاكل التآكل والتبلور. تتميز مزيجات TFE + NMP، وTFE + E181، وTFE + PYR بالاستقرار عند درجات حرارة أعلى، تصل إلى200 °C [7]. و تتميز بنطاق درجة حرارة التشغيل الواسع، وانخفاض ضغط التشغيل، ومستوى الأمان الجيد.

➢ **أبرز إيجابيات هذه المجموعة:**

- ✓ تبريد تحت الصفر :الميثانول يتجمد عند (℃ 97-) والإيثانول عند (℃ 114-)، مما يسمح بإنتاج ثلج وتجميد عميق.
- ✓ لا تحتاج لتفريغ شديد :ضغط بخار الكحول أعلى من الماء، فلا يحتاج النظام تقويم.

➢ **أبرز عيوبها:**

- حساسية حرارية :الكحول قد يتحلل كيميائياً إذا ارتفعت درجة حرارة المولد (Generator) عن 120 ℃.
- الكفاءة :(COP) معامل أدائها يظل أقل نسبياً من الأنظمة التقليدية (الماء وبروميد الليثيوم)[6].

4.II. سلسلة المبردات التي تستخدم الهيدروكربونات المهلجنة:

لتفادي العيوب السابقة الخاصة بالامزجة المتكونة من NH_3 و LiBr و الكحولات، تم تقديم سوائل التشغيل القائمة على مواد التبريد الفلوروكربونية (HFC) والمواد الماصة العضوية المقبولة بيئياً. من هذه المبردات نجد R21, R22, R30, R31, R133a, R124a, R134a مع المواد الماصة العضوية مثل DMETEG, MCL, DMEU. حيث هذه السلسلة تقسم الى ثلاث فئات. (CFC/Organic) حيث تراجعت بشكل كامل بسبب القيود البيئية على مركبات الكلور. (HFC/Organic) الزوج الشهير هو نظام R-134a / DMAC (ثنائي ميثيل أسيتاميد) مازالت تستعمل ولكن عليها قيود بسبب معمل الاحتباس الحراري المرتفع سيتم حظرها تدريجيا.

➢ **أبرز الإيجابيات**

من اهم الايجابيات لهذه الانظمة هي:

- ✓ **استغلال المكونات الحالية:** يمكنك استخدام نفس (المكثف، صمام التمدد، والمبخر) الموجود في أنظمة الانضغاط التقليدية دون أي تعديل، لأن ضغوط وخصائص الفريونات المهلجنة لم تتغير.
- ✓ **تعديل محدود:** التغيير الوحيد يكون باستبدال "الضاغط الميكانيكي" (Compressor) بـ "الضاغط الكيميائي الحراري" (الممتص، المضخة، والمولد).
- ✓ **تقليل تكلفة التحول:** يوفر تكاليف ضخمة عند رغبة المصانع في التحول من نظام انضغاط يستهلك كهرباء إلى نظام امتصاص يستغل الطاقة الشمسية أو الحرارة المهدرة، حيث لن يحتاجوا لشراء نظام تبريد جديد بالكامل.

اضافة الى الايجابيات الاخرى

- ✓ **تبريد تحت الصفر** :تسمح بالوصول لدرجات تجمد منخفضة دون خوف من تجمد مائع التبريد نفسه.
- ✓ **عدم الحاجة لمُقوِّم (Rectifier)**: الفارق الكبير في درجة الغليان بين المبرد والممتص يمنع تبخر المادة الماصة مع المبرد.

- ✓ **ضغوط تشغيل معتدلة** :تعمل عند ضغوط آمنة وقريبة من الضغط الجوي (لا تحتاج لتفريغ عالٍ أو ضغوط مرتفعة جدا).
- ✓ **سلامة المواد والمعدات** :غير مسببة لتآكل المعادن (عكس الأمونيا التي تأكل النحاس).
- ✓ **انعدام خطر التبلور** :لا تعاني من مشكلة تجمد أو تبلور الأملاح (عكس نظام بروميد الليثيوم).
- ✓ **ثبات كيميائي** :المبردات المستخدمة مستقرة حرارياً في ظروف التشغيل العادية.

➢ **أبرز عيوبها:**

- **انخفاض معامل الأداء** :**(COP)** كفاءتها الحرارية أقل بشكل ملحوظ مقارنة بالأنظمة التقليدية (الأمونيا أو الماء).
- **ضعف التوصيل الحراري** :الخصائص الحرارية للمركبات العضوية والمهلجنة أقل كفاءة في نقل الحرارة.
- **الضرر البيئي** :أغلب هذه المبردات تساهم في الاحتباس الحراري(GWP) مرتفع أو استنزاف الأوزون (للأجيال القديمة).
- **تطايرية المذيب العضوي** :في درجات الحرارة العالية جداً للمولد، قد تبدأ بعض الماصات العضوية بالتحلل أو التبخر جزئياً.
- **حجم معدات أكبر** :تتطلب مضخات ومبادلات حرارية ذات حجم أكبر لتعويض ضعف الخصائص الحرارية[8].

II.5. سلسلة الأمزجة الأيونية الحديثة:(Ionic Liquid Pairs)

جيل متطور ومستقبلي يعتمد على دمج مبرد تقليدي (كالماء أو الأمونيا أو الفريون) مع **سوائل أيونية** (أملاح سائلة في حرارة الغرفة) كمادة ماصة لمنع التبلور والتطاير تماماً.

➢ **أبرز الإيجابيات**

- ✓ انعدام الضغط البخاري للممتص: السوائل الأيونية لا تتبخر مطلقاً في المولد، مما يضمن خروج بخار مائع تبريد نقي 100% دون الحاجة لـ "مُقوّم" (Rectifier).
- ✓ **منع مشكلة التبلور تماماً** :على عكس ملح بروميد الليثيوم التقليدي، تظل السوائل الأيونية في الحالة السائلة عند نطاقات واسعة جداً من درجات الحرارة والتركيزات.
- ✓ **ثبات حراري وكيميائي فائق** :تتحمل درجات حرارة عالية جداً داخل المولد دون أن تتحلل أو تفقد خصائصها مع مرور الزمن.
- ✓ صديقة للبيئة وغير سامة: تمتلك ضغطاً بخارياً معدوماً فلا تنبعث منها غازات ضارة، وتعتبر بديلاً أخضر ومستداماً كيميائياً.

- ✓ **الحد من تآكل المعدات** :السوائل الأيونية المصممة حديثاً تكون أقل عدوانية وتآكلاً لأنابيب النحاس والصلب مقارنة بالحلول الملحية والأمونيا.
- ✓ **مرونة التصميم العالية** :يُطلق عليها العلماء اسم "المذيبات المصممة"، لأنه يمكن هندسة تركيبها الكيميائي وتعديله ليتوافق مع أي مائع تبريد (ماء، أمونيا، أو فريون).

➢ **أبرز عيوبها:**

- **اللزوجة العالية** :تمتاز السوائل الأيونية بلزوجة مرتفعة، مما يصعب عملية ضخها ويزيد من استهلاك مضخة المحلول للطاقة الميكانيكية.
- **انخفاض كفاءة انتقال الحرارة** :لزوجتها العالية تؤدي إلى ضعف معامل انتقال الحرارة، مما يتطلب مبادلات حرارية ذات أسطح أكبر وأكثر تعقيداً.
- **التكلفة الاقتصادية الباهظة** :تكلفة تصنيع وإنتاج السوائل الأيونية في المختبرات والشركات الكيميائية حالياً مرتفعة جداً مقارنة بالماء والأمونيا.
- **محدودية البيانات التجارية** :ما زالت أغلب هذه الأمزجة تحت التطوير والبحث في المختبرات، والتطبيقات التجارية الواسعة لها في السوق لا تزال محدودة.
- **انخفاض معامل الأداء (COP) حالياً** :في بعض الخلائط، تكون كفاءتها الديناميكية الحرارية أقل قليلاً من نظام (الماء/بروميد الليثيوم) القياسي بسبب ضعف خواص النقل الحراري [9].

III.خلاصة الفصل الثاني:

من خلال ما سبق نلاحظ أن لكل من أنواع الخمسة السابق عائق تشغيلي جوهري؛ حيث يكمن العيب الأساسي في نظام ماء وبيروميد الليثيوم (LiBr) في استحالة التبريد تحت الصفر المئوي وخطر تبلور الأملاح، بينما يعاب على نظام الأمونيا والماء (NH_3) سمية غاز الأمونيا ورائحته النفاذة وتسببه في تآكل الأنابيب النحاسية، وتواجه سلسلة الهيدروكربونات المهلجنة عيباً كبيراً في تأثيرها السلبي على الاحتباس الحراري والقيود البيئية الدولية المفروضة عليها، في حين تعاني سلسلة المبردات التي تستخدم الكحول من عدم الاستقرار الكيميائي وتبخر المذيبات العضوية عند درجات الحرارة المرتفعة، وأخيراً تبرز المشكلة الأساسية في سلسلة الأمزجة الأيونية الحديثة في اللزوجة المرتفعة جداً للسوائل الأيونية مما يضعف التبادل الحراري ويزيد من تكلفة التصنيع الباهظة.

يمثل دمج مبردات الجيل الحديث من الهيدروأوليفينات الفلورية (HFOs) مثل R1234yf مع المواص والمذيبات العضوية مثل ثنائي ميثيل إيثر لثلاثي إيثيلين جليكول (DMTrEG) و-Nميثيل-2-بيروليدون (NMP) حلاً هندسياً مبتكراً لتفادي عيوب الأنظمة التقليدية؛ حيث تضمن مبردات HFO الامتثال الكامل للتشريعات الدولية بفضل تأثيرها المعدوم على طبقة الأوزون وانخفاض مؤشر الاحتباس الحراري لديها إلى ما يقارب الصفر، في حين يوفر استخدام DMTrEG و NMP توافقاً كيميائياً

ممتازاً وألفة خلط عالية ترفع من معامل الأداء الكلي للنظام بفضل الخصائص الحرارية المتقدمة مقارنة بالسوائل الأيونية، فضلاً عن تكلفتها الاقتصادية المنخفضة وسهولة تصنيعها تجارياً، كما تمتاز هذه السلسلة بميزة استراتيجية كبرى وهي عدم الحاجة لتغيير أجزاء الدورة الحالية (مثل المكثف والمبخر وصمام التمدد) نظراً لتقارب ضغوط وخصائص هذه المبردات مع أنظمة الانضغاط الشائعة، مما يحمي الآلة من التآكل الكيميائي ويمنع تماماً مشاكل التبلور والتجمد تحت 0 °C ، ويمنح الدورة مرونة تشغيلية عالية وضغوطاً معتدلة تسمح باستغلال الطاقة الحرارية للتبريد بكفاءة واقتصادية عالية.

قائمة المراجع:

[1] Gosney WB. Principle of refrigeration. Cambridge University Press; 1982.

[2] Perez BH. Absorption heat pump performance for different types of solution. International Journal of Refrigeration 1984;7:115–22.

[3] Holmberg P, Berntsson T. Alternative working fluids in heat transformers. ASHRAE Transactions 1990;96:1582–9.

[4] Pongsid S, Satha A, Supachart C. A review of absorption refrigeration technologies.
Renewable and Sustainable Energy Reviews 2001;5:343–72.

[5] Da WS. Comparison of the performances of NH3–H2O, NH3–LiNO3 and NH3–NaSCN absorption refrigeration systems. Energy Conversion and Management 1998;39:357–68.

[6] El-Sayed YM, Tribus M. Thermodynamic properties of H2O–NH3 mixtures: theoretical implementation for use in power cycle analysis. ASME Pub AES 1985;1:89–95.

[7] Ziegler B, Trepp C. Equation of state for NH3–H2O mixtures. International Journal of Refrigeration 1984;7:101–6.

[8] Herold KE, Han K, Moran MJ. AMMWAT: a computer program for calculating the thermodynamic properties of NH3 and H2O mixtures using a Gibbs free energy formulation. ASME Pub AES 1988;4:65–75.

