جامـــعة قاصـــدي مربـــاح ورقلـــة

كلية الرياضيات و علوم المادة

قسم الفيزياء

مذكرة ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

شعبة: فيزياء

تخصص: فيزياء المواد

مقدمة من طرف الطالبة: بالخير حياة

العنـــوان:

دراسة وتجربة أداء مبرد بلتير من النوع : TEC12-12706 الخصائص الحرارية و المردودية الطاقوية وتطبيقاته في أنظمة التبريد الصديقة للبيئية

نوقشت علنا بتاريخ: 18/ 06/ 2026

أمام اللجنة المكونة من الأساتذة:

بالحاج محمد مصطفى	أستاذ محاضـــر أ	جامعة قاصدي مربـــــــاح ورقلة	رئيسـا
خوجة السبتي	أستاذ محاضـــر أ	جامعة قاصدي مربـــــــاح ورقلة	مناقشا
الحاج بشير بالغيثار	أستاذ محاضـــر أ	جامعة قاصدي مربـــــــاح ورقلة	مناقشا
عطوي محمد	أستاذ محاضـــر أ	جامعة قاصدي مربـــــــاح ورقلة	مشرفـا
بوعنان رابح	أستاذ محاضـــرب	جامعة قاصدي مربـــــــاح ورقلة	مساعد مشرف

2026/2025

الاهداء

أهدي ثمرة هذا الجهد المتواضع إلى

إلى من كان دعاؤهما سر نجاحي وسبب توفيقي في هذه الحياة... إلى **أمي وأبي** حفظهما الله وأطال في عمرهما.

إلى من شاركوني لحظات الفرح والتعب، وكانوا سندي في كل خطوة... إلى **إخوتي وأخواتي**.

إلى كل أصدقائي وزملائي الذين رافقوني خلال مشواري الدراسي، وقدموا لي الدعم والتشجيع.

إلى كل من علّمني حرفًا وكان له الفضل في ما وصلت إليه اليوم.

وإلى كل طالب علم يسعى لتحقيق حلمه رغم الصعوبات.

شكر و عرفان

أولاً، نحمد الله عز وجل الذي وفقنا لإتمام هذا العمل المتواضع، ونسأله التوفيق والسداد في قادم أعمالنا.

أتقدم بجزيل الشكر والامتنان إلى الأستاذ المشرف **خوجة السبتي**

على توجيهاته القيمة، ونصائحه السديدة، ودعمه المستمر طوال فترة إنجاز هذه المذكرة، دون أن أنسى الاستاذين الفاضلين بوعنان رابح وعطوي محمد على ما قدماه لنا من إرشاد وتوجيه فلهما جزيل الشكر .

ولا يفوتني أن أتقدم جميع أساتذة قسم **الفيزياء**على ما قدموه لنا من علم ومعرفة طيلة سنوات الدراسة.

و إلى كل من ساعدني من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل، ولو بكلمة تشجيع أو دعم معنوي.

وفي الأخير، لكل من ساهم في نجاح هذا العمل، أهدي لهم أسمى عبارات التقدير والاحترام.

الفهرس

الترقيم	العنوان	الصفحة
الفصل 1	الأسس النظرية لمبردات بلتير	03
1.1	مبدا تاثير بلتير والظواهر الكهروحرارية المرتبطة طومسون وسيبيك	03
1.1.1	تأثير بلتير	03
1.1.2	مبدأ التأثير سيبيك	04
1.1.3	تأثيرات تومسون	05
1.2	الخصائص الكهربائية لوحدة TEC1-12706	06
1.3	الخصائص الحرارية لوحدة TEC1-12706	08
1.4	هيكل ومواد وحدة TEC1-12706	09
1.4.1	المواد المكونة للوحدة TEC1-12706	09
1.4.2	الهيكل التركيبي للوحدة	11
1.5	أنظمة التبريد	13
1.5.1	التبريد الكهروحراري (Thermoélectrique – Peltier)	13
1.5.2	التبريد بالانضغاط الميكانيكي	14
1.5.3	أنظمة التبريد بالامتصاص	15
1.5.4	أهم الفروقات بين الأنظمة التقليدية والتبريد الكهروحراري	18
1.6	المردودية الطاقوية (COP)	19
1.6.1	القدرة التبريدية (Puissance Frigorifique)	19
1.6.2	الفرق الحراري (ΔT)	19
الفصل 2	مراجعة الدراسات السابقة وتحليل الفجوة البحثية	20

2.1	تطور تقنية التبريد الكهروحراري عبر الزمن	20
2.1.1	البدايات الأولى للاكتشافات الكهروحرارية)1821–1900(	20
2.1.2	تطور تأثير بيلتييه)1834 وما بعده(	20
2.1.3	تأثير طومسون وتوحيد الظواهر الكهروحرارية)1854(	21
2.1.4	تطور معامل الكفاءة الكهروحرارية (ZT) (1909–1954)	21
2.1.5	مرحلة التطور والتطبيقات الصناعية)1960–2000(	22
2.1.6	المفاهيم الحديثة والتطورات النانوية)2000–الآن(	22
2.2	دراسات تجريبية سابقة حول موديل TEC1-12706	23
2.2.1	دراسة أوسيريغا وزملائه (Ourdigha et al., 2025) [28]	23
2.2.2	دراسة مصلح وزملائه (Muchlis et al., 2023) [29]	24
2.2.3	دراسة تيان وزملائه (Tian et al., 2021) [30]	24
2.2.4	دراسة ماريانى وزملائها (Maryani et al., 2023) [31]	25
2.2.5	دراسة هارون وزملائه (Harun et al., 2018) [32]	25
2.2.6	دراسة سلسبيلة وزملاؤها (Salsabila et al., 2019) [33]	26
2.2.7	دراسة مانيلي وزملائه (Mainil et al., 2018) [34]	26
2.2.8	دراسة غونغ وزملائه (Gong et al., 2019) [35]	26
2.2.9	دراسة تشيو وزملائه (Qiu et al., 2020) [36]	27
2.3	تطبيقات مبردات بيلتيير في الأنظمة الصديقة للبيئة والأجهزة المحمولة	27
2.3.1	أهمية مبردات بيلتيير في الأنظمة الصديقة للبيئة	28
2.3.2	تطبيقات مبردات بيلتيير في أنظمة التبريد الجاف	29
2.3.3	تطبيقات مبردات بيلتيير في الأجهزة المحمولة	30

2.3.4	TEC1-12706دور وحدة في التطبيقات الحديثة	33
2.4	تحليل الفجوات البحثية	34
2.4.1	موقع الدراسة الحالية منها	34
الفصل 3	قياسات عملية ونتائج التسخين والتبريد وخصائص المبرد بلتير باستغلال الطاقة الشمسية والألواح الكهروضوئية	36
3.1	تمهيد	36
3.2	الخصائص التجريبية نموذج المبرد بلتير	36
3.2.1	الأدوات والأجهزة المخبرية اللازمة للتصميم	36
3.2.2	مبدأ العمل	38
3.2.3	تركيب التصميم	38
3.3	دراسة خصائص القطعة بلتير عند تطبيق جهد متغير	42
3.4	تحليل وملاحظات علمية على نتائج وجود المشتت	46
3.4.1	(Nanostructuring of Bi2Te3) الهيكلي للمواد الحالية	47
3.4.2	(Advanced Materials) استبدال المواد بأشباه موصلات متقدمة	47
3.5	مقترح التصميم الهندسي لتحقيق الهدف عملياً	48
3.4.1	(Nanostructuring of Bi2Te3) الهيكلي للمواد الحالية	46
3.4.2	(Advanced Materials) استبدال المواد بأشباه موصلات متقدمة	46
3.5	مقترح التصميم الهندسي لتحقيق الهدف عملياً	47
3.6	الخصائص الكهربائية والحرارية والفيزيائية للمواد نصف الناقلة المكونة لـ: TEC1-12706	49
3.6.1	خصائص ومكونات المواد نصف الناقلة (Semiconductor Properties)	49
3.6.2	تحسين خصائص الأداء للمبردات الكهروحرارية	51
3.7	آليات تحسين الأداء من خلال التصميمات الهندسية ودمج تكنولوجيا النانو	52

3.7.1	هندسة الواجهات والحدود البلورية (Grain Boundaries)	52
3.7.2	تقنية ترسيب الطبقات الرقيقة والشبكات الفائقة (Superlattices)	53
3.7.3	إدراج الجسيمات النانوية (Nanoparticle Inclusion)	53
3.8	استعراض ومقارنة المواد المبتكرة ذات الكفاءة العالية	53
3.8.1	التحليل النوعي لعائلات المواد المبتكرة	53
3.8.2	التحليل الكمي والمقارنة الفيزيائية بين عائلات المواد	54
	خاتمة عامة	56
	قائم المراجع	57
	الملخص	61

فهرس المختصرات:

الرمز	المختصر
Al_2O_3	Oxyde d'aluminium
Bi_2Te_3	Tellurure de bismuth
CaO	Oxyde de calcium
COP	Coefficient de performance
DC	Courant continu
DFT	Théorie de la fonctionnelle de la densité
I	Intensité du courant électrique
P_j	Pertes par effet Joule
PWM	Modulation d'impulsion en largeur
Q_p	Flux thermique (Effet Peltier)
R	Résistance électrique
S	Coefficient de Seebeck
TEC	Refroidisseur thermoélectrique
TEC1-12706	Code commercial du module Peltier
V	Tension électrique
ZT	Facteur de mérite thermoélectrique
ΔT	Différence de température
Π	Coefficient de Peltier
τ	Coefficient de Thomson

فهرس الأشكال:

الشكل	العنوان	الصفحة
الشكل 1-1	تأثير بلتير[3]	04
الشكل 1-2	مبدأ التأثير سيبيك[4]	05
الشكل 1-3	رسم توضيحي لتأثير طومسون	06
الشكل 1-4	وحدة TEC1-12706	09
الشكل 1-5	مبدأ عمل الثنائي الحراري المكون من أشباه الموصلات نوع n و p[9]	10
الشكل 1-6	المكونات الأساسية لوحدة بيلتيير[9]	11
الشكل 1-7	المبدأ الأساسي لتأثير بيلتيير في الثنائي الحراري	12
الشكل 1-8	وحدات بيلتيير متعددة المراحل مرتبة بشكل هرمي	13
الشكل 1-9	تصنيف دورات التبريد بالضغط الميكانيكي	14
الشكل 1-10	محول حراري امتصاصي	17
الشكل2-1	رسم تخطيطي لتأثير سبيك	21
الشكل2-2	آلية الانتشار الحراري لحاملات الشحنة واعتماد معاملات الأداء الكهروحراري وبنية المولدات والمبردات الكهروحرارية	22
الشكل2-3	إعدادات توصيل وحدة التبريد الكهروحرارية (TEC) مع المشتتات الحرارية (Heatsinks) والمراوح (Fans)	23
الشكل2-4	نظام تهوية وتبريد كهروحراري صديق للبيئة يعمل بالطاقة الشمسية	29
الشكل2-5	استخدام مبردات بيلتيير في تبريد المعالجات الإلكترونية المحمولة	31
الشكل 3-1	منحنى تغير الشدة المقاسة بدلالة الزمن	41
الشكل 3-2	منحنى تغير درجة حرارة الوجه االساخن بدلالة الزمن	41