[9] Patek J, Klomfae J. Simple function for fast calculations of selected properties of NH3–H2O system. International Journal of thermodynamic Refrigeration1995;18:228–34

الفصل الثالث:

المنابع الجيوحرارية في الجزائر

تمهيد:

تُصنف الطاقة الحرارية الأرضية، الصديقة للبيئة والمستدامة والموثوقة، كأحد أهم أنواع الطاقة المتجددة. وهي في الأساس الحرارة المتولدة والمخزنة تحت قشرة الأرض، والناجمة عن تكوين الكوكب. ومع ذلك، تشير الطاقة الحرارية الأرضية عمومًا إلى جزء من حرارة الأرض الموجودة في الطبقات السطحية، والتي يمكن استخدامها في تطبيقات صناعية متنوعة. تُعدّ الطاقة الحرارية الأرضية من أهم مصادر الطاقة المتجددة، لما تتميز به من استمرارية وقلة تأثيرها على البيئة. وتعتمد على استغلال الحرارة المختزنة في باطن الأرض في العديد من التطبيقات الحرارية، خاصة أنظمة التبريد والتدفئة.

وتزخر الجزائر بعدة ينابيع حرارية ومصادر جيوحرارية منتشرة عبر مختلف مناطقها، مما يجعلها تمتلك إمكانيات معتبرة لاستغلال هذا المورد الطبيعي.

يهدف هذا الفصل إلى دراسة الطاقة الحرارية الأرضية والينابيع الحرارية في الجزائر، مع إبراز أهم مجالات استغلالها، خاصة في أنظمة التبريد بالامتصاص.

I. الطاقة الحرارية الأرضية :

I.1. تعريف الينابيع الحرارية: تنشأ الينابيع الحارة عندما تتسرب المياه السطحية التي تنتج عن الأمطار والثلوج الى باطن الأرض. ويتكون عدد كبير من الينابيع في المناطق البركانية حيثما تكون الصخور الحارة المنصهرة. تسيل المياه السطحية بالتدريج الى أسفل خلال طبقات من الصخور، حتى يتم تسخينها بالصهارة. بعدئذ يرتفع الماء الى السطح خلال القنوات الموجودة في الصخور. [1]

مثال: الينابيع الحارة في شمال الجزائر**الشكل(III.1).**

الشكل (III-1): الينابيع الحارة بولاية قالمة (حمام المسخوطين) [2]

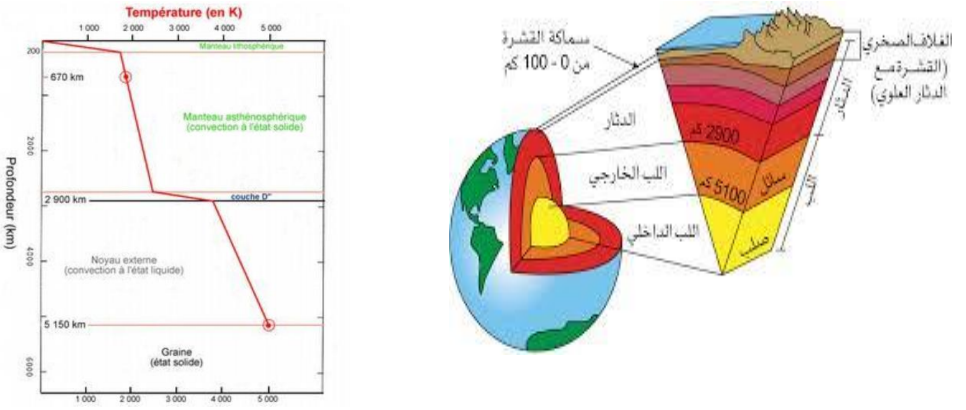
I.2. تعريف الطاقة الحرارية الارضية:

الطاقة الحرارية الأرضية هي كلمة يونانية تتكون من كلمتين "geo" : أي الأرض و "thermie" أي الحرارة في مجال التدفئة **[3]**، هي الكلمة التي تحدد كل من العلم الذي يدرس الظواهر الحرارية الداخلية في الكرة الأرضية، والتكنولوجيا التي تهدف الى استغلالها .تنبعث الحرارة من مركز الأرض، على عمق 6437.4 كيلومترا بدرجات حرارة تقارب 5500°C . تتدفق الحرارة عبر قشرة الأرض بمعدل متوسط يقارب $59\ MW/m^2$.

تتوزع الطاقة الحرارية في باطن الأرض بين الصخور المكونة لها والسوائل الطبيعية الموجودة في شقوقها و مسامتها .تتكون هذه السوائل في الغالب من ماء مع كميات متفاوتة من الأملاح الذائبة؛ وعادة ما توجد في حالتها الطبيعية في الموقع على شكل سائل، ولكنها قد تتكون أحيانا من خليط مشبع من السائل و البخار أو بخار ماء محمص [4-8] .

I.3.أصول (مصادر) الطاقة الحرارية الأرضية:

تتأصل الطاقة الحرارية الأرضية من مصدرين أساسيين في باطن الكوكب؛ المصدر الأول والأكبر بنسبة تصل إلى نحو ثمانين بالمئة يعود إلى التحلل الإشعاعي الطبيعي المستمر للعناصر غير المستقرة في القشرة والوشاح مثل اليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم، في حين يعود المصدر الثاني بنسبة تقارب عشرين بالمئة إلى الحرارة الجوفية المتبقية والبدائية المخزنة منذ نشأة وتكون كوكب الأرض وعمليات الاصطدام والجاذبية قبل مليارات السنين، حيث تتسرب هذه الحرارة الهائلة تدريجياً نحو السطح عبر الحمل الحراري والتوصيل في الصهارة (الماجما) والمياه الجوفية العميقة. الشكل (**III-2**) يبين التركيب الداخلي للأرض ودرجات الحرارة فيها [9، 10] .



الشكل(III-2) : التركيب الداخلي للأرض ودرجات الحرارة فيها و التدرج الحراري الأرضي.[10]

II.تدرج الحرارة الأرضية:

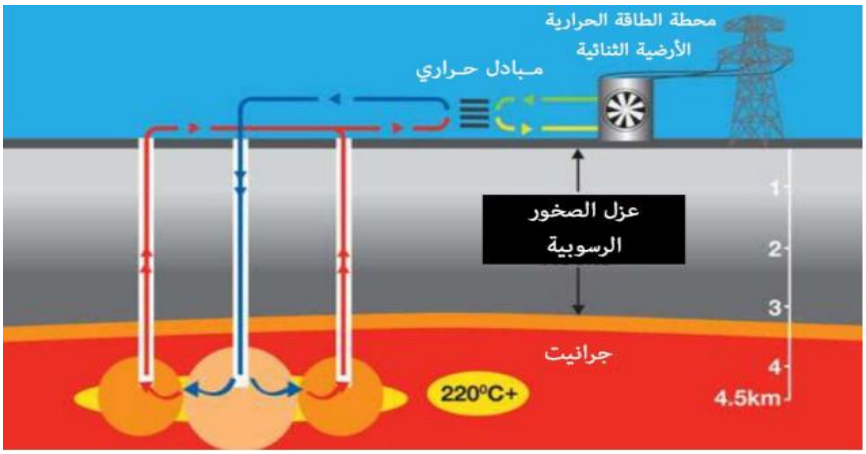
تزداد درجة حرارة الصخور مع العمق، وهذا ما يسمى بالتدرج الحراري الأرضي ويختلف هذا التدرج باختلاف الطبقات التي يمر بها. ويتباين التدرج الحراري الأرضي الملاحظ في القشرة القارية تباينا كبيرا من مكان لآخر، فعلى الرغم من أن القيمة الطبيعية تبلغ حوالي°C 3 لكل 100 m ، الا أن بعض المناطق تسجل قيما تتجاوز°C 100 لكل 100 m ، كما هو الحال في لارديريلو في (ايطاليا) بينما لا تتجاوز قيم مواقع أخرى درجة مئوية واحدة لكل 100 m كما هو الحال في بادوا (ايطاليا) أيضا.[**11**]

III.أنواع الطاقة الحرارية الأرضية:

يعتمد انتاج الطاقة الحرارية الأرضية على نوع الخزان والسائل الحراري الأرضي الموجود. تصنف الطاقة الحرارية الأرضية عالميا الى أنواع وهي كالآتي :

III.1.الطاقة الحرارية الارضية عالية الطاقة:

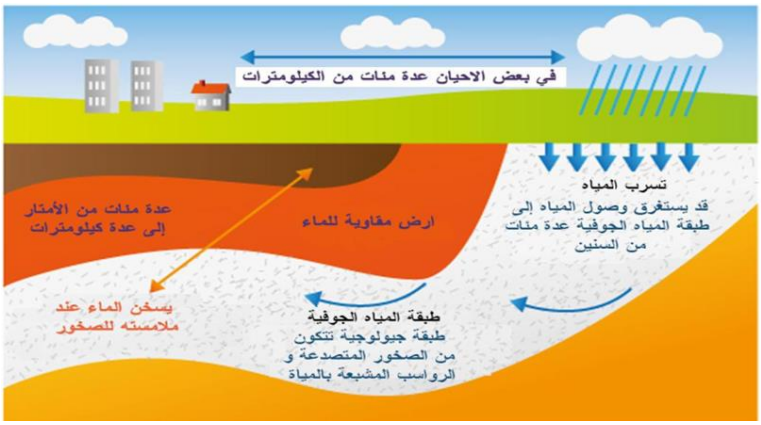
تستغل الطاقة الحرارية الأرضية عالية الطاقة خزانات البخار الجاف أو الرطب (مزيج من الماء و البخار) . وتتميز هذه الخزانات بدرجات حرارة تتجاوزC° 150.توجد الطاقة الحرارية الأرضية عالية الطاقة في المناطق البركانية (البراكين) والمناطق الزلزالية (حدود الصفائح التكتونية) حيث يكون التدرج الحراري الأرضي مرتفعا للغاية . حيث تستخدم الطاقة الحرارية عالية الطاقة بشكل أساسي لتوليد الكهرباء(**الشكل III-3**)، بواسة التوربينات.[12]



الشكل(III-3): الطاقة الحرارية الأرضية عالية الطاقة [13].

III.2.الطاقة الحرارية الأرضية متوسطة الطاقة :

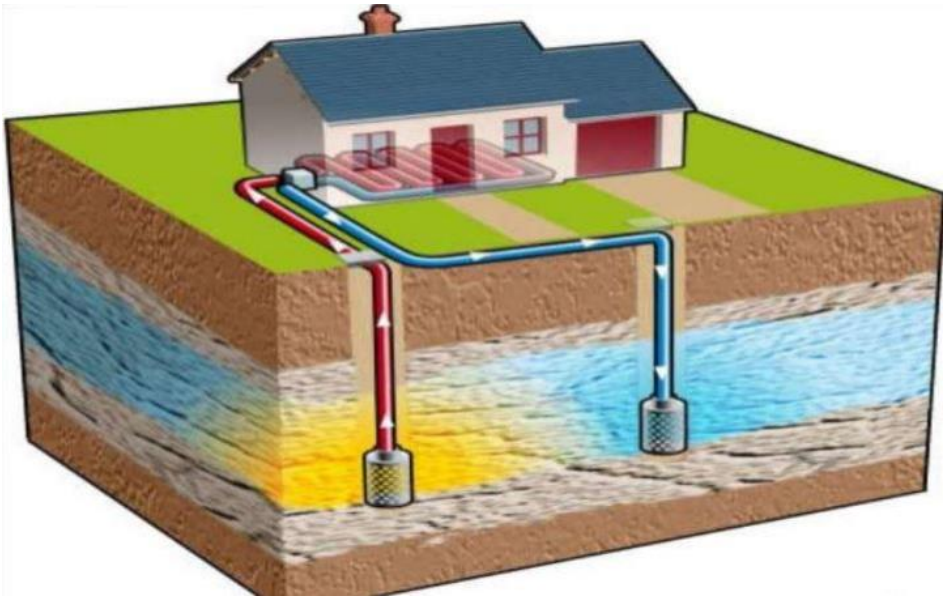
تتميز الطاقة الحرارية الأرضية منخفضة الطاقة بدرجة حرارة تتراوح بينC° 30 و 150 ، ويتم العثور عليها في أعماق متوسطة ما بينm 1000 و2500 ، وذلك ضمن التكوينات النفاذة المشبعة بالمياه و الواقعة أساسا في الأحواض الرسوبية ذات الأبعاد الشاسعة. وتستخدم بشكل أساسي في أنظمة التدفئة الحضرية و تدفئة البيوت البلاستيكية (**الشكل III-4**).[12]



الشكل(III-4): الطاقة الحرارية الأرضية منخفضة الطاقة[13]

III.3.الطاقة الحرارية الأرضية منخفضة الطاقة :

يتم العثور على هذا النوع في أعماق ضحلة (المياه الجوفية السطحية)(**الشكل III -5**)، حيث تكون درجة الحرارة في حدودC° 10الى 30. وتستخدم في تربية الأحياء المائية، والبستنة، وتجفيف المنتجات الزراعية.**[12]**



الشكل(III-5): الطاقة الحرارية الأرضية منخفضة الطاقة [13]

IV.الطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر :

IV.1.تصنيف المناطق المناخية في الجزائر:

الجزائر بلد كبير المساحة (2.381.741كلم ^{2}) . تقع الجزائر في وسط شمال إفريقيا بين خطي طول 8 و121 درجة شرقًا وخطي عرض 38 و351 درجة شمالًا، وهي دولة إفريقية ومتوسطية في آن واحد. يمكن تقسيم الجزائر جيولوجياً بواسطة حزام الجبال الجنوبي إلى جزأين رئيسيين هما المنصة

الصحراوية في الجنوب ونطاق الجزائر الألبي (Alpine) في الشمال. في هضبة الصحراء الجنوبية، تشكل خزانات المياه الساخنة والهيدروكربونات أحواضًا رسوبية كبيرة. وتتميز هذه المنطقة باستقرارها التكتوني.

في الجزائر تم إجراء التصنيف الأول للمناطق المناخية بواسطة CSTB (المركز العلمي والتقني للبناء) في عام ، 1962 والذي يعمل كأساس لحساب أبعاد التدفئة أو تكييف الهواء .التصنيف الثاني الذي يأخذ في الاعتبار البيانات المناخية الأكثر تمثيلا للفترة (1984 -1974) يجعل من الممكن تحديد المناطق المناخية في الجزائر بدقة أكبر .يتوافق هذا النطاق الإقليمي الواسع مع مجموعة متنوعة من المناطق المناخية التي يمكن تصنيفها إلى ثلاث فئات.[**14**]

- التل : مناخ البحر الأبيض المتوسط المعتدل الرطب.
- الهضاب العالية : مناخ قاري(شبه جاف).
- الصحراء : مناخ جاف و حار.

2.IV.الاستكشاف:

في الجزائر ، يعد البحث عن الطاقة الحرارية الأرضية جزًءا من أنشطة مركز تنمية الطاقات المتجددة C.D.E.R بوزريعة و هو أيضا موضوع البحث في سوناطراك (قسم البحث والتطوير). أجريت دراسات الطاقة الحرارية الأرضية بشكل أساسي في شمال الجزائر : تظهر هذه الدراسا حتى الآن، أن البلاد تتوفر إلا على موارد الطاقة الحرارية الأرضية ذات المحتوى الحراري المتوسط أو المنخفض، وهي أكثر ملاءمة للاستخدام المباشر. في الواقع، قامت الوكالة الوطنية للموارد المائية (ANRH) بحصر أكثر من 282 ينبوعًا حارًا في شمال الجزائر. ومن اهمها ، حمام المسخوطين (98C˚)في قالمة، حمام بوطالب(52C˚) في سطيف و حمام بوحنيفية(66C˚) في معسكر .تنبع هذه الينابيع الحرارية العديدة بشكل رئيسي من الحجر الجيري الجوراسي في شمال الجزائر .تم تسليط الضوء على ثلاث مناطق ذات تدرج حراري جوي قوي؛ في الشمال الغربي والشمال الشرقي وشمال وسط الجزائر، ولا سيما في مناطق وهران و القبايل و قسنطينة .بالإضافة إلى الجنوب الجزائري وبالتحديد في الصحراء الشمالية احتياطي مهم من المياه الحرارية وهو طبقة المياه الجوفية. [**15**]

3.IV.المنابع الجيوحرارية في الجزائر : يلخص لجدول(**III-1**) درجات الحرارة لبعض المنابع الحرارية في الجزائر.

الجدول (III-1) : درجات الحرارة لبعض المنابع الحرارية في الجزائر

الينابيع الحرارية	منطقة	العناصر الكيميائية	درجة الحرارة	التدفق
حمام الشلالة	قالمة	كبريتات المغنيسيوم	98	100
حمام بوحجر	عين تموشنت	كلوريد الصوديوم	66.5	-
حمام بوحنيفية	معسكر	بيكربونات	66	-
حمام بوطالب	سطيف	كلوريد الصوديوم	52	-
حمام الصالحين	خنشلة	كلوريد الصوديوم	70	-
حمام الصالحين	سكيكدة	كبريتات المغنيسيوم	55	-
حمام سيدي بو عبد الله	غليزان	كلوريد الصوديوم	51	-
حمام الضلعة	المسيلة	كبريتات المغنيسيوم	42	-
حمام سيدي عيسى	سعيدة	كلوريد الصوديوم	47	-
حمام سيلال	بجاية	كلوريد الصوديوم	46	-
حمام بن هارون	قسنطينة	كلوريد الصوديوم	42	-
الوادي	مناطق مختلفة	كلوريد الصوديوم	65	-
ورقلة مع تقرت	مناطق مختلفة	كلوريد الصوديوم	51-60	-
حمام زلفانة	غرداية	كلوريد الصوديوم	55-60	-

4.IV.الاستغلال :

في الجزائر، تستخدم المياه الحرارية لفوائدها العلاجية منذ القدم. وتشير المنحوتات المكتشفة في مناطق الحمامات إلى وجود مرافق للاستحمام في هذه المناطق قبل العصر الروماني. ومع ذلك، كان الرومان هم من طوروا بشكل أساسي تقنيات جمع المياه الحرارية وتوجيهها. وكثيراً ما بنوا مدنهم بالقرب من هذه الينابيع الحرارية للاستفادة القصوى منها، واليوم ورغم أهمية الإمكانات الحرارية الأرضية في بلادنا، إلا أن استغلالها لا يزال محدوداً ويقتصر بشكل رئيسي على العلاج بالمياه المعدنية والاستخدامات المنزلية أو بعض التطبيقات المباشرة في الابحاث و الدراسات.

منذ عام 1990، بدأ تطبيق حديث للطاقة الحرارية الأرضية في الصحراء الجزائرية. ففي منطقة تقرت، قام فريق من المختبر الحراري التابع لمركز أبحاث الطاقة المتجددة بتركيب أول معدات لتدفئة البيوت الزجاجية، على الرغم من أن هذا التطبيق قد حقق نتائج جيدة، إلا أنه لم ينتشر على نطاق واسع بعد، ولا يزال محدودًا للغاية مقارنةً بإمكانات الطاقة الحرارية الأرضية في جنوب الجزائر. ومع ذلك، تجدر

الإشارة إلى أن استغلال الطاقة الحرارية الأرضية في جنوب الجزائر يمكن تسهيله بشكل كبير بفضل آبار النفط العديدة التي تخترق باطن الأرض الصحراوية **[15]**.

5.IV. إمكانات الطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر :

أظهرت دراسة البيانات الجيولوجية والجيوكيميائية والجيوفيزيائية منابع حارة، تم حصرها في الجزء الشمالي من البلاد. تبلغ درجة حرارة حوالي ثلثها (33%) أكثر من°C 45. حددت الدراسات المتعلقة بالتدرج الحراري ثلاث مناطق يتجاوز فيها التدرج°C 5 لكل m 100 **[16]**.

V.إستخدامات الطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر:

يعتمد إستخدام الطاقة الحرارية الأرضية على درجة حرارة الخزان الحراري الأرضي و في الجزائر المنابع كلها ذات طاقة متوسطة او منخفظة:

1.V.الإستخدام المباشر:

1 - العلاج بالمياه المعدنية(الينابيع الساخنة و الإستحمام في المنتجات الصحية).

2 - الزراعة(البيوت الزجاجية وتدفئة التربة).

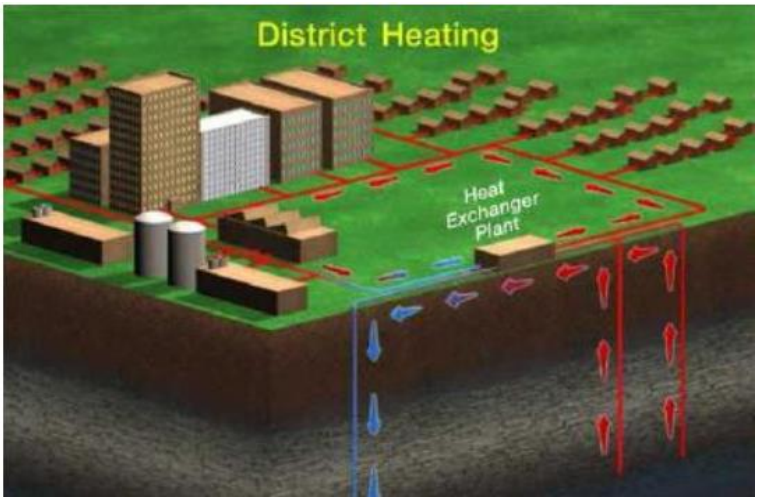
3 - تربية الأحياء المائية(تربية الأسماك و الروبيان والتماسيح).

4 - الإستخدامات الصناعية(تجفيف المنتجات وتسخينها).

5 - التدفئة السكنية والمركزية.

2.V.التدفئة والتبريد:

يمكن إستخدام الطاقة الحرارية الأرضية لأغراض أخرى مثل التدفئة والتبريد، كما هو موضح في الشكل(**III-6**):

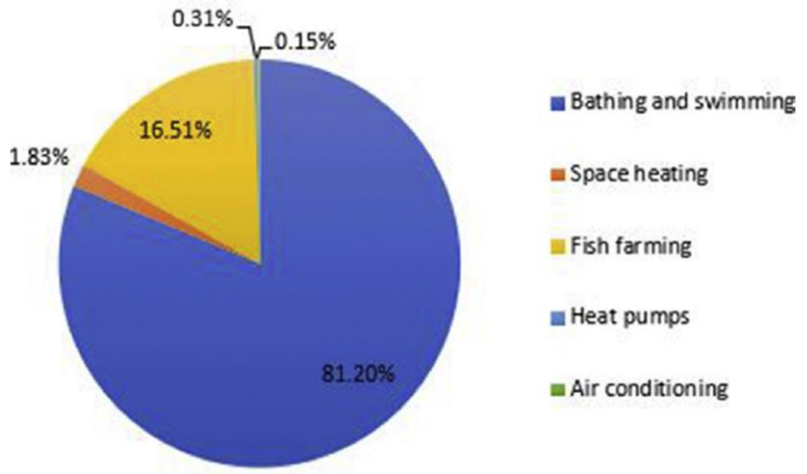


الشكل(III-6): إستخدام الطاقة الحرارية الأرضية في التدفئة والتبريد[17]

3.V.توليد الطاقة الكهربائية:

توليد الكهرباء يحتاج منابع ذات طاقة عالية و هذا غير موجود حاليا في الجزائر على السطح. تجده شركات التنقيب و الحفر أحيانا في بعض الابار البتولية لكن استغلاله في التبريد و التسخين سيكون مكلف و بعيد عن الاحياء السكنية.

يمثل الشكل(**III-7**) توزيع إجمالي القدرة المركبة للطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر.



الشكل(III-7) توزيع إجمالي القدرة المركبة للطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر

من خلال الشكل نلاحظ ان تطبيقات التيريد هي الاضعف.

VI.بعض تطبيقات الطاقة الجيوحرارية في جنوب الجزائر :

1.V.تدفئة البيوت الزجاجية:

في عام 1990، تم تطبيق الطاقة الحرارية الأرضية لأول مرة في تدفئة البيوت الزجاجية في الصحراء الجزائرية (منطقة تقرت وورقلة). تستخدم هذه البيوت لزراعة البطيخ و الطماطم**[19]**، أشرف على المشروع فريق من الباحثين في مركز تطوير الطاقات المتجددة بالجزائر. ورغم أن هذا النموذج حقق نتائج جيدة، إلا أنه لم ينتشر على نطاق واسع بعد. فاستخدام الطاقة الحرارية الأرضية لتدفئة البيوت الزجاجية محدود للغاية مقارنة بالموارد الحرارية الأرضية الهائلة في جنوب الجزائر.