الشكل 3-3	منحنى تغير درجة حرارة الوجه االبارد بدلالة الزمن	42
الشكل 3-4	تغييرات التيار المقاس و الاستطاعة الكهربائية بدلالة الجهد المطبق	43
الشكل 3-5	تغيرات خصائص الوحدة بدلالة الجهد المطبق	44
الشكل 3-6	خصائص الوحدة بدلالة الجهد المطبق	45
الشكل 3-7	تغيرات معامل الاداء COP بدلالة الجهد	45
الشكل 3-8	يمثل تغير عامل الجدارة ZT بدلالة درجة الحرارة للمواد التقليدية من النوع nالنوع p	51

فهرس الجداول:

الجدول	العنوان	الصفحة
الجدول 1-1	الأنظمة التقليدية والتبريد الكهروحرار	18
الجدول1-2	الخصائص العامة لمبردات بيلتيير	28
الجدول2-2	أهم تطبيقات مبردات بيلتيير	30
الجدول3-2	مقارنة بين التبريد الكهروحراري والتبريد الانضغاطي	33
الجدول 1-3	الأجهزة المستخدمة	37
الجدول2-3	النتائج المتحصل عليها	40
الجدول 3-3	خصائص القطعة بلتير عند تطبيق جهد متغير بدون مشتت حرارة	43
الجدول 4-3	خصائص القطعة بلتير عند تطبيق جهد متغير بتركيب مشتت حرارة	44
الجدول 5-3	المواصفات التصميمية المقترحة لنظام بلتيير متعدد المراحل	49
الجدول 6-3	استعراض تفصيلي للمواد المبتكرة البديلة وخصائصها الكهروحرارية	54
الجدول 7-3	مقارنة معايير الأداء والخصائص الفيزيائية بين عائلات المواد الكهروحرارية	55

مقدمة عامة

مقدمة عامة

تعتبر الطاقة المحرك الأساسي للحضارة الحديثة، حيث تلعب دورًا حيويًا في جميع جوانب حياتنا اليومية، من تشغيل المنازل والمصانع إلى تيسير وسائل النقل والاتصالات. ومع ذلك، فإن التحديات البيئية الراهنة، المتمثلة في التغير المناخي والاحتباس الحراري، تفرض على المجتمع العلمي ضرورة البحث عن تقنيات طاقوية أكثر استدامة وأقل ضرراً بالبيئة. تُظهر الدراسات أن استخدام الوقود الأحفوري كمصدر رئيسي للطاقة يساهم بشكل كبير في انبعاث الغازات الدفيئة، مما يؤدي إلى تفاقم هذه المشكلات البيئية.

في هذا السياق، تبرز أنظمة التبريد كأحد أكثر القطاعات استهلاكاً للطاقة. حيث تعتمد الأنظمة التقليدية بشكل واسع على دورات انضغاط البخار، التي تستخدم مبردات كيميائية ذات أثر سلبي مباشر على طبقة الأوزون والمناخ العالمي. هذه الأنظمة ليست فقط غير مستدامة، بل أيضاً تساهم في زيادة تكاليف الطاقة وتدهور البيئة.

نتيجة لذلك، اتجهت الأبحاث نحو استغلال الظواهر الفيزيائية "الصلبة" لتحويل الطاقة، وبرزت التكنولوجيا الكهروحرارية **(Thermoelectrics)** كبديل واعد. تعتمد هذه التقنية على تأثير "بيلتير" الذي يسمح بتوليد فرق في درجات الحرارة مباشرة عند مرور تيار كهربائي عبر وصلات أشباه الموصلات. هذا الابتكار يلغي الحاجة تماماً للموائع الغازية والقطع الميكانيكية المتحركة، مما يقلل من التعقيدات والصيانة اللازمة للأنظمة التقليدية.

تتميز هذه المبردات بعدة مزايا، منها صغر حجمها، وغياب الضجيج، والقدرة العالية على التحكم الدقيق في درجات الحرارة. هذه الخصائص تجعلها مثالية للتطبيقات الطبية والإلكترونية الدقيقة[1]، حيث تكون الحاجة إلى دقة التحكم في درجة الحرارة أمرًا حيويًا.

تركز هذه الدراسة على وحدة التبريد الكهروحراري من نوع**TEC1-12706** ، التي تعتمد على مادة تيلوريد البزموت وتستخدم على نطاق واسع في الأنظمة المحمولة. يهدف البحث إلى تقديم دراسة تحليلية وتجريبية لتقييم الخصائص الحرارية والمردودية الطاقوية **(COP)** لهذا النوع من المبردات. كما يستكشف البحث مدى فاعليتها عند دمجها في أنظمة تبريد صديقة للبيئة[2]، مما يسهم في تطوير حلول مستدامة لمشكلات التبريد التقليدية.

إن تحسين أداء هذه الوحدات يتطلب فهماً عميقاً للتوازن بين الحرارة الممتصة وتأثير "جول" المبدد للطاقة. يمثل هذا التوازن جوهر التحدي في رفع كفاءة هذه الأنظمة، حيث يتعين على الباحثين إيجاد طرق لتحسين كفاءة التحويل الحراري وتقليل الفقد الحراري.

لتحقيق أهداف الدراسة، تم تقسيم العمل إلى أربعة مباحث متكاملة

المبحث الأول: يتناول الأسس النظرية والمبادئ الفيزيائية للظواهر الكهروحرارية، مع استعراض خصائص وحدة-**TEC1 12706)**

المبحث الثاني: يركز على مراجعة الدراسات السابقة التي تناولت وحدة**(TEC1-12706)** ، وتحليل الفجوات البحثية لتحديد القيمة المضافة لهذه الدراسة.

المبحث الثالث: يخصص لعرض الجانب التطبيقي من خلال وصف الأجهزة والوسائل المستخدمة، وتحديد المنهجية المتبعة في إجراء التجارب المخبرية و عرض وتحليل النتائج التجريبية المحصلة، وتقييم أداء النظام

الفصل الاول :
الأسس النظرية لمبردات بلتير

الفصل 1 : الأسس النظرية لمبردات بلتير

1 .1 مبدا تاثيربلتير والظواهر الكهروحرارية المرتبطة طومسون وسيبيك :

تُعد الكهروحرارية (Thermoélectricité) ظاهرة فيزيائية ثنائية الاتجاه تربط بين انتقال الحرارة وحركة الشحنات الكهربائية داخل بعض المواد شبه الموصلة. قبل التطرق إلى الظواهر الكهروحرارية المختلفة، يجدر التأكيد على أن انتقال الحرارة في المواد الكهروحرارية لا يعتمد فقط على التوصيل الحراري التقليدي ، يحدث تفاعل مباشر بين النقل الكهربائي والنقل الحراري، مما يؤدي إلى ظهور تأثيرات فيزيائية خاصة تسمح بالتحكم في تدفق الحرارة.[1]

ويُعد هذا التداخل بين الظواهر الكهربائية والحرارية الأساس الذي تقوم عليه التطبيقات الكهروحرارية، حيث يمكن استغلاله إما لنقل الحرارة (كما في التبريد) أو لتوليد الطاقة الكهربائية. ومن هنا تظهر أهمية دراسة تأثير بلتييه كظاهرة رئيسية، قبل الانتقال إلى الظواهر المرتبطة به مثل تأثير سيبك وتأثير طومسون.

1.1.1 تأثيربلتير :

اكتشف الفيزيائي الفرنسي Jean Peltierسنة 1834 هذا التأثير الكهروحراري، والذي يُعد من الظواهر الأساسية في تحويل الطاقة. يتمثل تأثير بلتييه في ظهور فرق في درجة الحرارة عند وصلة مادتين مختلفتين (شبه موصل من النوع pوآخر من النوع n (عند مرور تيار كهربائي عبرهما. وبذلك يمكن للمادة الكهروحرارية أن تولّد تبريدًا أو تسخينًا تبعًا لاتجاه التيار المطبق.في هذا التأثير، تكون كمية الحرارة الممتصة أو المنبعثة Q (W)متناسبة طرديًا مع شدة التيار الكهربائي I (A) ، ويُعبَّر عن ذلك بالعلاقة:

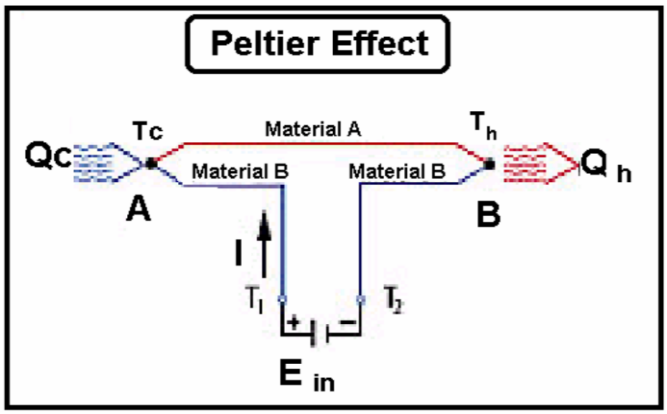
$$Q = \Pi I \qquad (\mathbf{I-1})$$

حيث تمثل Πمعامل بلتييه(V)، وهو ثابت يميز المواد الكهروحرارية.

يُفسَّر هذا السلوك بانتقال حوامل الشحنة (إلكترونات أو فجوات) بين مستويات طاقية مختلفة عند عبور الوصلة. فعندما تنتقل هذه الحوامل من مستوى طاقة منخفض إلى مستوى أعلى (كما في الانتقال من مادة من النوع pإلى مادة من النوع n(، فإنها تمتص طاقة من الشبكة البلورية، مما يؤدي إلى تبريد الوصلة. أما إذا انتقلت من مستوى طاقة مرتفع إلى مستوى أقل، فإنها تفقد طاقة لصالح الشبكة البلورية، وهو ما يؤدي إلى تسخين الوصلة.

يتحكم كل من اختلاف طبيعة المادتين واتجاه التيار الكهربائي في تحديد ما إذا كانت الوصلة ستبرد أو تسخن، مما يؤدي إلى نشوء تدرج في درجة الحرارة. ويُظهر هذا التفاعل بين الظواهر الكهربائية والحرارية إمكانية تطبيق تأثير بلتييه في مجالين رئيسيين:

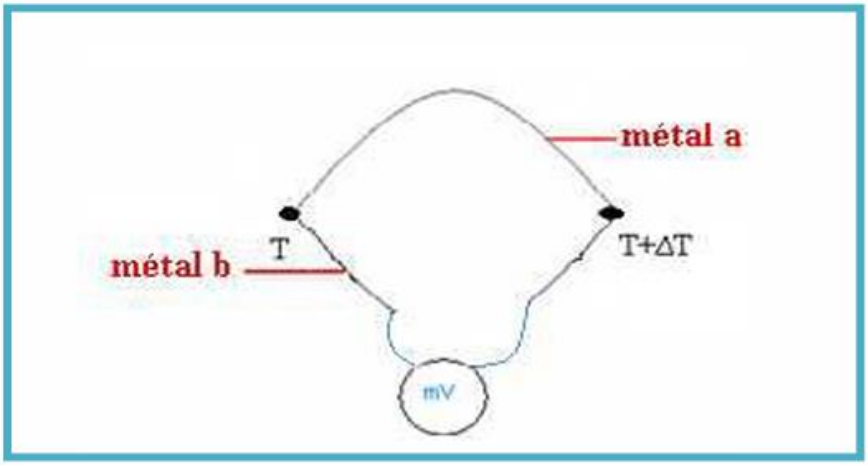
- التبريد الكهروحراري، حيث يتم نقل الحرارة من جسم إلى الوسط الخارجي بفعل مرور التيار الكهربائي .
- توليد الطاقة الكهربائية، وذلك عند فرض فرق في درجة الحرارة على المادة، مما يؤدي إلى توليد جهد كهربائي يمكن استغلاله في دارة خارجية[2].