2.V.تربية الاحياء المائية:

تلعب المياه الحرارية دورا مهما في مجال تربية الأحياء المائية (**الشكلIII-8**)، حيث تشكل وسطا ملائما لتربية العديد من أنواع الاسماك. وفي الجزائر، ورغم أن إمكانات المياه الحرارية معتبرة إلا أن تربية الأحياء المائية لا تزال في مراحلها الأولى، ومن أجل تطوير هذا القطاع، قامت الحكومة

الجزائرية بوضع مخطط وطني لتنمية تربية الأحياء المائية، يتضمن تقديم تحفيزات وإعانات لتشجيع الاستثمار الخاص.[20]

بدأت بعض مشاريع تربية الأسماك في الإنتاج بجنوب الجزائر، منها مزرعة حاسي بن حمودة لفحل (غرب غرداية) التي تمتد على مساحة أربعة هكتارات و تنتج حوالي 490 طن سنويا[21]، كما توجد مزرعة بوعريف في ورقلة والتي تحتوي على أمهات أسماك البلطي، بالإضافة إلى مزرعة تربية مائية في حاسي بن عبد الله بورقلة، تنتج أنواع الغامبوزيا والبلطي وكذلك مزرعة مولاي في ورقلة، التي يصل إنتاجها إلى 1000 طن سنويا.

الشكل (III-8): مزرعة حاسي بن عبد الله للاستزراع المائي بورقلة.

VII.إيجابيات و سلبيات الطاقة الحرارية الأرضية:

VII.1.الإيجابيات:

- ✓ مصدر طاقة متجدد و نظيف منخفض الانبعاثات يساهم في تقليل التلوث.
- ✓ يوفر طاقة بشكل مستمر على مدار الساعة(24/24) بخلاف الطاقة الشمسية و الرياح.
- ✓ يتميز بقدرة تشغيل عالية(أكثر من 75%)مما يجعله مصدرا مستقرا للكهرباء.
- ✓ يمكن استخدامه في عدة مجالات: إنتاج الكهرباء، التدفئة، التبريد، والصناعة.
- ✓ يساهم في تعزيز أمن الطاقة لأنه مصدر مجلي وغير مرتبط بالوقود المستورد.
- ✓ يمتلك إمكانيات كبيرة جدا على المستوى العالمي وقد يغطي جزءا مهما من الطلب المستقبلي للطاقة.

2.VII.السلبيات:

- تكاليف الاستثمار الأولية مرتفعة جدا خاصة عمليات الحفر والاستكشاف.
- يعتمد على مواقع جغرافية محددة(مناطق نشاط حراري أرضي).
- وجود مخاطر أثناء الاستكشاف(عدم التأكد من وجود مورد كاف).
- قد يتطلب وقت طويل لإنجاز المشاريع بسبب الإجراءات الإدارية و التقنية.
- بعض المشاريع قد تسبب تأثيرات بيئية محلية(مثل انبعاث غازات أو تغيرات في التربة).
- الحاجة إلى تقنيات متطورة وخبرة عالية خصوصا في الحفر العميق.[22]

VIII. خلاصة الفصل الثالث:

تمتلك الجزائر موارد حرارية أرضية وفيرة نسبياً من النوع منخفض المحتوى الحراري، وهي موارد قابلة للاستخدام المباشر، مما يوفر بديلاً للطاقة النظيفة للحد من الاعتماد على الوقود الأحفوري وتأثيره السلبي على البيئة. تتركز معظم التطبيقات على الاستعمال المباشر لهذه المصادر و نلاحظ ان تطبيقات التيريد هي الاضعف. يندرج هذا العمل في محاولة تطبيق الطاقة الجيوحرارية في الجزائر في التبريد بالامتصاص الذي يعتبر حلا واعدا و مسهامة فعالة في تطبيقات الطاقة الجيوحرارية.

قائمة المصادر و المراجع :

[1] مجلة بيئتنا - الهيئة العامة للبيئة – العدد 119 ,اطلع عليه بتاريخ 2026

[2] Ouali, S., Hadjiat, M., Ait-Ouali, A., Salhi, K., Malek, A., 2018. Cartographie et caract _erisation des ressources g_eothermiques de l'Algerie. Revue des Energies Renouvelables 21 (1), 54e61.

[3] ALAMI, A. (2018). Etude et modélisation d'un système thermique alimenté par énergie géothermique.

[4] Bachiri, A. (2018). Etude d'une installation de chauffage géothermique, Université Mohamed Boudiaf-M'sila

[5] Barbier, Enrico. "Geothermal energy technology and current status: An overview." Renewable and Sustainable Energy Reviews 2002 : 3-65.

[6] Rybach, Ladislaus. "Geothermal Sustainability Assessment Framework." GHC Bulletin (2007) : 1-7.

[7] Geothermal Energy Association. U.S. Geothermal Power Production and Development Update (Aug. 2008).

[8] U.S. Geothermal Power Production and Development Update. Geothermal Energy Association, August 2008.

[9] Energy and Geosciences Institute, University of Utah. Prepared by the U.S. Geothermal Industry for the Renewable Energy Task Force (1997), Briefing on Geothermal Energy. Washington, D.C.

[10] See http://internationalgeothermal.org/

[11] A. Fekraoui et A. Abouriche Centre de Développement des Energies Renouvelables. BP 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

[12] .https://commons.wikimedia.org

[13] Julien HEINTZ (CETIAT). Michaël BLAZY (ANJOS VENTILATION). Ivan BORDAS (VIM). " Les puits canadiens/ provençaux (Guide d informations) "janvier 2008

[14] Corinne Martinet, Jean- pierre Meyer, Travail à la chaleur et confort thermique, INRS 1999

[15] Amirat Belkacem . (2018). Etude d'une installation de chauffage géothermique , Université de M'sila

[16] D. SEMMAR Chargé de Recherche Université Saad Dahleb Blida, Bulletin des Energies Renouvelables, N°5 Juin 2004

[17] http:// geothermal.marin.org/GEO presentation/sld089.htm

[18] http://geothermal.marin.org/GEOpresentqtion/sld036htm

[19] Saibi H. Geothermal resources in Algeria. Renewable and Sustainble Energy Reviews. Official Joumal of the republics of Algeria No.62,Volume 13, Issue 9; 1998,p.2544=2552.

[20] Zouakh D E. La pisciculture en Algeria: cas de pisciculture saharienne. Abstract Proceedings of first day aquaculture saharan envionment, Ouargla; 2010

[21] Zouakh D E. Adjout H, B.Bouali, Meddour A.Perspectives de developpement de la tilapiculture saharienne en Algerie.

[22] International Energy Agency (IEA), The Future of Geothermal Energy, 2024.

الفصل الرابع:

تحليل ومناقشة النتائج

تمهيد:

باستعمال النموذج الرياضي في الفصل الاول و الازواج في الفصل الثاني و معطيات المنابع الحرارية في الفصل الثالث يُخصص هذا الفصل لعرض النتائج المتحصل عليها ومناقشتها من خلال دراسة أداء نظام التبريد بالامتصاص باستعمال المزيجين R1234yf–NMP و–R1234yf DMTrEG . حيث يتم تحليل تأثير مختلف المعلمات التشغيلية على أداء النظام، مع مقارنة خصائص المزيجين من حيث معامل الأداء والكفاءة الحرارية، بهدف تقييم مدى ملاءمتهما في تطبيقات التبريد بالامتصاص باستعمال موائع صديقة للبيئة و مصادر الطاقة الجيوحرارية .

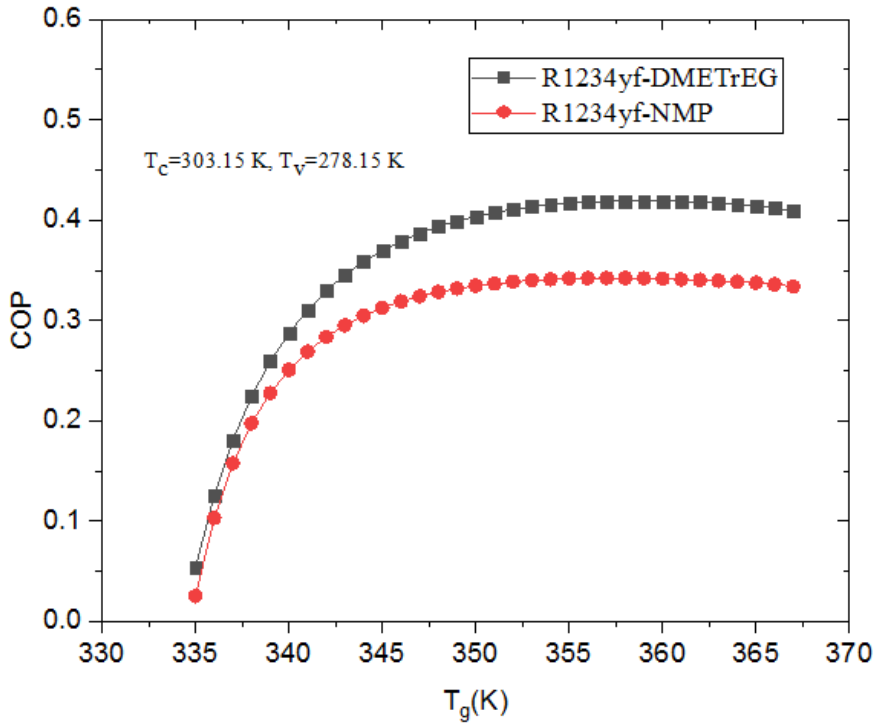
I.تأثير درجة حرارة المولد:

I.1.معامل الأداء(COP) لمختلف أزواج الموائع العاملة عند درجات حرارة مختلفة للمولد:

يوضح الشكل **(IV -1)** تغير معامل الأداء (COP) لنظام التبريد بالامتصاص بدلالة درجة حرارة المولد، باستخدام زوجي الموائع العاملين المذكورين سابقًا. تم اعتماد شروط التشغيل التالية:

درجة حرارة التكثيف والامتصاص Tc = Ta =303.15 K، ودرجة حرارة التبخير Te = 278.15 K ،ومعامل التبادل الحراري EX= 0.8. في هذه الدراسة، تتراوح درجة حرارة المولد بين 335.15 كلفن و365.15 كلفن.هذا المجال الحراري المتوسط (أقل من 370 K) يمكن توفيره بسهولة من مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر، وكذلك من استرجاع الحرارة المهدورة في العمليات الصناعية.

يتضح أن زيادة درجة حرارة المولد (Tg) تؤدي إلى رفع معامل الأداء لنظام التبريد الحراري إلى أن يصل إلى قيمة معينة، بعدها يستقر، وقد ينخفض قليلًا عند درجات حرارة تتجاوز 365 K. كما تختلف نسبة هذا التحسن حسب نوع زوج الموائع العامل. حيث يُظهر مزيج R1234yf-DMETrEG أعلى قيمة لمعامل الأداء، يليه مزيج R1234yf-NMP. ويتراوح معامل الأداء بين 0.0534 و0.4093 عندما تكون درجة حرارة المولد بين 335 K و 367 K بالنسبة لمزيج DMETrEG. أما بالنسبة لمزيج NMP، فإن معامل الأداء يتراوح بين 0.0255 و0.3338 ضمن نفس المجال الحراري.كما يُلاحظ أن الحد الأدنى لدرجة حرارة المولد اللازمة لتشغيل النظام هو 335 K لكلا المزيجين (**الشكلIV-1**). وتمثل هذه الدرجة الحد الأدنى من الطاقة المطلوبة لتشغيل النظام، حيث يكون معامل الأداء ضئيلًا جدًا عندما تكون درجة الحرارة أقل من هذه القيمة. يمكن للمنابع في ورقلة و تقرت و الوادي اعطاء كفاءة مقبولة لهذا النظام.