الشكل 1-1 :تأثير بلتير[3]

2.1.1 مبدأ التأثير سيبيك :

يُعد تأثير سيبيك أحد الظواهر الكهروحرارية الأساسية، وقد اكتشفه الفيزيائي الألماني **Thomas Johann Seebeck** سنة 1821، حيث لاحظ انحراف إبرة مغناطيسية عند وضعها بين موصلين مختلفين خاضعين لتدرج حراري. لاحقًا، تم تفسير هذه الظاهرة بظهور فرق في الجهد الكهربائي عند وصلة مادتين مختلفتين عند وجود فرق في درجة الحرارة بين طرفيهما. وبالتالي، فإن المواد الكهروحرارية تمتلك القدرة على تحويل الطاقة الحرارية مباشرة إلى طاقة كهربائية، ويُعتبر استخدام هذا التأثير أساسًا في قياس درجة الحرارة بواسطة المزدوجات الحرارية (**Thermocouples**).



الشكل 2-1 :مبدأ التأثير سيبيك[4]

عند تطبيق تدرج حراري dTعلى طرفي موصل، ينشأ تلقائيًا فرق في الجهد الكهربائي dVيتناسب طرديًا مع فرق درجة الحرارة. ويُعبَّر عن ذلك بالعلاقة:

$$S_{ab} = \alpha_{ab} = \frac{dV}{dT} \qquad (I-2)$$

حيث يمثل $S_{ab}\ (V/K)$ أو α_{ab}معامل سيبيك الخاص بالمادة، وهو ثابت يحدد مدى استجابة المادة للتغير الحراري. تفسر هذه الظاهرة على انها عند تعريض مادة معدنية أو شبه موصلة لتدرج في درجة الحرارة ΔT، تكون طاقة الإلكترونات أعلى في المنطقة الساخنة مقارنة بالمنطقة الباردة. هذا الاختلاف في الطاقة يؤدي إلى نشوء قوة دافعة تدفع حوامل الشحنة (الإلكترونات) للانتقال من الجهة الساخنة نحو الجهة الباردة.

ينتج عن هذا الانتقال تراكم للشحنات داخل المادة، حيث تتجمع الإلكترونات في الطرف البارد (شحنة سالبة)، بينما تظهر شحنة موجبة نسبية في الطرف الساخن نتيجة نقص الإلكترونات. هذا التوزيع غير المتوازن يؤدي إلى نشوء مجال كهربائي داخلي يعاكس حركة الإلكترونات، ويؤدي إلى حالة توازن بين الانتشار الحراري والقوة الكهربائية المتولدة[4].

3.1.1 تأثيرات تومسون :

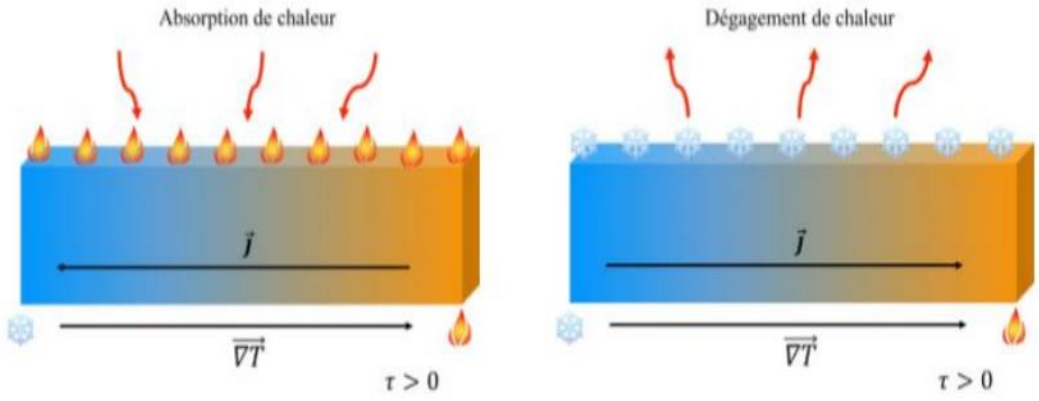
في عام 1851، أظهر الفيزيائي ويليام تومسون أن تأثيرات سيبيك وبلتييه مترابطة. تتجلى هذه العلاقة عندما يتم تطبيق تدرج في درجة الحرارة مع تيار كهربائي في الوقت نفسه.

وعلى عكس تأثيري سيبيك وبلتييه اللذين يتطلبان وجود وصلة بين مادتين مختلفتين، فإن تأثير طومسون يحدث داخل مادة واحدة فقط .وبمعنى آخر، فهو يصف كمية الحرارة الممتصة أو المنبعثة لكل وحدة زمن عندما يمر تيار كهربائي Iفي منطقة من المادة توجد فيها درجة حرارة غير منتظمة (تدرج حراري).

في كل عنصر تفاضلي من المادة dX، يُعبر عن تغير تدفق الحرارة بالعلاقة التي تربط بين تغير الحرارة والمسافة داخل المادة، حيث يصف هذا التغير كيفية انتقال أو توزيع الحرارة على طول الموصل عند مرور التيار الكهربائي.

ويعتمد ذلك على شدة التيار الكهربائي Iوعلى معامل طومسون الذي يحدد استجابة المادة لهذا التفاعل بين التيار والتدرج الحراري.

كما أن التأثيرات الكهروحرارية الثلاثة (سيبيك، بلتييه وطومسون) ليست مستقلة عن بعضها، بل ترتبط فيما بينها بعلاقات فيزيائية أساسية تُعرف باسم **علاقات كلفن**، والتي تربط بين معاملات Sو Πو τ، مما يؤكد وحدة الظواهر الكهروحرارية داخل إطار فيزيائي واحد[5].



الشكل 3-1 :رسم توضيحي لتأثير طومسون

تُظهر التأثيرات الكهروحرارية (سيبيك، بلتييه وطومسون) ترابطًا وثيقًا بين الظواهر الكهربائية والحرارية داخل المواد، حيث تعتمد جميعها على انتقال حوامل الشحنة وتبادل الطاقة مع الشبكة البلورية. وعلى الرغم من اختلاف شروط ظهور كل تأثير، إلا أنها تمثل تعبيرًا موحدًا عن تفاعل التدرج الحراري مع التيار الكهربائي، وهو ما يفسّر إمكانية التحويل المباشر بين الطاقة الحرارية والطاقة الكهربائية في المواد الكهروحرارية

2 .1 الخصائص الكهربائية لوحدة TEC1-12706 :

يعتمد تشغيل الموديول الحراري من نوع TEC1-12706 على تطبيق توتر كهربائي مستمر (DC) بين طرفيه، حيث يؤدي هذا التوتر إلى توليد تيار كهربائي داخل الدارة المكونة من الأزواج الحرارية شبه الموصلة (p-type و n-type). هذا التيار هو المسؤول المباشر عن ظهور تأثير بلتييه ، والذي يسمح بانتقال الحرارة من الجهة الباردة نحو الجهة الساخنة.

من الناحية الفيزيائية، يخضع سلوك الموديول للعلاقة الكهربائية الأساسية التي تربط التوتر بالتيار والمقاومة، وفق قانون أوم:

$$V = IR \qquad (\mathbf{I-3})$$

حيث يمثل Vالتوتر الكهربائي(V)، و I شدة التيار(A)، و R المقاومة الكهربائية الكلية للموديول (Ω) .

كما أن المراجع المتخصصة في مجال الكهروحراريات تشير إلى أن زيادة التوتر المطبق تؤدي إلى زيادة التيار المار داخل الموديول، وبالتالي رفع القدرة الكهربائية المحولة إلى طاقة حرارية منتقلة. إلا أن هذا التأثير يبقى محصورًا ضمن حدود تشغيلية معينة، لأن تجاوز القيم الاسمية يؤدي إلى زيادة الفواقد الحرارية الناتجة عن تأثير جول وتقليل كفاءة النقل الحراري[6].

- **تأثير الجهد على أداء الوحدة :**

تؤثر قيمة التوتر الكهربائي المطبق على وحدة TEC1-12706 بشكل مباشر على طريقة عمله الكهروحراري، حيث يؤدي زيادة التوتر إلى رفع شدة التيار المار داخل الأزواج الحرارية وفق العلاقة الكهربائية الأساسية، مما ينعكس على تقوية تأثير بلتييه المسؤول عن نقل الحرارة بين الجهتين الباردة والساخنة.

لكن هذا التأثير لا يستمر بشكل مثالي أو خطي، لأن رفع التيار يؤدي في المقابل إلى زيادة الفواقد الداخلية على شكل حرارة ناتجة عن تأثير جول داخل المادة شبه الموصلة. لذلك فإن أداء الموديول لا يعتمد فقط على كمية الطاقة الكهربائية المطبقة، بل على توازن دقيق بين القدرة الحرارية المفيدة الناتجة عن تأثير بلتييه وبين الفواقد الحرارية الناتجة عن التسخين الأومي .ومن الناحية الفيزيائية[7]، يمكن تمثيل الفواقد الناتجة عن تأثير جول بالعلاقة:

$$P_J = I^2R \qquad (\mathbf{I-4})$$

Pj : الاستطاعة المبددة بجول (W)

R : المقاومة الكهربائية الداخلية (Ω)

- **التيار الكهربائي :**

تتميز وحدة التبريد الكهروحراري TEC1-12706 ببنية داخلية تتكون من 127 زوجاً من العناصر شبه الموصلة ، ما يتيح نقل الحرارة بين اوجه الوحدة. ويجعل هذا المبدأ الفيزيائي أداء الموديول مرتبطاً بشكل مباشر بالشروط الكهربائية المطبقة عليه، خصوصاً من حيث التيار الكهربائي المار داخله. ففي حدود التشغيل القصوى، يمكن أن يصل التيار إلى حوالي 6.0–

6.4 أمبير عند جهد يتراوح بين 14.4 و16.4 فولت، وهي قيم تمثل الحد الأعلى للتشغيل، ولا يُنصح بالاستمرار عندها لتجنب الإجهاد الحراري وتقليل العمر التشغيلي للوحدة.

وفي التطبيقات العملية، يُفضل تشغيل الوحدة ضمن مجال تيار يتراوح بين 3 و5 أمبير عند جهد اسمي يقارب 12 فولت تيار مستمر، حيث يحقق ذلك توازناً بين كفاءة التبريد واستقرار الأداء واستهلاك الطاقة. كما أن المقاومة الداخلية للموديول تُقدَّر تقريباً بين 1.98 و2.30 أوم، وهي قيمة غير ثابتة عملياً، إذ تتغير تبعاً لدرجة حرارة الجانب الساخن أثناء التشغيل، مما يؤدي إلى تغير في شدة التيار وبالتالي التأثير على الأداء العام.

ومن ناحية القدرة الطاقوية، تتطلب وحدة TEC1-12706 قدرة كهربائية تقارب 60 إلى 72 واط في ظروف التشغيل القصوى، مع التوصية باستخدام أنظمة تحكم في التيار مثل PWM أو مصادر تيار ثابت، بهدف ضمان استقرار الأداء وتقليل الفواقد الناتجة عن زيادة التيار أو سوء التبريد الحراري للجانب الساخن.