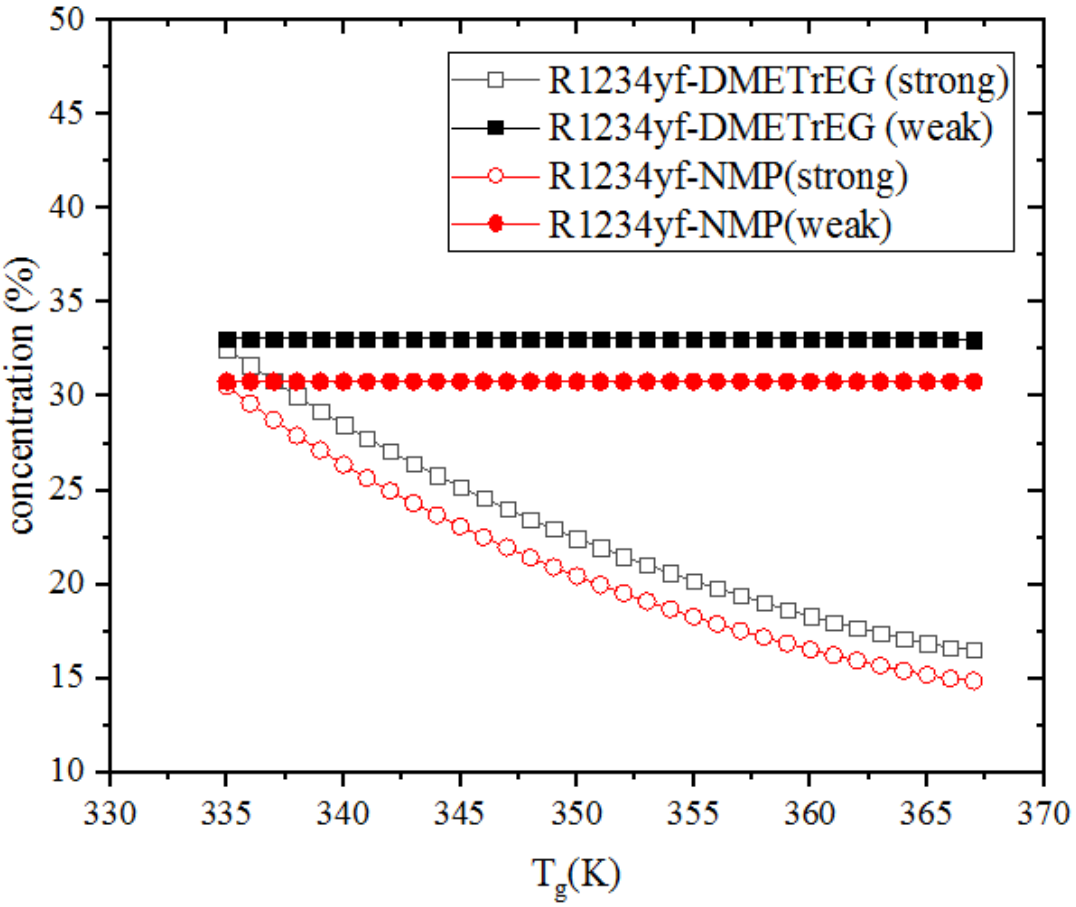
الشكل(IV-1): معامل الأداء(COP) لمختلف أزواج الموائع العاملة عند درجات حرارة للمولد.

2.I. تركيزات المحلول في دورة التبريد بالامتصاص عند درجات حرارة مختلفة للمولد(Tg):

يوضح الشكل (**2-IV**) أن تركيز المحلول الضعيف يصبح أكبر من تركيز المحلول القوي عندما تكون درجة حرارة المولد أقل من الحد الأدنى، وهو وضع غير مرغوب فيه في أنظمة التبريد بالامتصاص إن تغير درجة حرارة مصدر الحرارة يؤثر على تركيز مادة التبريد في المحلول الضعيف بعد عملية الامتصاص. ويبيّن الشكل (**2-IV**) تأثير درجة حرارة المولد على تركيز مادة التبريد، حيث يتمتع R1234yf بذوبانية أعلى في DMETrEG مقارنةً بـ NMP، مما يساعد على زيادة تركيز مادة التبريد في المحلول الضعيف.

ويُعزى ذلك إلى الاختلافات في التأثيرات الفيزيائية بين الجزيئات، حيث يكون عدد الروابط الهيدروجينية في مزيج R1234yf-DMETrEG أكبر وأقوى مقارنةً بمزيج R1234yf-NMP.من جهة أخرى، فإن زيادة درجة حرارة المولد وتركيز المحلول تؤدي مباشرة إلى زيادة الانتالبي (المحتوى الحراري) للمزيج داخل المولد، مما يساهم في رفع معامل الأداء. كما أن زيادة إنثالبي بخار مادة التبريد المحمص الخارج من المولد تؤدي أيضًا إلى تحسين معامل الأداء.

إضافة إلى ذلك، يوضح الشكل **(2-IV)** أن فرق التركيز في مزيج R1234yf-DMETrEG أكبر من ذلك في مزيج R1234yf-NMP. ويرجع ذلك إلى أن مزيج R1234yf-NMP يمكنه امتصاص الحرارة بعد عملية الفصل من خلال تفاعل ماص للحرارة داخل المولد، مما يؤثر على الأداء.كما يؤدي ذلك إلى تحسين معامل الأداء لدورة التبريد بالامتصاص التي تستخدم مزيج R1234yf-DMETrEG.



الشكل(IV-2): تركيزات المحلول في دورة التبريد بالامتصاص عند درجات حرارة مختلفة للمولد(Tg)

3.I. نسبة الدوران(f) في دورة التبريد بالامتصاص عند درجات حرارة مختلفة للمولد:

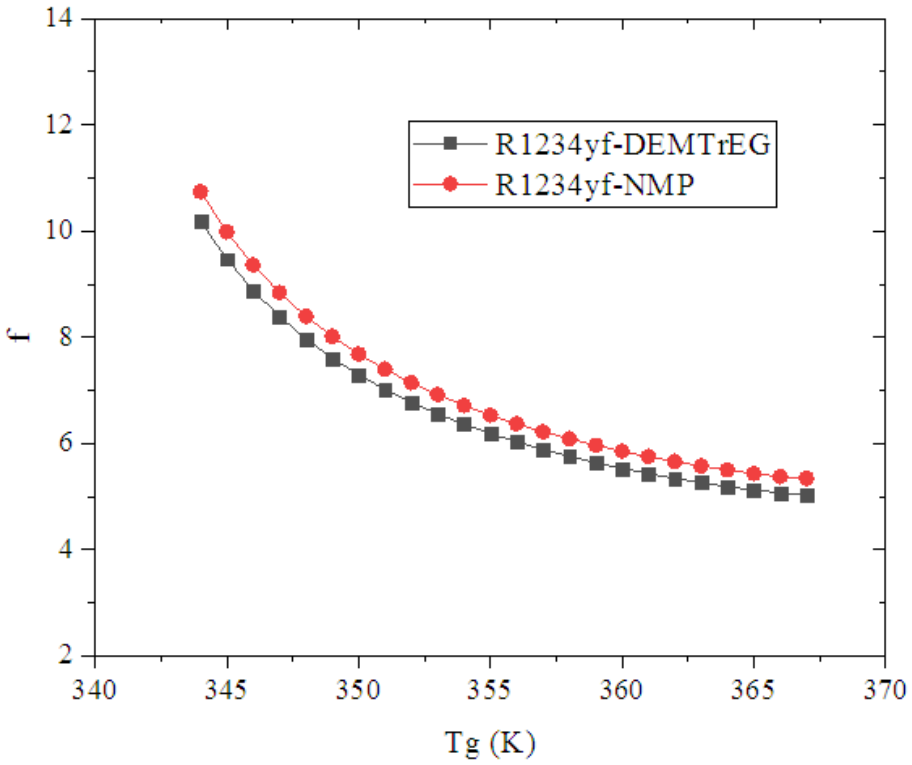
إن زيادة الكسر الكتلي في المحلول الضعيف تؤدي إلى زيادة نسبة الدوران، مع الحفاظ على حمل تبريد ثابت. لذلك، يوضح الشكل **(3-IV)** تغير نسبة الدوران بدلالة درجة حرارة المولد.

حيث يؤدي ارتفاع درجة حرارة المولد إلى انخفاض نسبة الدوران لكلا المزيجين، نتيجة لانخفاض الكسر الكتلي للمحلول الضعيف.يعد الفصل السهل بين مادة التبريد والممتص على مستوى المولد، إلى

جانب الذوبانية العالية لهذين المكوّنين عند درجة حرارة وضغط الممتص، من العوامل المهمة في تحسين أداء النظام.

إن المزيج ذو القابلية العالية للامتزاج يسمح بتحقيق فرق كبير بين تركيب (تركيز) المحلول الضعيف الخارج من الممتص. في المقابل، فإن تركيب المحلول الغني القادم من المولد يؤدي إلى انخفاض معدل الدوران، وإلى تقليل ملحوظ في كمية الحرارة اللازمة لعملية الفصل.كما أن انخفاض نسبة الدوران يؤدي إلى تقليل كمية الحرارة الداخلة إلى المولد، وكذلك تقليل الشغل المطلوب للمضخة لنفس قدرة التبريد في المبخر، مما ينعكس بزيادة معامل الأداء (COP).وتُظهر قيم نسبة الدوران (f) الخاصة بمزيج R1234yf-DMETrEG أنها أقل مقارنةً بمزيج R1234yf-NMP، مما يؤكد مرة أخرى أفضليته.

وتُعطي نسبة الدوران مؤشرًا على حجم آلة التبريد بالامتصاص بالنسبة لوحدة الحرارة المنتجة، حيث يكون الهدف العام هو تقليل هذه القيمة إلى أدنى حد ممكن.وعليه، فإن نتائج الشكل **(3-IV)** تُبيّن أن أبعاد النظام الذي يستخدم مزيج R1234yf-DMETrEG أصغر من أبعاد النظام الذي يستخدم مزيج R1234yf-NMP. وبالتالي، فإن تقليل حجم النظام يؤدي إلى انخفاض تكلفة المعدات.

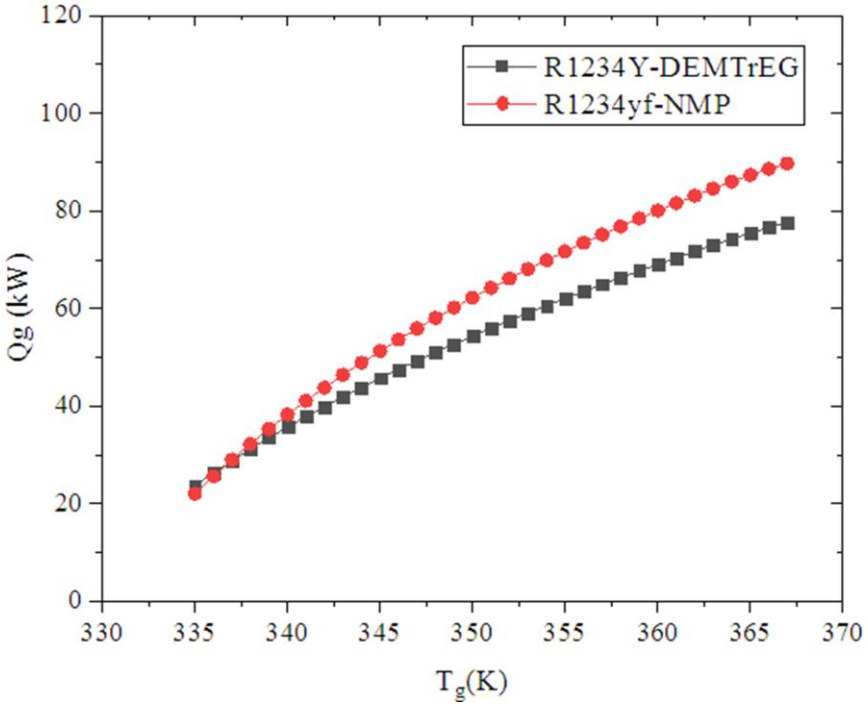


الشكل (3-IV): نسبة الدوران(f) عند درجات حرارة مختلفة للمولد

4.I. تغير القدرة الحرارية للمولد(Qg) بدلالة درجة حرارة المولد(Tg):

انطلاقًا من تحليل النتائج السابقة، يُعد تغير كمية الحرارة في المولد (Qg) بدلالة درجة حرارة مصدر الحرارة أمرًا أساسيًا. يوضح الشكل (**4-IV**) هذا التغير، حيث تزداد القدرة التوليدية لكل من المزيجين مع ارتفاع درجة حرارة المولد.