3 .1 الخصائص الحرارية لوحدة TEC1-12706

تُعتبر وحدة TEC1-12706 حل بارز في مجال التحكم في درجات الحرارة، حيث تعتمد على ظاهرة التأثير الكهروحراري. هذه الظاهرة تسمح بتحويل الطاقة الكهربائية إلى حرارة داخل المواد شبه الموصلة، مما يتيح لها أداء وظائف متعددة تتراوح بين التبريد والتسخين. [8]

- **المبدأ الحراري للتشغيل لوحدة:**

تعتمد وحدة TEC1-12706 على ظاهرة فيزيائية تُعرف بالتأثير الكهروحراري. هذه الظاهرة تعمل على تحويل الطاقة الكهربائية إلى حرارة داخل المواد شبه الموصلة.

عندما يمر تيار كهربائي عبر الوحدة، يتم إعادة توزيع الطاقة الحرارية بشكل يؤدي إلى امتصاص الحرارة من جهة معينة ونقلها إلى الجهة المقابلة. نتيجة لذلك، تتشكل منطقتان داخل الوحدة تختلفان في درجات الحرارة: واحدة باردة والأخرى ساخنة.

هذا السلوك الفيزيائي هو الأساس الذي تعتمد عليه تقنية TEC1-12706 في تطبيقات التبريد والتسخين، مما يجعلها فعالة في استخدامات متعددة تتطلب التحكم في درجات الحرارة.

- **سلوك فرق درجة الحرارة لوحدة:**

تُعتبر قدرة وحدة TEC1-12706 على إنشاء فرق واضح في درجة الحرارة بين وجهيها أثناء التشغيل من أهم خصائصها الحرارية. هذا الفرق الحراري يُعتبر المؤشر الأساسي الذي يُستخدم لتقييم أداء الوحدة وكفاءتها في نقل الحرارة.

يعتمد هذا السلوك بشكل كبير على ظروف التشغيل، وخاصة طبيعة وشدة التيار الكهربائي المطبق. كلما زادت شدة التيار، زاد الفرق في درجات الحرارة بين الجهتين.

كما أن هذا التغير في درجة الحرارة يعكس بشكل مباشر مدى فعالية عملية انتقال الحرارة داخل الوحدة، مما يجعلها أداة فعالة في تطبيقات التبريد والتسخين.

- **التحكم في انتقال الحرارة لوحدة :**

تتميز وحدة TEC1-12706 بإمكانية التحكم في عملية انتقال الحرارة بطريقة مباشرة وبسيطة نسبيًا. يتم هذا التحكم من خلال تنظيم التيار الكهربائي المار داخل الوحدة، مما يسمح بتحديد اتجاه وكفاءة انتقال الحرارة من جهة إلى أخرى. هذه الخاصية تجعل الوحدة قابلة للاستخدام في تطبيقات متعددة تتطلب تحكمًا دقيقًا في درجة الحرارة، سواء في التبريد أو في التسخين، دون الحاجة إلى أنظمة ميكانيكية معقدة.

- **مرونة التشغيل الحراري :**

تمتاز الوحدة بمرونة تشغيلية عالية، حيث يمكن استخدامها في وضعين حراريين مختلفين، وهما التبريد والتسخين. هذه المرونة تعني أنه يمكن للمستخدم الانتقال بسهولة بين هذين الوضعين ببساطة عن طريق تغيير اتجاه التيار الكهربائي، مما يتيح استخدام الوحدة في مجموعة متنوعة من التطبيقات.

على سبيل المثال، في حالة الحاجة إلى التبريد، يتم توجيه التيار بطريقة تؤدي إلى امتصاص الحرارة من جانب واحد، مما يجعل هذا الجانب باردًا، بينما يتم تسخين الجانب الآخر. على العكس، إذا كانت هناك حاجة للتسخين، يمكن تغيير اتجاه التيار ليعمل على تسخين الجانب المطلوب.

تجعل هذه الخاصية الوحدة قابلة للتكيف مع متطلبات التطبيقات المختلفة، خاصة تلك التي تحتاج إلى تحكم مستمر في درجة الحرارة ضمن نظام واحد. وبالتالي، فإن TEC1-12706 تعد خيارًا مثاليًا للعديد من الاستخدامات، بدءًا من الأجهزة المنزلية إلى التطبيقات الصناعية.

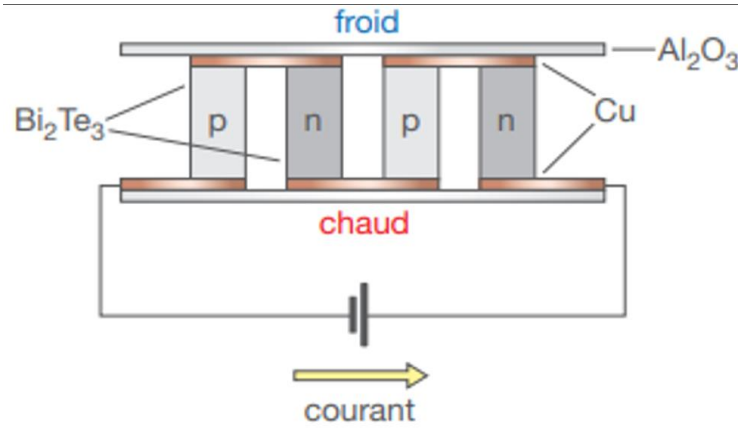
4 .1 هيكل ومواد وحدة TEC1-12706 :

شكّل فهم التركيب المادي والمكوّنات الأساسية لوحدة التبريد الكهروحراري خطوةً جوهريةً نحو استيعاب آلية عملها وتحليل أدائها الحراري والكهربائي

الشكل 4-1 :وحدة TEC1-12706

1.4.1 المواد المكونة للوحدة TEC1-12706

يُعدّ تيلوريد البزموث (Bi_2Te_3) المادة شبه الموصلة الأكثر ملاءمةً للعمل في درجة الحرارة المحيطة، حيث يُستخدم مع تشويب من النوع n (غني بالإلكترونات) والنوع p (غني بالفجوات/الثقوب) (**الشكل 5. I**) تعتمد كفاءة الوحدة على الاختلاف الكبير في معامل سيبك بين هذين النوعين من أشباه الموصلات لتوليد أقصى جهد كهروحراري ممكن.



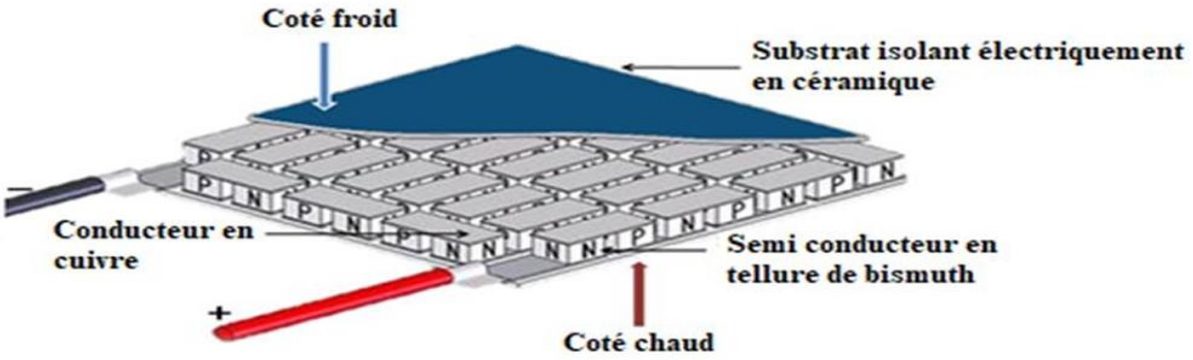
الشكل 5-1 :مبدأ عمل الثنائي الحراري المكون من أشباه الموصلات نوع n و p[9]

- **الجسور النحاسية للربط الكهربائي**

تستخدم وحدة TEC1-12706 جسورًا مصنوعة من النحاس عالي التوصيل لربط أطراف الكتل شبه الموصلة، سواء كانت من النوع P أو النوع N. يُعتبر النحاس خيارًا مثاليًا لهذا الغرض بفضل قدرته العالية على السماح للإلكترونات بالحركة بحرية. هذا الأمر يسهل انتقال الشحنات بين الوصلات، مما يقلل من الفقد في المقاومة الكهربائية الداخلية للوحدة. بالتالي، يساهم هذا التصميم في تحسين كفاءة الأداء العام للوحدة.

- **الركائز الخزفية العازلة: أكسيد الألومنيوم (Al_2O_3)**

تُغلف الوحدة من الجانبين بلوحين رقيقين مصنوعين من السيراميك، وعادةً ما يكونان من أكسيد الألومنيوم (Al_2O_3). تلعب هذه الطبقة الخزفية دورًا حيويًا، حيث توفر عزلًا كهربائيًا فعالًا لمنع حدوث قصر في الدارة بين الوحدة ومصدر الحرارة. بالإضافة إلى ذلك، تتميز هذه المواد بتوصيل حراري عالي، مما يساعد على تقليل التدرج الحراري بين المصدر والموصل، وبالتالي يضمن نقلًا حراريًا فعالًا.



الشكل 6-1 :المكونات الأساسية لوحدة بيلتيير[9]

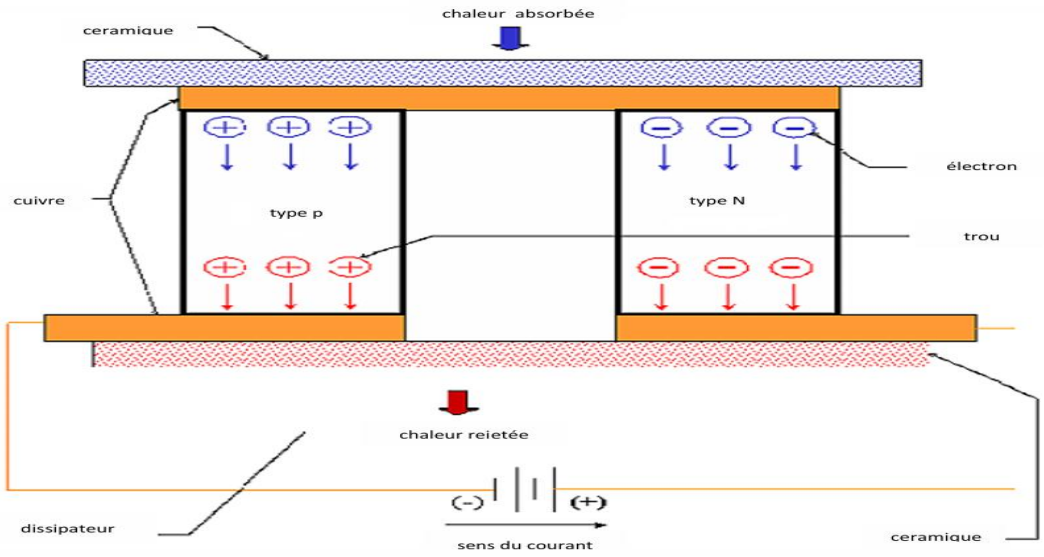
- **مواد العزل والحماية من التكثيف**

نظرًا لأن الوجه البارد للوحدة قد تصل حرارته إلى ما دون درجة حرارة المحيط، فإن ظاهرة التكثيف تُعتبر مشكلة شائعة قد تؤدي إلى التآكل أو حدوث دوائر قصر. لذلك، يُستخدم ماسك (مادة لاصقة) من نوع مطاط السيليكون كعامل عزل فعال لحماية الرقاقة الداخلية من الرطوبة والماء. هذه المادة تعزز موثوقية الوحدة وتزيد من عمرها التشغيلي، مما يجعلها خيارًا مثاليًا للاستخدام في ظروف مختلفة.

2.4.1 الهيكل التركيبي للوحدة :

- **المكون الأساسي: الثنائي الحراري(Thermocouple)**

يُعتبر الثنائي الحراري أصغر وحدة تركيبية في عنصر بيلتيير، حيث يتكون من موصلين كهربائيين مصنوعة من مادتين مختلفتين في معامل سيبك. يتم ربط كتل أشباه الموصلات، من النوع P والنوعN ، عند أطرافها بواسطة النحاس. يهدف هذا الترتيب إلى توليد فرق جهد كهروحراري عندما تتعرض الوصلتان لدرجتي حرارة مختلفتين. هذا الفرق في درجة الحرارة يولد جهدًا كهربائيًا، مما يسمح بتوليد الطاقة أو التحكم في درجة الحرارة في التطبيقات المختلفة.



الشكل 1-7 :المبدأ الأساسي لتأثير بيلتيير في الثنائي الحراري

- **تجميع العناصر الحرارية :**

تتكون الأجيال الحالية من وحدات بيلتيير من مجموعة كبيرة من الثنائيات الحرارية المتصلة كهربائيًا على التوالي عبر جسور نحاسية، بينما تكون موصولة حراريًا على التوازي. هذا التصميم يضمن تحقيق كفاءة عالية في نقل الحرارة، حيث تُعزل هذه الجسور حراريًا من كلا الجانبين بواسطة الألواح الخزفية، مما يحافظ على عزلها الكهربائي عن بعضها البعض. هذه العزلة تمنع التداخل في الدارة الكهربائية وتساعد في تحسين أداء الوحدة.

- **تكوين الوحدة التجارية: (Module Peltier)**

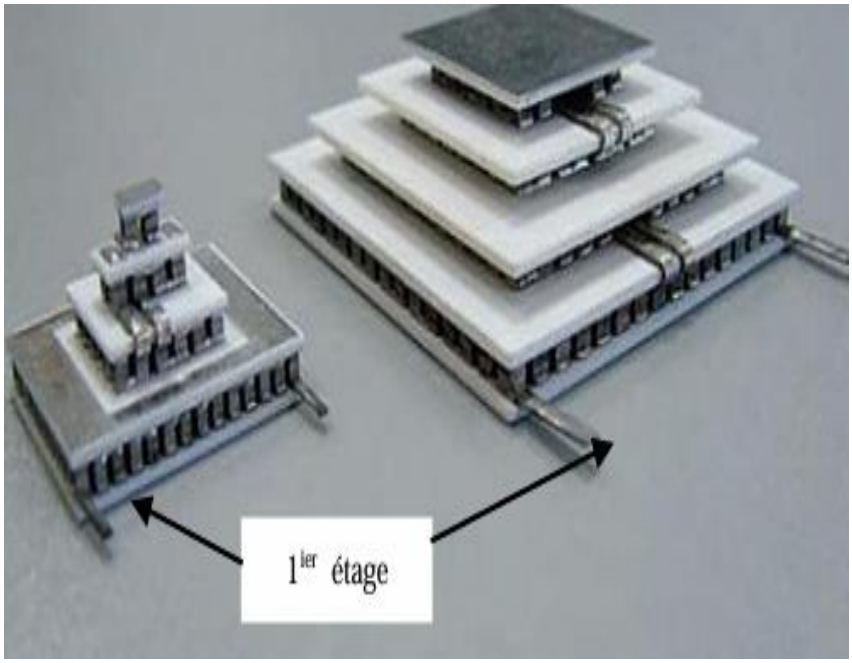
تتألف الوحدة التجارية من عنصر بيلتيير واحد أو أكثر، مقترنة حراريًا بمشتتات حرارة على كلا الجانبين. في التصميم، يُراعى وجود مساحة كافية لتركيب مراوح لطرد الهواء الساخن من الجانب الساخن، أو توزيع الهواء المبرد من الجانب البارد. هذه المراوح تلعب دورًا حيويًا في ضمان استمرارية فرق الحرارة اللازم لعملية الضخ الحراري، مما يُعزز من كفاءة الوحدة ويطيل من عمرها التشغيلي.

- **الترتيب الأمثل للعناصر(توازي حراري وتوالي كهربائي:)**

تُعتبر التركيبة الأكثر كفاءة هي تلك التي يتم فيها توصيل عنصر شبه موصل من النوع P مع عنصر من النوع N كهربائيًا على التوالي وحراريًا على التوازي. هذا الترتيب يوازن بين الحاجة إلى جهد تشغيل معقول وقدرة عالية على نقل الحرارة. كما أنه يتجنب مشاكل الدوائر القصيرة الحرارية الناتجة عن التوصيل الكهربائي المتوازي أو فقدان القدرة في التوصيل الحراري المتسلسل، مما يُعزز الأداء العام للوحدة.

- **الوحدات متعددة المراحل (للفروق الحرارية العالية) :**

عندما لا يكفي فرق الحرارة الذي توفره الوحدة أحادية المرحلة، أو عندما تكون درجة الحرارة المطلوبة على الجانب البارد أقل مما تسمح به الوحدة القياسية، يتم استخدام وحدات متعددة المراحل. تُرصّ هذه الوحدات عموديًا بشكل هرمي، مما يعني أن زيادة عدد المراحل تؤدي إلى خفض الحد الأدنى لدرجة الحرارة على الجانب البارد. بالإضافة إلى ذلك، تحسين معامل الأداء (COP) عند درجات حرارة مستهدفة محددة، مما يجعل هذه الوحدات خيارًا مثاليًا للتطبيقات التي تتطلب تحكمًا دقيقًا في درجات الحرارة المنخفضة



الشكل 8-1 :وحدات بيلتيير متعددة المراحل مرتبة بشكل هرمي[10]

5 .1 انظمة التبريد :

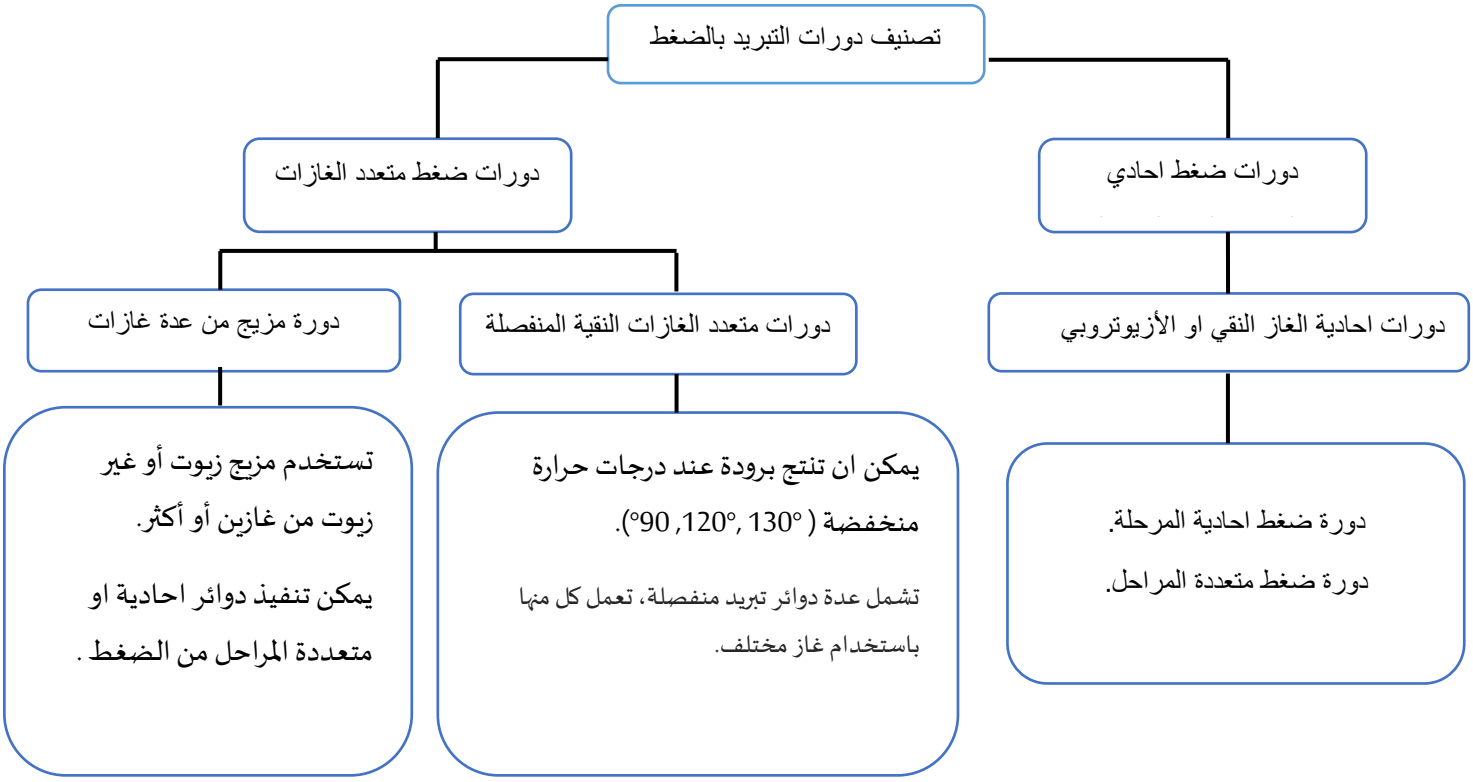
1.5.1 التبريد الكهروحراري(Thermoélectrique – Peltier)

يعتمد هذا النظام على **تأثيربلتييه**، حيث يؤدي مرور تيار كهربائي عبر مواد شبه موصلة إلى انتقال الحرارة من جانب إلى آخر. لا يحتوي هذا النظام على أجزاء ميكانيكية أو موائع تبريد، ويتميز بالهدوء وصغر الحجم وسهولة التحكم، لكنه يعاني من انخفاض معامل الأداء (COP) غالباً أقل من 0.5[11]

2.5.1 التبريد بالانضغاط الميكانيكي :

يُعد التبريد بالانضغاط من أكثر أنظمة التبريد التقليدية استعمالاً، حيث يعتمد على ضغط مائع تبريد ضمن دورة حرارية مغلقة. ويمكن تصنيف هذه الأنظمة حسب عدد مراحل الانضغاط إلى دورات أحادية ومتعددة المراحل، كما يمكن تصنيفها حسب نوع المائع إلى دورات ذات مائع واحد أو متعددة الموائع مثل أنظمة الكاسكيد. وتُستخدم هذه الأنظمة على نطاق واسع لإنتاج البرودة عند مختلف مستويات درجات الحرارة.