كما أُشير إليه في تحليل الشكل (**2-IV**)، فإن عملية نزع الامتصاص (Desorption) داخل المولد بين الممتص ومادة التبريد هي عملية ماصة للحرارة (Endothermic)، مما يستلزم تزويد النظام بالحرارة من مصدر خارجي لحدوثها.



الشكل(4-IV): تغير القدرة الحرارية للمولد(Qg) بدلالة درجة حرارة المولد(Tg).

يبين الشكل **(4-IV)** أن أعلى قيم (Qg) (من 22.033 إلى 89.672 KW) ترتبط باستخدام مزيجR1234yf-NMP، في حين تتراوح القيم بالنسبة لمزيج R1234yf-DMETrEG بين 23.749 و 77.595 KW. وهذا يدل على أن استخدام زوج الموائع R1234yf-DMETrEG في نظام التبريد بالامتصاص يتطلب كمية حرارة أقل في المولد مقارنةً بزوج R1234yf-NMP، وهو ما يُعد مؤشرًا إضافيًا على تحسن معامل الأداء (COP).

II.تأثيردرجة حرارةالمكثف:

II.1.تأثير درجة حرارة التكثيف(Tc) على معامل الأداء(COP):

يبين نتائج الشكل **(5-IV)** تأثير درجة حرارة المكثف على أداء أنظمة التبريد بالامتصاص باستخدام موائع عمل مختلفة، وذلك عند درجة حرارة المبخر 278.15 K ، ودرجة حرارة المولد 358.15K، ومعامل التبادل الحراري EX=0.8. درجات حرارة المكثف هي الحرارة المحيطة للمناطق في الجزائر و خاصة ورقلة و تقرت و الوادي.

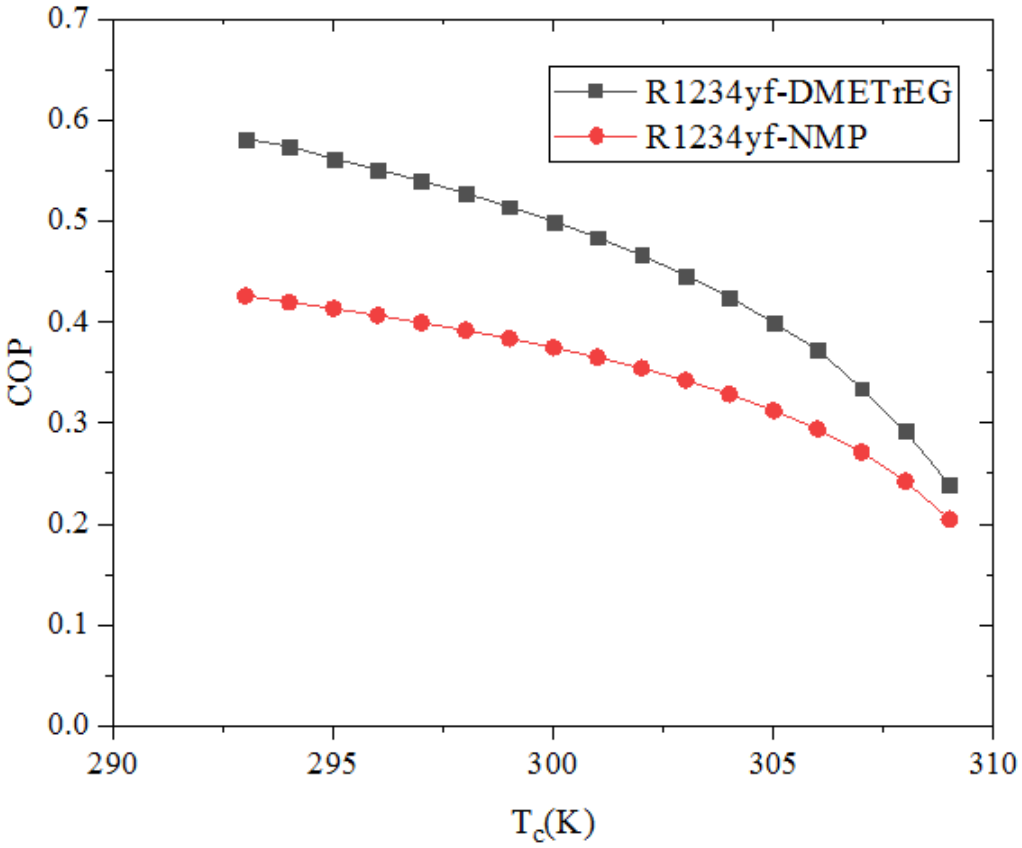
في هذه المحاكاة، تم افتراض أن درجتي حرارة الممتص والمكثف متساويتان. ويتم عادة تبريد المكثف بواسطة الهواء الخارجي اعتمادًا على مبدأ الحمل القسري باستخدام مروحة، أو باستخدام مصدر مائي مثل شبكة المياه، أو المياه السطحية، أو من خلال ماء (أو هواء) يمر عبر مبادل حراري أرضي.وقد تم اختيار درجة حرارة وسط تبريد المكثف (ماء أو هواء) ضمن المجال من 293إلى 310 K ،وهو مجال يتوافق مع معظم مصادر التبريد في مختلف مناطق الجزائر. ومن الملاحظ أن معامل الأداء (COP) لكلا المزيجين المدروسين يُظهر سلوكًا متشابهًا مع تغير درجة حرارة المكثف، حيث ينخفض معامل الأداء مع ارتفاع درجة حرارة المكثف.

يلاحظ أن معامل الأداء (COP) ينخفض مع ارتفاع درجة حرارة المكثف، ويكون هذا الانخفاض أكثر وضوحًا بعد درجة حرارة305 K. ويُفسَّرذلك بأن زيادة درجة حرارة المكثف تؤدي إلى ارتفاع ضغط كل من المكثف والمولد،مما يسبب انخفاض معدل تدفق مادة التبريد الخارجة من المولد، وزيادة فرق الضغط بين جهتي الضغط المرتفع والمنخفض في الدورة، وهو ما يؤدي في النهاية إلى تراجع معامل الأداء.

كما تُظهر نتائج الدراسة أن الدورة التي تستخدم مزيج R1234yf-DMETrEG تحقق أداءً أفضل مقارنةً بالدورة التي تعتمد على مزيج R1234yf-NMP. ويُعزى ذلك إلى أن ضغط بخار المحلول في المولد بالنسبة لمزيج R1234yf-DMETrEG أعلى قليلًا من نظيره في مزيج R1234yf-NMP، مما يؤدي إلى زيادة القوة الدافعة لتدفق مادة التبريد داخل النظام، وبالتالي تفضيل هذا المزيج.كذلك، وعند نفس درجة الحرارة والضغط في المكثف، تكون أنتالبيا المزيج داخل المولد في حالة R1234yf-DMETrEG أعلى مقارنةً بمزيج R1234yf-NMP، مما يساهم في تحسين كفاءة المولد. إضافةً إلى ذلك، فإن حجم المكثف يكون أصغر، مما يؤدي إلى تقليل تكلفة النظام وتقليل كمية مياه التبريد

المطلوبة.وبالرغم من هذه المزايا، فقد اعتُبر مزيج R1234yf-NMP مناسبًا أيضًا لدورة التبريد وفقًا للمعايير المدروسة.

من جانب آخر، تُبرز النتائج جانبًا إيجابيًا مهمًا يتعلق باستخدام مركبات HFO؛ فعند استعمالها كمادة تبريد، مع مركبات عضوية كممتصات مثل DMETrEG و NMP، فإن هذه المركبات تتميز بتطايرية معتدلة، في حين يتميز R1234yf بفارق كبير في درجة الحرارة الحرجة. كما أن بخار مادة التبريد الخارج من المولد لا يحتوي على كميات معتبرة من بخار الممتص، وبالتالي لا توجد حاجة لتركيب جهاز تقويم (Rectifier) بين المولد والمكثف، مما يساهم في تقليل تكلفة النظام مقارنةً بالأنظمة التي تستخدم مزيج الأمونيا-الماء.



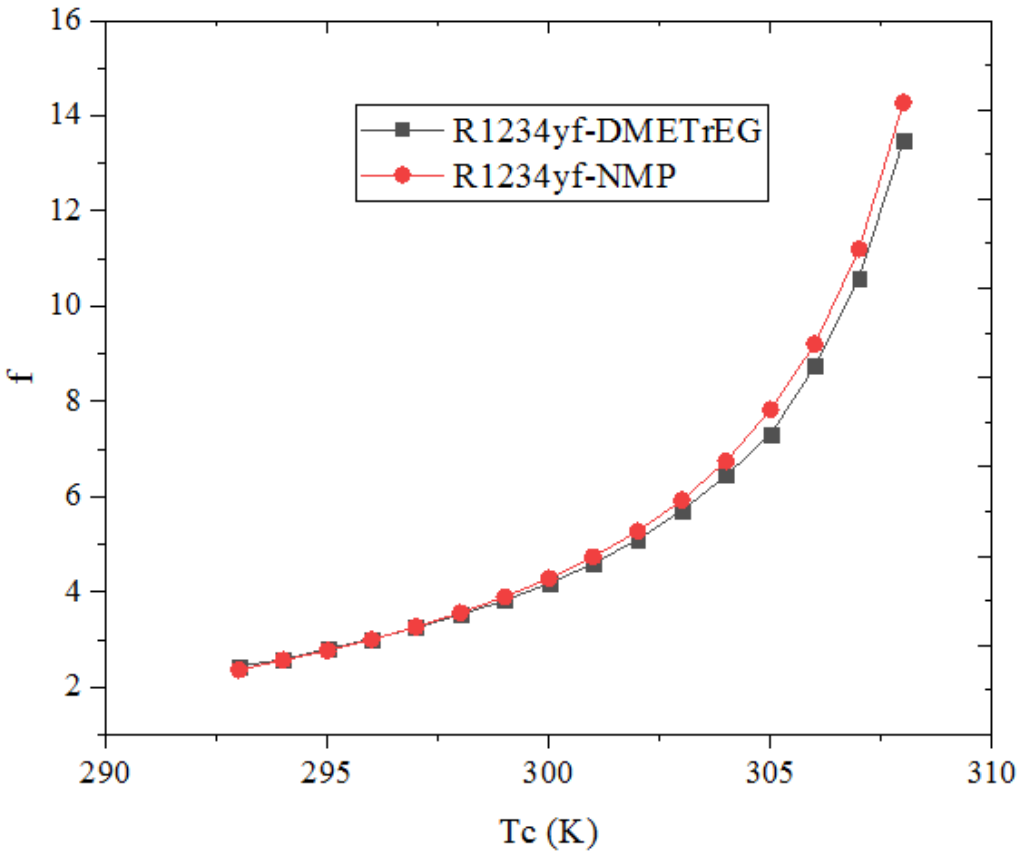
الشكل(IV-5): تأثير درجة حرارة التكثيف(Tc) على معامل الأداء(COP).

II.2. تغير نسبة الدوران بدلالة درجة حرارة المكثف:

يوضح الشكل **(IV-6)** تغير نسبة الدوران بدلالة درجة حرارة المكثف لكل من مزيجي R1234yf-DMETrEGوR1234yf-NMP عند درجة حرارة المولد 358.15 K ودرجة حرارة

المبخر عند 278.15 K. ومع ارتفاع درجة حرارة المكثف (الممتص)، يزداد تركيز الممتص في الممتص، وبالتالي تزداد أيضًا نسبة الدوران.

وتكون قيم نسبة الدوران (f) أقل بحوالي% 2.1 بالنسبة لمزيج R1234yf-DMETrEG مقارنةً بالقيم الناتجة عن مزيج R1234yf-NMP. وتشير نسبة الدوران المنخفضة أساسًا إلى ذوبانية جيدة لمادة التبريد في الممتص.وعندما تنخفض ذوبانية المحلول القوي، تنخفض نسبة الدوران، مما يؤدي إلى انخفاض معامل الأداء (COP).



الشكل(IV-6): تغير نسبة الدوران بدلالة درجة حرارة المكثف.