يعكس محتوى المخطط التالي بشكل دقيق تصنيف دورات التبريد بالضغطية ، حيث يوضح الفئات المختلفة لدورات التبريد وأنواعها



الشكل 9-1 :تصنيف دورات التبريد بالضغط الميكانيكي

- **المكونات التفصيلية لدورة ضغط البخار:**

لفهم مبدأ العمل بشكل كامل، يجب استعراض الأجزاء الميكانيكية الأساسية للنظام[12]:

- ✓ **الضاغط :(Compressor)** هو جهاز ميكانيكي يشبه المضخة الحرارية، وتتمثل وظيفته في تقليل حجم وسائط التبريد الغازية (مثلCFCs ، الهيدروكربونات، NH3، وCO2 بهدف رفع ضغطها. وبسبب انخفاض قابلية انضغاط السوائل، يتم توجيه الوسيط بعد ذلك إلى المكثف.
- ✓ **المكثف :(Condenser)** يعمل في معظم الأنظمة كمبادل حراري مزود بزعانف تبريد (Radiator fins) لطرد الحرارة. يقوم المكثف بخفض الحرارة أو تغيير طور وسيط التبريد من البخار إلى سائل. هنا يعمل الهواء كمادة تبريد تسحب الحرارة الكامنة من الوسيط عبر عملية طاردة للحرارة.(Exothermic process)
- ✓ **صمام التوسع :(Expansion Valve)** يقوم بضخ وسيط التبريد المبرد وتنظيم معدل تدفقه بدقة. تنخفض ضغط الوسيط نتيجة لثبات المحتوى الحراري(Enthalpy) ، وهو الضغط المنخفض الذي يحتاجه المبخر في المرحلة التالية.
- ✓ **المبخر :(Evaporator)** هو المكان الذي يمتص فيه وسيط التبريد الحرارة من النظام ويزيلها. عادةً ما تقوم مروحة أو نافخ بتدوير الهواء الدافئ الممتص من النظام باتجاه الأنابيب التي تحمل وسيط التبريد البارد، مما يؤدي إلى خفض درجة حرارة النظام.
- ✓ **مبدأ العمل التشغيلي (خطوة بخطوة)**

يُطلق على هذا النظام "**نظام التبريد الميكانيكي** "لأنه يستخدم الطاقة الميكانيكية لتشغيل الضاغط، وتتم العملية وفق الخطوات التالية:

- ✓ **الخطوة 1 - عملية الضغط** :يتم تزويد الضاغط ببخار وسيط التبريد ذو درجة حرارة وضغط منخفضين، حيث تؤدي عملية الضغط إلى رفع كل من درجة الحرارة والضغط معاً.
- ✓ **الخطوة 2 - عملية التكثيف** :يستقبل المكثف وسيط التبريد وهو في حالته البخارية، وفي هذه المرحلة يتم تحويله إلى سائل تحت ضغط عالٍ ويُجمع في خزان استقبال.
- ✓ **الخطوة 3 - عملية التوسع (الخنق)** :يقوم صمام التوسع بتقليل ضغط ودرجة حرارة وسيط التبريد القادم من سائل الضغط العالي الموجود في الخزان.
- ✓ **الخطوة 4 - عملية التبخير** :المحطة الأخيرة لوسيط التبريد هي المبخر، حيث تتم إزالة الحرارة المحيطة وتحويل الوسيط إلى بخار. تتضمن هذه التقنية خفض الضغط مع رفع درجة الحرارة لتبدأ الدورة من جديد.

3.5.1 أنظمة التبريد بالامتصاص :

- **الجذور التاريخية ومراحل التطور التقني** [13]:

تعد تقنية التبريد بالامتصاص من أقدم الطرق المعروفة لإنتاج البرودة، حيث بدأت منذ عام 1777. ومع ذلك، لم تشهد هذه التقنية تطبيقاً عملياً إلا في عام 1810 على يد **J. Lestie** الذي صمم أول آلة تبريد مفرغة تعمل بزوج (الماء/حمض الكبريتيك). وفي عام 1859، حقق **Ferdinand Carré** قفزة نوعية بتطوير آلة تعمل بصفة مستمرة باستخدام مزيج (الأمونيا/الماء). لاحقاً، وبفضل الدراسات الترموديناميكية التي أجراها الألماني **Edmund Altenkirch**، ظهرت في الولايات المتحدة خلال الأربعينيات أنظمة (الماء/بروميد الليثيوم) التي استُخدمت في التكييف بقدرات ضخمة وصلت إلى 523 .KW

- **المزايا البيئية والقيمة الاقتصادية :**

تكتسب أنظمة الامتصاص أهمية كبرى في السياق العالمي الحالي نظراً لعدة عوامل:

- ✓ **تثمين الطاقة :**قدرتها العالية على استغلال مصادر حرارية مهدرة أو متجددة (الحرارة المفقودة في المصانع، الطاقة الشمسية، والكتلة الحيوية).
- ✓ **صديقة للبيئة :**تستخدم سوائل طبيعية بالكامل كالماء والأمونيا، مما يجعلها بديلاً مثالياً للغازات المسببة للاحتباس الحراري مثل.(CFC, HCFC, HFC)
- ✓ **البساطة الميكانيكية :**لا تحتوي على أجزاء دوارة معقدة سوى مضخة المحلول، حيث يتم استبدال الطاقة الميكانيكية (الضاغط) بالطاقة الحرارية.
- ✓ **الانتشار السوقي :**تشهد طلباً متزايداً في دول مثل الصين، اليابان، وكوريا الجنوبية، بينما تتوفر في الأسواق العالمية بقدرات تتراوح من 100 كيلوواط إلى عدة ميجاواط.

- **دورة التبريد أحادية التأثير :**

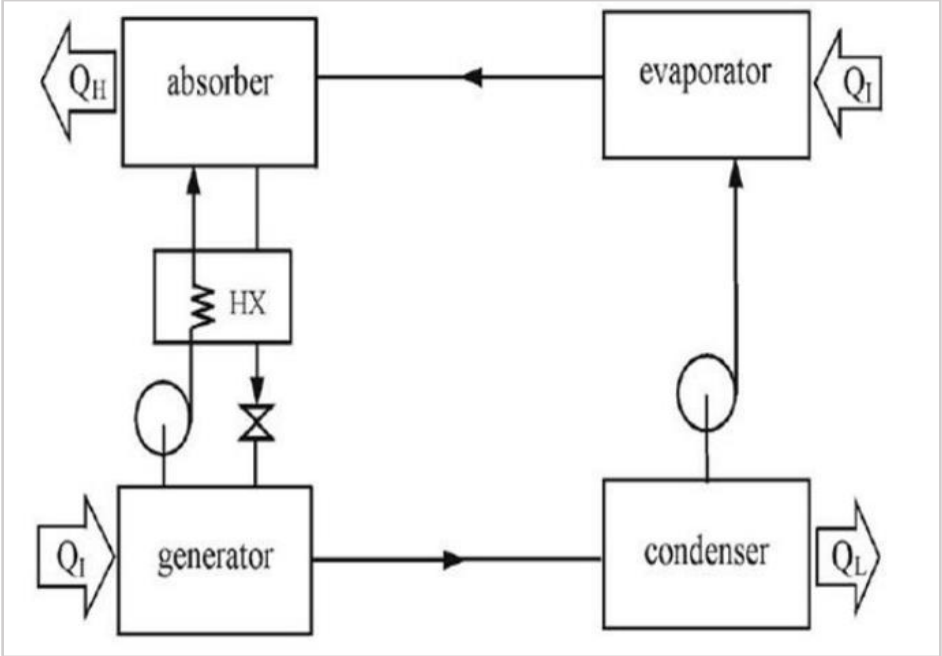
تعتبر النموذج الأساسي وتتكون من أربعة عناصر رئيسية هي :الغلاية (المولد)، المكثف، المبخر، والممتص .تعمل هذه الدورة بثلاثة مستويات حرارية (مصدر بارد في المبخر، مصدر ساخن للمولد، ومصدر وسيط لطرد الحرارة في المكثف). تُستخدم هذه الدورة بشكل أساسي عندما تكون درجات الحرارة المتوفرة في المولد معتدلة، وقد خضعت لدراسات مكثفة من قبل باحثين مثل *Meunier* و *Mansouri* لتطوير كفاءتها.

- **الأنظمة متعددة المراحل :**

يتم اللجوء إلى تعدد المراحل (أو التأثيرات) لتحسين الكفاءة التيرموديناميكية ورفع معامل الأداء(COP) ، خاصة عندما

تصل الدورة أحادية المرحلة إلى حدودها القصوى التي تتطلب نسب ضغط مفرطة.

- ✓ **الدورة مزدوجة التأثير :(Double Effet)** أُدخلت بين عامي 1956 و1958، وتسمح بالإنتاج المتزامن للبرودة والحرارة. تتميز بوجود مولدين (عالي الضغط ومنخفض الضغط) ومكثفين، حيث تُستخدم الحرارة الكامنة الناتجة عن تكثيف بخار المبرد في المرحلة الأولى كمصدر حراري لتشغيل المولد الثاني، مما يرفع معامل الأداء (COP)ليصل إلى 1.1 أو 1.3 في الأنظمة التي تعمل بالبخار.
- ✓ **الدورة ثلاثية التأثير :(Triple Effet)** تمثل أحدث التوجهات البحثية لرفع الكفاءة إلى مستويات قصوى، حيث أظهرت الأبحاث إمكانية الوصول إلى معامل أداء يتراوح بين 1.5 و1.6. تعمل هذه الأنظمة بأربعة مستويات ضغط معقدة لضمان أقصى استغلال للحرارة الداخلية في عملية فصل سائل التبريد.



الشكل 10-1: محول حراري امتصاصي[13]

4.5.1 أهم الفروقات بين الأنظمة التقليدية والتبريد الكهروحراري:

جدول 1-1 :الأنظمة التقليدية والتبريد الكهروحرار

المعيار	التبريد الكهروحراري(Peltier)	الأنظمة التقليدية
مبدأ العمل	تأثير بلتييه (انتقال حرارة بتيار كهربائي)	دورة ترموديناميكية بمائع تبريد (ضغط أو امتصاص)
الأساس الفيزيائي	ظواهر كهروحرارية (بلتييه، سيبيك، طومسون)	تغيرات طور وانتقال حراري تقليدي
مائع التبريد	غير موجود	موجود
الأجزاء الميكانيكية	غير موجودة	موجودة (ضاغط/مضخة)
التحكم	سهل ودقيق (بتغيير التيار)	معقد نسبياً
الحجم والضجيج	صغير وصامت	أكبر وأعلى ضجيج
التطبيقات	إلكترونيات وتبريد موضعي	تبريد منزلي وصناعي

1. 6 المردودية الطاقوية:(COP)

يعتبر معامل الأداء المعيار الأول لقياس كفاءة أي نظام تبريد، وهو يمثل النسبة بين البرودة المنتجة والطاقة المستهلكة.

يُعد معامل الأداء (COP) من أهم المؤشرات المستخدمة للحكم على كفاءة أنظمة التبريد، حيث يعبر عن العلاقة بين القدرة التبريدية المتولدة والطاقة المستهلكة لتشغيل النظام[10].

في الأنظمة التقليدية مثل أنظمة ضغط البخار، يتميز هذا المعامل عادةً بأنه أكبر من الواحد، مما يعني أن كمية البرودة المنتجة تفوق الطاقة المستهلكة.

أما في الأنظمة الكهروحرارية المعتمدة على تأثير بلتييه، فإن الكفاءة تكون أقل نسبياً، حيث تشير النتائج التجريبية إلى أن معامل الأداء غالباً ما يتراوح بين 0.4 و0.7، وهو ما يجعل استخدامها أكثر ملاءمة للتطبيقات الصغيرة أو التبريد الموضعي.

1. 6. 1 القدرة التبريدية: (Puissance Frigorifique)

تمثل القدرة التبريدية كمية الحرارة التي يستطيع النظام سحبها من الوسط المراد تبريده، ويُرمز لها عادة بـ Q_F.

وتُقاس هذه القدرة بوحدة الواط(W) ، وتعتمد بشكل أساسي على التغير في الإنثالبي أثناء انتقال المائع داخل دورة التبريد، حيث يمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية:

$$Q_F = q_m(h_{out} - h_{in}) \qquad (\mathbf{I-5})$$

وكلما زادت هذه القدرة، ارتفعت قدرة النظام على خفض درجة حرارة الوسط المستهدف.

2. 6. 1 .الفرق الحراري: (ΔT)

يُعتبر الفرق الحراري من المؤشرات المهمة التي تعكس فعالية النظام في تحقيق العزل والتبريد، حيث يمثل الفارق بين درجة حرارة الوسط الخارجي ودرجة حرارة الحيز المبرد.

في التطبيقات التجريبية لأنظمة التبريد الصغيرة، يمكن أن يصل هذا الفرق إلى حوالي 20 درجة مئوية بين الداخل والخارج، بينما تُضبط الأنظمة التقليدية غالباً للحفاظ على درجة حرارة داخلية مستقرة تقارب 5°C، خصوصاً في تطبيقات حفظ الأغذية

الفصل الثاني :

مراجعة الدراسات السابقة
وتحليل الفجوة البحثية

الفصل 2 : مراجعة الدراسات السابقة وتحليل الفجوة البحثية

1.2 تطورتقنية التبريد الكهروحراري عبر الزمن :

1.1.2 البدايات الأولى للاكتشافات الكهروحرارية (1821–1900) :

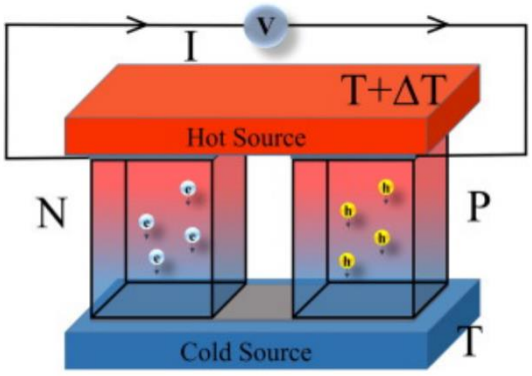
تُعتبر بداية الانطلاقة الحقيقية في مجال الكهروحرارية مرتبطة باكتشاف التأثير الكهروحراري، الذي أُعلن عنه في عام 1821. في ذلك العام، قام الفيزيائي الألماني توماس يوهان سيبك بملاحظة مثيرة عندما اكتشف أن وجود فرق في درجات الحرارة بين معدنين مختلفين داخل دائرة مغلقة يؤدي إلى انحراف إبرة البوصلة. هذه الظاهرة كانت أول دليل على تولد قوة دافعة كهربائية نتيجة التدرج الحراري، مما فتح آفاقًا جديدة لفهم العلاقة بين الحرارة والكهرباء [14]. في البداية، كان سيبك يعتقد أن هذه الظاهرة تنبع من تأثير مغناطيسي، ولكن مع مرور الوقت، تبين له أنها ناتجة عن تيار كهربائي مستحث بفعل فرق الحرارة، وهو ما عُرف لاحقًا بتأثير سيبك. تم التعبير عن هذا السلوك من خلال علاقة رياضية تربط بين فرق الجهد وفرق الحرارة، حيث يُعرف معامل سيبك بأنه النسبة بين الجهد المتولد وتغير درجة الحرارة. لاحقًا، أكدت دراسات ماجنوس أن هذا الجهد يعتمد فقط على حالتي الوصلتين الحراريتين وليس على توزيع الحرارة داخل الموصل[15]، مما أسس لفكرة أن التأثير هو خاصية ثابتة في المادة. ومن جهة أخرى، ساهمت أعمال هاكن في أوائل القرن العشرين في تصنيف المواد ذات الأداء الكهروحراري الجيد، مثل مركبات البزموت والتيلوريوم، مما أضاف عمقًا إضافيًا إلى فهمنا لهذا المجال .[7]

2.1.2 تطورتأثير بيلتييه (1834 وما بعده) :

في عام 1834، قام الفيزيائي الفرنسي جان شارل بيلتييه بإجراء اكتشاف مهم آخر، حيث وجد أن مرور تيار كهربائي عبر وصلة بين معدنين مختلفين يؤدي إلى امتصاص أو إطلاق حرارة عند تلك الوصلة. هذه الظاهرة، المعروفة بتأثير بيلتييه، شكلت الأساس العلمي لتقنيات التبريد الحديثة [16]. عندما يمر التيار الكهربائي، يتولد فرق حراري نتيجة انتقال الطاقة بين حاملات الشحنة داخل المواد المختلفة. يمكن التعبير عن كمية الحرارة الممتصة أو المنبعثة بأنها تتناسب طرديًا مع شدة التيار المار عبر الوصلة. أصبح هذا التأثير فيما بعد أساسًا في تصميم أجهزة التبريد الكهروحراري المستخدمة في التطبيقات الدقيقة، مما أتاح لنا تطوير أنظمة أكثر كفاءة وفعالية في الاستخدام [6]

3.1.2 تأثير طومسون وتوحيد الظواهر الكهروحرارية (1854) :

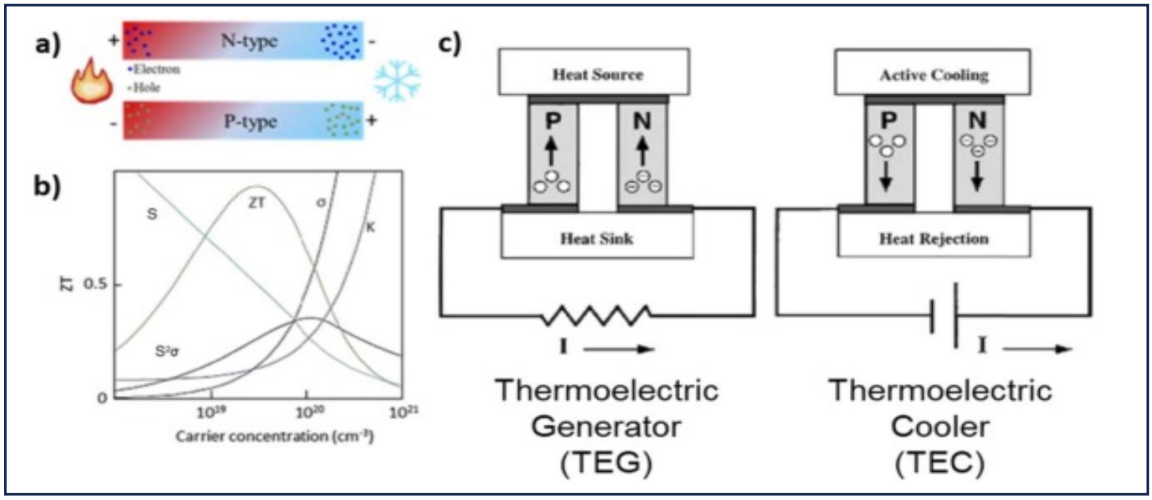
في منتصف القرن التاسع عشر، قام ويليام طومسون، المعروف لاحقًا بلقب اللورد كلفن، بتوسيع نطاق فهم الظواهر الكهروحرارية من خلال دراسة العلاقة بين تأثيري سيبك وبيلتييه. اكتشف طومسون أن مرور تيار كهربائي داخل موصل يوجد فيه تدرج حراري يؤدي إلى امتصاص أو إطلاق حرارة على طول المادة نفسها، وليس فقط عند الوصلات [17]. هذا السلوك، الذي سُمي بتأثير طومسون، يعتمد مقدار الحرارة المتولدة على شدة التيار وعلى معدل تغير درجة الحرارة داخل المادة. أدى هذا الاكتشاف إلى صياغة العلاقات الترموديناميكية التي تربط بين معاملات سيبك وبيلتييه وطومسون، مما أسس لوحدة نظرية الظواهر الكهروحرارية، وأصبح هذا الفهم حجر الزاوية في الأبحاث المستقبلية في هذا المجال [18]



الشكل 1-2 :رسم تخطيطي لتأثير سيبك[19]

4.1.2 تطور معامل الكفاءة الكهروحرارية (ZT) (1909–1954) :

مع بداية القرن العشرين، شهدنا تطورًا ملحوظًا في فهم أداء المواد الكهروحرارية. في عام 1909، وضع إدموند ألتنكيرش أول نموذج رياضي لتحديد كفاءة المولدات الكهروحرارية، مما ساهم في تحسين الأداء العام لهذه الأجهزة [20]. كما درس لاحقًا ظروف تحسين أداء أجهزة التبريد الكهروحرارية، مما شكل الأساس لمفهوم معامل الجودة أو ما يعرف بالمعامل اللاتُبُعدي ZT. في عام 1949، قام إيوف بتطوير النظرية الحديثة للمواد الكهروحرارية، مما أدى إلى تصنيع أول أجهزة عملية في هذا السياق. خلال الخمسينيات، أثبت جولدسميد إمكانية الوصول إلى درجات حرارة منخفضة جدًا باستخدام مركبات البزموت والتيلوريوم، مؤكدًا أهمية الخصائص الإلكترونية في تحسين الأداء [21].



الشكل 2-2 :آلية الانتشار الحراري لحاملات الشحنة واعتماد معاملات الأداء الكهروحراري وبنية المولدات والمبردات الكهروحرارية[19].

5.1.2 مرحلة التطوروالتطبيقات الصناعية (1960–2000) :

خلال النصف الثاني من القرن العشرين، شهدت الكهروحرارية اهتمامًا واسعًا، خصوصًا في التطبيقات العسكرية والفضائية. تم تطوير مولدات كهروحرارية وصلت كفاءتها إلى حوالي 5%، واستخدمت هذه التقنيات في أنظمة الفضاء العميق [22]. ساهمت أعمال هيكس وأور في توسيع الفهم الهندسي للمواد الكهروحرارية، بينما قدم كل من كادوف وميلر مرجعًا أساسيًا في تصميم المواد. كما ركز سلاك على مفهوم "بلورة إلكترونية – زجاج فونوني" الذي يهدف إلى الجمع بين ناقلية كهربائية عالية وانتشار حراري منخفض [23]. ورغم هذا التقدم، تباطأ التطور في أواخر الستينيات بسبب محدودية كفاءة المواد المتاحة [24]

6.1.2 المفاهيم الحديثة والتطورات النانوية (2000–الآن) :

في العقدين الأخيرين، شهد مجال الكهروحرارية تطورًا كبيرًا بفضل إدخال تقنيات النانو والمواد المركبة. تم تطوير مواد جديدة مثل مركبات هيسلر وأنظمة السكوتيرودايت، التي ساعدت في تحسين الأداء الكلي للأنظمة الكهروحرارية [25]. ساعدت تقنيات النانو في تقليل التوصيل الحراري دون التأثير على التوصيل الكهربائي، مما أدى إلى رفع الكفاءة بشكل ملحوظ. بالإضافة إلى ذلك، ساهمت النمذجة الحاسوبية في تصميم مواد جديدة ذات خصائص محسنة، مما أتاح لنا استكشاف تطبيقات جديدة لتقنيات الكهروحرارية. اليوم، توسعت التطبيقات لتشمل استرجاع الحرارة المهدرة والطاقة المستدامة، وتُظهر الدراسات الحديثة أن الكهروحرارية أصبحت تقنية واعدة ضمن حلول الطاقة المستقبلية [26][27].