III.تأثير درجة حرارة المبخر:

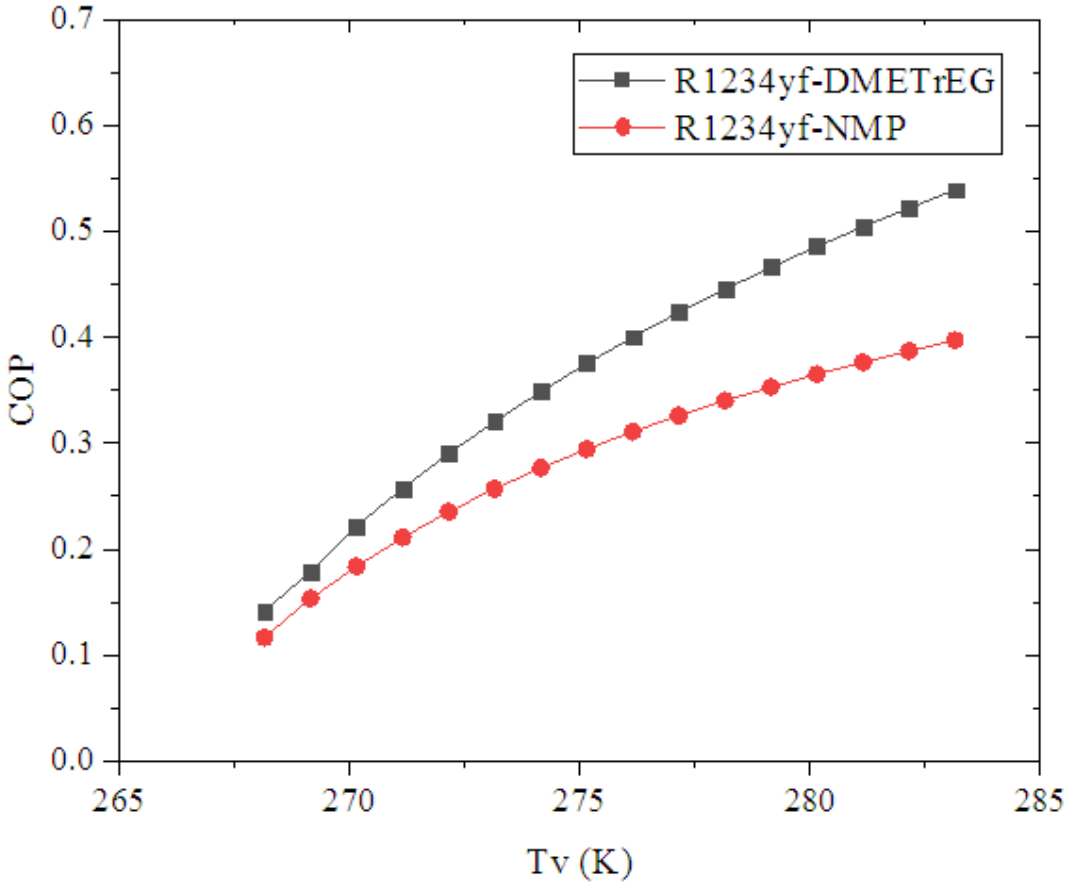
III.1.تغير معامل الأداء(COP) بدلالة درجة حرارة المبخر:

يوضح الشكل **(IV-7)** تغير معامل الأداء (COP) بدلالة درجة حرارة المبخر للمزيجين المدروسين في هذه الدراسة. وتتراوح درجة حرارة المبخر بين 268.15K و283.15K، معثبات

درجةحرارةالمكثف عند303.15 K،ودرجةحرارة المولد 358.15K ،ومعامل التبادل الحراري EX=0.8.

يُلاحظ أن معامل الأداء للدورة التي تعمل بكلا مزيجي موائع العمل يزداد بشكل ملحوظ مع ارتفاع درجة حرارة المبخر. حيث يؤدي ارتفاع إلى انخفاض الحرارة الكامنة للتبخير نتيجة زيادة ضغط الإشباع في المبخر. وتتراوح قيم معامل الأداء لمزيج R1234yf-DMETrEG بين 0.141 و 0.538،بينما تتراوح بالنسبة لمزيج R1234yf-NMP بين 0.116و 0.397. كما أن قيمCOP لمزيج R1234yf-DMETrEG أعلى من تلك الخاصة بمزيج R1234yf-NMP بنسبة تقارب26.29%.

ويرجع ذلك إلى أن ذوبانية R1234yf في DMETrEG أعلى من ذوبانيته في NMP عند الضغط المنخفض. كما أن هذا التغير يعكس توازنًا بين الحرارة الكامنة المتوفرة في المبخر والطاقة الحرارية المطلوبة في المولد لفصل كمية معينة من مادة التبريد.

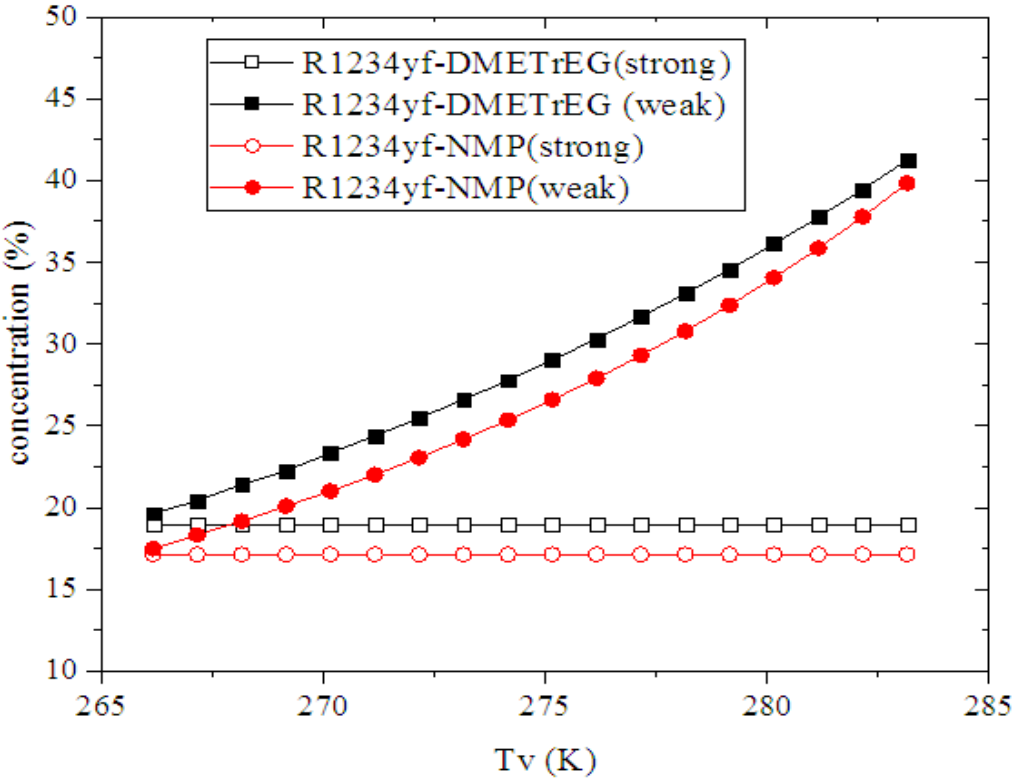


الشكل(IV-7): تغير معامل الأداء(COP) بدلالة درجة حرارة المبخر

2.III. تغير تركيزات المحاليل بدلالة درجة حرارة المبخر:

يعرض الشكل **(8-IV)** تغير تراكيز المحاليل بدلالة درجة حرارة المبخر، حيث تتراوح درجة حرارة المبخر بين 268.15Kو283.15 K. ويُلاحظ أن زيادة درجة حرارة المبخر تؤدي إلى زيادة ملحوظة في تركيز المحلول الضعيف، إلا أن هذا الارتفاع يختلف حسب نوع المزيج المستخدم.وتكون قيم تركيز المحلول الضعيف لمزيج R1234yf-DMETrEG أعلى من نظيرتها في مزيج R1234yf-NMP بنسبة تقارب10.94%.كما أن ارتفاع درجة حرارة المبخر يؤدي إلى زيادة سرعة التفاعل الطارد للحرارة في الممتص، وارتفاع ضغط الإشباع في المبخر، مما يعزز عملية امتصاص مادة التبريد، وبالتالي يزداد تركيز مادة التبريد في المحلول الضعيف.

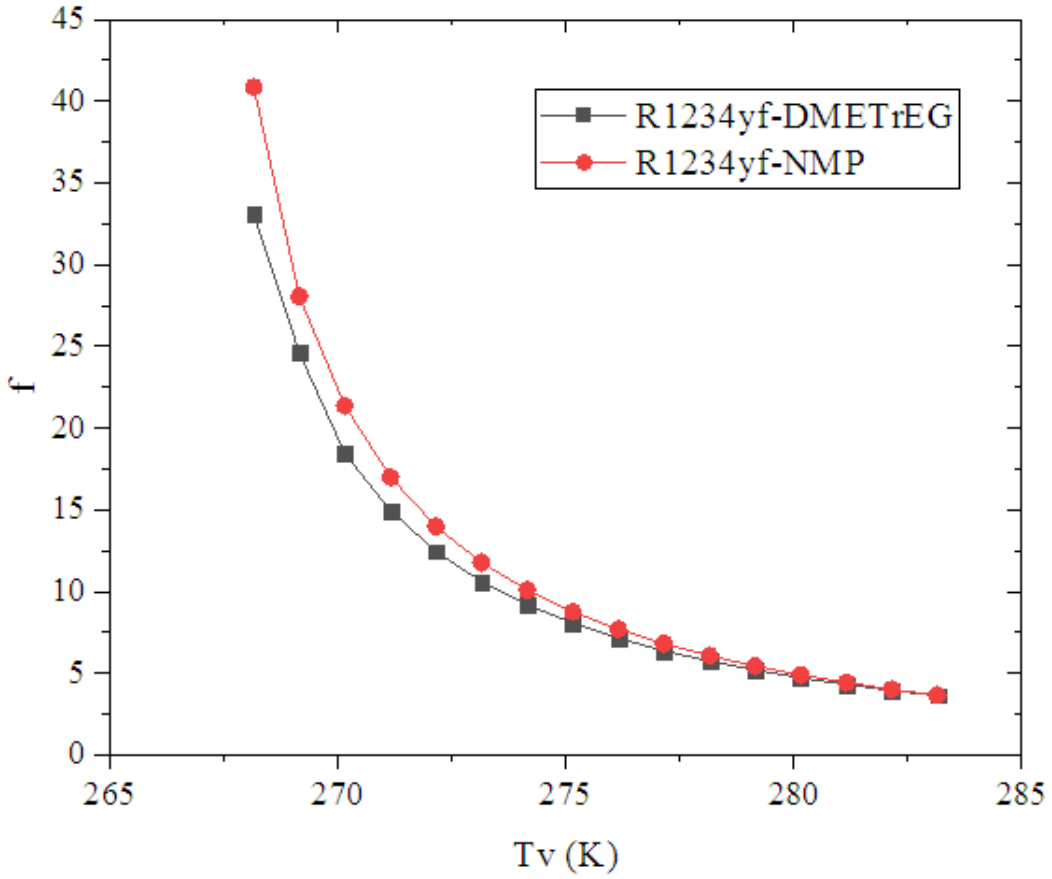
ويُظهر الشكل **(8-IV)** أيضًا أن زيادة درجة حرارة المبخر تؤدي إلى زيادة فرق التركيز بين المحلول الضعيف والقوي لمزيج R1234yf-DMETrEG مقارنةً بمزيج R1234yf-NMP، حيث إن زيادة هذا الفرق تؤدي بدورها إلى تحسين معامل الأداء (COP).وقد تم تحديد حد التشغيل عند درجة حرارة مبخر 266 K لكلا المزيجين، حيث لوحظ أنه بعد هذه الدرجة يصبح فرق التركيز سالبًا، مما يؤدي إلى توقف النظام



الشكل(IV-8):تغير تركيزات المحاليل بدلالة درجة حرارة المبخر.

3.III. تغير نسبة الدوران بدلالة درجة حرارة المبخر:

يوضح الشكل **(9-IV)** تغير نسبة الدوران بدلالة درجة حرارة المبخر عند القيم Tg=258.15 K،وk EX=0.8Tc=303.15K. ومع زيادة درجة حرارة المبخر، تنخفض نسبة الدوران بشكل أسي. كما يتبين من الشكل أن مزيج R1234yf-DMETrEG يتطلب أقل نسبة دوران مقارنة بمزيج R1234yf-NMP. ويؤدي ارتفاع درجة حرارة المبخر إلى زيادة ضغط الإشباع في كل من المبخر والممتص، مما يؤدي إلى انخفاض تركيز المحلول الضعيف في الممتص وزيادة عرض عملية إزالة الغازات.وتؤدي هذه التغيرات مجتمعة في تراكيز الممتص إلى انخفاض نسبة الدوران في النظام.



الشكل(IV-9): تغير نسبة الدوران بدلالة درجة حرارة المبخر.

➢ مقارنة مع الخلائط الموجودة:

استنادًا إلى الدراسات السابقة (Sun وآخرون، 2020؛ Wu وآخرون، 2017؛ Mariappan وآخرون ،Yokozeki2011، 2005؛ Borde وJelinek، Daltrophe، 1995)، تبيّن أنه يمكن استبدال وسيطي التبريد R13بالمائع R1234yf مع الحفاظ على نفس سعة

النظام.وقد تم اختيار الخلائط المعتمدة في هذه المقارنة من بين تلك التي يمكن استبدالها بالخلائط المدروسة في هذا الجزء، دون إحداث تغييرات ملحوظة في أداء أو خصائص النظام. وقد تم اختيار الخلائط التالية لإجراء المقارنة مع الخلائط التي تمت دراستها سابقًا في هذا العمل:

R134a-و ،R152a-NMPو ،R152a-DMETrEGو ،[R1234yf-[hmim][Tf2N .DMETrEG

ومع ذلك، فإن معامل الأداء (COP) للزوج R1234yf مع المواد الماصة العضوية يبقى أقل مقارنةً بالموائع العاملة التقليدية (H_2O-LiBr حسبKühn) (NH_3-H_2O حسبMeyer وZiegler، 2020؛ Sujatha وVenkatarathnam، 2018؛ Wu وآخرون، 2017). وقد أُنجز هذا البحث مع مراعاة العيوب المرتبطة بهذه الموائع التقليدية، مثل السمية، والتبلور، والتآكل، وغيرها.

4.III.معامل الأداء لمختلف الخلائط مقارنة بالخلائط التقليدية عند درجات حرارة مختلفة للمولد:

يوضح الشكل **(10-IV)** نتائج مقارنة معامل الأداء (COP) بدلالة درجة حرارة المولد (Tg) لمختلف الخلائط المدروسة، حيث ثُبتت درجة حرارة كل من المكثف والممتص عند 303.15 K ، بينما كانت درجة حرارة المبخر 278.15 K ، مع تثبيت معامل EX عند 0.8. ويُلاحظ أن معامل الأداء لجميع الخلائط يزداد بشكل ملحوظ مع ارتفاع درجة حرارة المولد إلى أن يبلغ قيمة معينة، ثم يستقر بعد ذلك. كما يتضح أن أعلى قيم لمعامل الأداء للدورة ككل تتحقق عند استخدام الزوج R134a-DMETrEG، حيث تتراوح القيم بين 0.135 و0.541 ضمن مجال درجات الحرارة 330–380 كلفن. في المقابل، يسجل النظام الذي يعتمد على الزوج [R1234yf-[hmim][Tf2N أدنى قيم لمعامل الأداء، إذ تتراوح بين 0.021 و0.206 ضمن المجال الحراري 338–367 كلفن. أما بالنسبة لدورتي R152a-DMETrEG وR152a-NMP، فتتطلبان درجات حرارة مولد أعلى لتحقيق أداء مناسب.

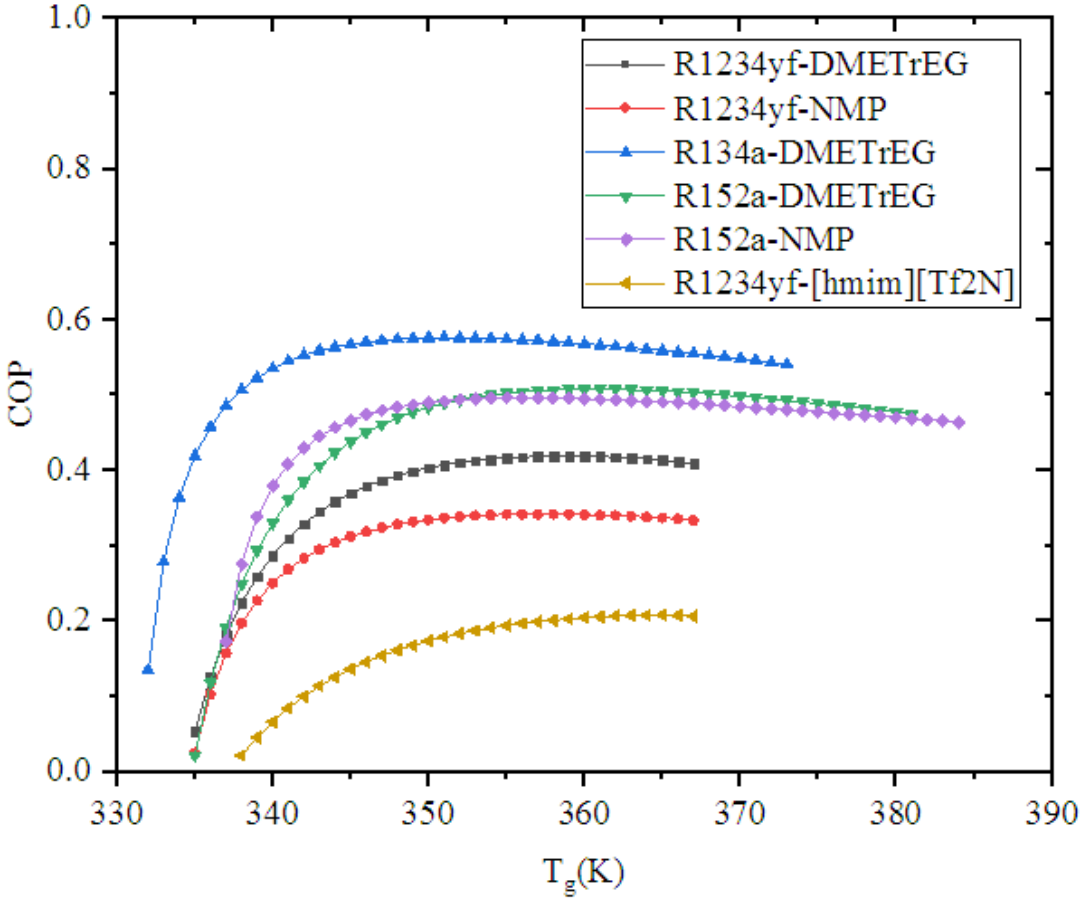
يمكن تصنيف الخلائط إلى فئتين رئيسيتين:

خلائطHFC مع الممتزات العضوية، والتي تتميز بمعامل أداء أعلى.

خلائطHFO مع الممتزات العضوية، والتي يكون أداؤها أقل نسبيًا، مع ملاحظة أن الزوج R1234yf-[[hmim][Tf2N يُظهر أداءً أدنى حتى ضمن هذه الفئة.

يبين الشكل **(10-IV)** كذلك أن الخليط R134a-DMETrEG يحقق أعلى معامل أداء، مما يدل على أن الخلائط المدروسة لا تزال بحاجة إلى تحسينات للوصول إلى نفس مستوى الكفاءة.وبحسب الدراسات

الحديثة، يُعد المائع R1234yf من أبرز المرشحين لاستبدال R134a. غير أن نتائج الشكل **(10-IV)** تشير إلى أنه لا يمكن استبدال R134a مباشرةً بـ R1234yf في أنظمة التبريد بالامتصاص دون إجراء تعديلات على النظام.وعليه، توصي هذه الدراسة باعتماد دورة التبريد بالامتصاص المدعَّمة بالانضغاط من أجل تحسين معامل الأداء (COP) وتوسيع مجال التشغيل للزوج الجديد R1234yf-DMETrEG. ويحتفظ هذا النظام بنفس المكونات الأساسية لنظام الامتصاص أحادي التأثير، إلا أنه يتضمن إضافة ضاغط بين المبخر والممتص، بهدف رفع ضغط وسيط التبريد قبل دخوله إلى الممتص، مما يؤدي إلى تحسين عملية الامتصاص وتعزيز أداء الدورة.



الشكل(10-IV): معامل الأداء لمختلف الخلائط مقارنة بالخلائط التقليدية عند درجات حرارة مختلفة للمولد.

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة:

في ختام هذه الدراسة، تم التطرق إلى تحليل نظام التبريد بالامتصاص كبديل فعال ومستدام لأنظمة التبريد التقليدية، مع التركيز على استخدام موائع تبريد منخفضة الاحتباس الحراري، وتوظيف الطاقة الجيوحرارية كمصدر حراري لتشغيل هذا النظام. وقد أظهرت النتائج أن هذا النوع من الأنظمة يساهم بشكل ملحوظ في تقليل استهلاك الطاقة الكهربائية والحد من التأثيرات البيئية السلبية المرتبطة باستخدام المبردات التقليدية.

كما بيّنت الدراسة أهمية اختيار أزواج الموائع المناسبة، حيث أظهرت الأزواج –R1234yf NMP و R1234yf–DMTrEG خصائص واعدة من حيث الأداء الحراري والاستقرار البيئي، مما يجعلها بدائل محتملة للمبردات التقليدية ذات التأثير العالي على الغلاف الجوي.

أظهرت الدراسة معامل الأداء (COP) ونسبة الدوران جيدتين للامزجة المدروسة، مما يساعد على تحسين تصميم وتشغيل أنظمة التبريد بالامتصاص.من جهة أخرى، تم إبراز الدور الهام للطاقة الجيوحرارية الجزائرية كمصدر طاقة متجدد ومستدام، خاصة في المناطق التي تتوفر فيها موارد حرارية أرضية مثل ورقلة و تقرت، حيث يمكن استغلالها بفعالية لتوفير الطاقة اللازمة لتشغيل هذا النوع من الأنظمة، مما يعزز من استقلالية النظام الطاقوية ويقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري. ويمكن تلخيص النتائج كما يلي

- يُظهر مزيج R1234yf-DMETrEG أعلى قيمة لمعامل الأداء، يليه مزيج R1234yf-NMPعندما تكون درجة حرارة المولد بين 335 كلفن و367 كلفن و هي مجال الطاقة الجيوحرارية في الجزائر.
- تُبرز النتائج جانبًا إيجابيًا مهمًا يتعلق باستخدام مركبات HFOو الممتصات عضوية DMETrEG و NMP ,وهي لا توجد حاجة لتركيب جهاز تقويم (Rectifier) بين المولد والمكثف، مما يساهم في تقليل تكلفة النظام مقارنةً بالأنظمة التي تستخدم مزيج الأمونيا-الماء.
- تُظهر نتائج الدراسة أن الدورة التي تستخدم مزيج R1234yf-DMETrEG تحقق أداءً أفضل مقارنةً بالدورة التي تعتمد على مزيج R1234yf-NMP بدلالة درجات حرارة المكثف التي هي الحرارة المحيطة للمناطق في الجزائر و خاصة ورقلة و تقرت و الوادي.

- مزيج R1234yf-DMETrEG يتطلب أقل نسبة دوران مقارنة بمزيج R1234yf-NMP.

- يُعد المائع R1234yf من أبرز المرشحين لاستبدال R134a

بناءً على ما سبق، يمكن التأكيد على أن دمج أنظمة التبريد بالامتصاص مع موائع تبريد صديقة للبيئة ومصادر طاقة متجددة يمثل توجهاً واعداً نحو تحقيق تنمية مستدامة في قطاع التبريد. ومع ذلك، تبقى هناك بعض التحديات التي تستدعي المزيد من البحث، مثل تحسين كفاءة هذه الأنظمة، وتقليل تكاليفها، ودراسة سلوك الموائع الجديدة على المدى الطويل.

وفي هذا الإطار، توصي هذه الدراسة بضرورة تكثيف الأبحاث المستقبلية حول تطوير موائع تبريد أكثر كفاءة وصديقة للبيئة، إضافة إلى توسيع نطاق استخدام الطاقة الجيوحرارية في التطبيقات الحرارية المختلفة، بما يساهم في تحقيق توازن بين الأداء التقني والحفاظ على البيئة.