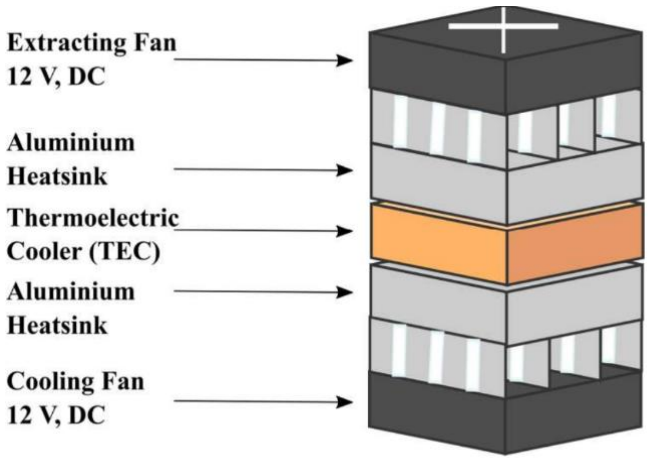
2.2 دراسات تجريبية سابقة حول موديل : TEC1-12706

1.2.2 دراسة أوسيريغا وزملائه: (Ourdigha et al., 2025) [28] :

تركزت على تقييم أداء وحدة TEC1-12706 التي تم تطويرها لصنع صندوق تبريد محمول. في هذه الدراسة، استعرض الباحثون المبدأ الفيزيائي الذي يعتمد عليه الجهاز، وهو تأثير بلتير .(Peltier effect) هذا التأثير يعني أنه عند مرور تيار كهربائي عبر وصلة بين موصلين مختلفين، يتم امتصاص الحرارة أو انبعاثها. الوحدة تتكون من كريات شبه موصلة من النوع P والنوعN ، والتي يتم وضعها بين لوحين من السيراميك.

أظهرت النتائج التي حصل عليها الباحثون وجود علاقة عكسية سريعة بين معامل الأداء (COP) والتيار الكهربائي. بمعنى آخر، كلما زاد التيار، انخفض معامل الأداء، حيث كان يصل إلى ذروته عند أكثر من 2.1 عندما كان التيار منخفضًا (~1.0 أمبير). هذا الانخفاض يعود إلى تأثير تسخين جول الذي يهيمن على طاقة الإدخال في هذه الحالة.

كما أنه لتحقيق أقصى فرق في درجات الحرارة($\Delta T = 40°C$) يتطلب الأمر زيادة كبيرة في التيار بالإضافة إلى إدارة حرارية فعالة للجانب الساخن من الجهاز. لذا، فإن التصميم الفعال لهذا النوع من الصناديق يتطلب دراسة دقيقة للعوامل الحرارية والكهربائية لضمان الأداء الأمثل.



الشكل 2-3 :إعدادات توصيل وحدة التبريد الكهروحرارية (TEC) مع المشتتات الحرارية (Heatsinks) والمراوح(Fans)

2.2.2 دراسة مصلح وزملائه:(Muchlis et al., 2023) [29] :

قدمت هذه الدراسة تحليلاً شاملاً للأداء الطاقوي والبيئي لنظام تبريد يعتمد على وحدةTEC1-12706 ، مع التركيز على المزايا البيئية التي توفرها الأنظمة الكهروحرارية مقارنةً بآلات ضغط البخار التقليدية. تعتبر هذه الأنظمة بديلاً محتملاً للمبردات الضارة مثل مركبات الكلوروفلوروكربون (CFC) ومركبات الهيدروكلوروفلوروكربون(HCFC) ، والتي تُعرف بتأثيرها السلبي على طبقة الأوزون وتزايد الاحتباس الحراري.

في سياق الدراسة، أجرى الباحثون تجارب متعددة لتقييم أداء النظام تحت ظروف مختلفة. أظهرت النتائج أن قيمة الحرارة الممتصة من قبل النظام تتناسب طردياً مع زيادة جهد الإدخال، مما يعني أن زيادة الجهد تؤدي إلى قدرة أكبر على امتصاص الحرارة. ومع ذلك، كان هناك تراجع ملحوظ في قيمة معامل الأداء (COP) مع زيادة الجهد، مما يشير إلى أن الأداء العام للنظام قد يتأثر سلباً عند ارتفاع الجهد.

وقد حددت الدراسة أن أفضل أداء لوحدة TEC1-12706 كان عند جهد 10 فولت. في هذه الحالة، حقق النظام فرق درجة حرارة قدره 6.6 درجة مئوية بعد 60 دقيقة من التشغيل، مما يدل على فعالية النظام في تحقيق درجات حرارة منخفضة. كما بلغت قيمة الحرارة الممتصة 19.150 واط، بينما كان معامل الأداء 0.921، مما يدل على أن النظام قادر على العمل بكفاءة نسبية جيدة عند هذا الجهد.

إذ سلطت هذه النتائج الضوء على أهمية تحسين الأنظمة الكهروحرارية كبديل مستدام، حيث يمكن أن تسهم في تقليل التأثيرات البيئية السلبية الناجمة عن استخدام المبردات التقليدية.

3.2.2 دراسة تيان وزملائه:(Tian et al., 2021) [30]

تناولت هذه الدراسة الجدوى الاقتصادية وتحليل الأداء لنظام تبريد المباني باستخدام وحدة .TEC1-12706 كانت الدراسة مركزة بشكل خاص على الجانب البيئي، حيث سلطت الضوء على الخصائص الصديقة للبيئة للأنظمة الكهروحرارية، مما يجعلها خيارًا مستدامًا مقارنةً بالأنظمة التقليدية.

أجريت تجارب مخبرية لتحليل سلوك المبرد تحت ظروف مختلفة، بما في ذلك تدفقات الهواء ودرجات حرارة الغرفة وقدرات الإدخال المتفاوتة. من خلال هذه التجارب، توصل الباحثون إلى وجود نقطة مثالية (Extremum point) عند قدرة إدخال

بلغت 23 واط. عند هذه النقطة، كانت تكلفة عملية تبريد الهواء في أدنى مستوياتها، قبل أن تبدأ في الارتفاع مرة أخرى عند زيادة القدرة.

علاوة على ذلك، أكدت الدراسة أن تكلفة التبريد تنخفض في درجات حرارة الهواء المرتفعة، مما يجعل هذا النظام مناسبًا بشكل خاص للمناطق الحارة. هذه النتائج تشير إلى إمكانية استخدام نظام TEC1-12706 كحل فعال من حيث التكلفة والبيئة لتبريد المباني، مما يعزز من فرص تطبيقه في المناطق ذات المناخ الحار ويعزز من فعاليته كبديل مستدام

2. 2. 4 دراسة ماريانى وزملائها:(Maryani et al., 2023) [31]

في هذه الدراسة تم استخدام وحدات TEC1-12706 لتحسين كفاءة الألواح الشمسية من خلال امتصاص الحرارة من سطح اللوح. كان الهدف من البحث هو تقييم تأثير هذه الوحدات على أداء الألواح الشمسية، حيث أجريت تجربة مقارنة بين ثلاثة أنواع من التركيبات المختلفة.

أظهرت النتائج أن إضافة وحدات بلتير أسفل وبجانب اللوح الشمسي ساهمت بشكل كبير في زيادة طاقة الإخراج بمقدار 8.9 واط. كما تحسنت الكفاءة الإجمالية للألواح الشمسية بنسبة 32.6% مقارنة بالألواح التي لا تستخدم هذه الوحدات.

توضح هذه الدراسة أهمية الخصائص التشغيلية لوحدات TEC1-12706 في تحسين أداء أنظمة الطاقة المتجددة، مما يعزز من فعالية الألواح الشمسية ويزيد من إنتاج الطاقة. هذه النتائج تشير إلى إمكانية استخدام هذه التكنولوجيا كوسيلة مبتكرة لتحسين كفاءة الطاقة في التطبيقات الشمسية، مما يدعم الجهود نحو تحقيق طاقة نظيفة ومستدامة.

2. 2. 5 دراسة هارون وزملائه:(Harun et al., 2018) [32]

بحثت هذه الدراسة في إمكانية استخدام جهاز بلتير لتوليد الكهرباء من الحرارة المفقودة الناتجة عن محركات وعوادم المركبات، مستندة إلى مبدأ فيزيائي معروف باسم تأثير سيبك .(Seebeck effect) في هذا السياق، تعمل الإلكترونات كعامل نقل للحرارة، مما يساهم في إنتاج تيار كهربائي.

أظهرت النتائج التجريبية أن النظام يمكنه تحقيق كفاءة تصل إلى 12.59% عند استخدام مشتت حراري مقترح لاستعادة الطاقة المفقودة. هذه النسبة تعكس الأداء الطاقوي الجيد للوحدة في تطبيقات استعادة الطاقة، مما يبرز إمكانية استخدام هذه التقنية لتحسين كفاءة الطاقة في المركبات وتقليل الفاقد من الطاقة الحرارية

2.2.6 دراسة سلسبيلة وزملاؤها:(Salsabila et al., 2019) [33]

كزت هذه الدراسة التجريبية على تقييم أداء وحدة TEC1-12706 من خلال قياس العلاقة بين تيار الإدخال وفرق درجات الحرارة الناتج. تناول الباحثون المبدأ الفيزيائي المتعلق بانتقال الحرارة عبر أشباه الموصلات، حيث تم رصد أن قدرة التبريد ومعامل الأداء (COP) يتأثران بشكل مباشر بجودة تبريد الجانب الساخن من الوحدة.

أظهرت النتائج أن الوحدة تحقق أفضل توازن طاقوي عند مستويات تيار متوسطة، مما يعني أن الأداء يكون أكثر كفاءة في تلك النقطة. ومع ذلك، لوحظت زيادة في الفجوة بين الأداء النظري والعملي عند التيارات العالية، وذلك بسبب زيادة التبديد الحراري الناتج عن تسخين جول(Joule heating) ، مما يؤثر سلبًا على الكفاءة.

2. 2. 7 دراسة مانيلي وزملائه:(Mainil et al., 2018) [34]

دمت هذه الدراسة تحليلاً تجريبياً لاستخدام وحدة TEC1-12706 في صناديق التبريد المحمولة، مع التركيز على دراسة تأثير تغيير "حمل التبريد (Cooling Load) "على المردودية الطاقوية. تميزت الدراسة بتوضيح الخصائص الفيزيائية للوحدة خلال حالات التشغيل المستمر، حيث أظهرت النتائج أن المردودية تزداد بشكل ملحوظ عندما يتم تثبيت درجة حرارة المحيط، مما يقلل من الجهد الحراري المفروض على النموذج.

أشارت النتائج إلى أن استهلاك الطاقة يرتفع بشكل حاد للوصول إلى أدنى درجة حرارة ممكنة، وهو ما يمثل نقطة هامة في تحليل الأداء البيئي من حيث كفاءة استهلاك الموارد الكهربائية. تبرز هذه الدراسة أهمية تحسين تصميم صناديق التبريد المحمولة من خلال فهم تأثير حمل التبريد على أداء الوحدة، مما يسهم في تطوير حلول أكثر فعالية وكفاءة في استخدام الطاقة

2.2.8 دراسة غونغ وزملائه:(Gong et al., 2019) [35]

تناولت هذه الدراسة محاكاة عددية مدعومة بتجارب عملية لتحسين تصميم المبردات التي تعتمد على وحدة-TEC1 12706.ركزت الدراسة على "تحليل المردودية" من خلال دراسة توزيع التدفق الحراري داخل النموذج نفسه. أوضح الباحثون أن توزيع الكريات الكهروحرارية داخل النموذج يؤثر بشكل كبير على استقرار الأداء الطاقوي على المدى الطويل.

تبرز الدراسة أهمية "التصميم المتراص (Compact design) "في تقليل الفواقد الحرارية، مما يسهم في تحقيق أهداف البحث في تقييم الأداء الطاقوي والبيئي. كما يظهر في المرجع صور توضيحية تحت عنوان"Optimized Cooler Design" ، تبيّن كيفية تركيب النموذج مع مشتتات حرارية متطورة لرفع الكفاءة.

تشير النتائج إلى أن التصميم الجيد للمبردات يمكن أن يؤدي إلى تحسينات كبيرة في الأداء، مما يعزز من فعالية استخدام الطاقة ويقلل من الأثر البيئي

2. 2. 9 دراسة تشيو وزملائه:(Qiu et al., 2020) [36]

ركزت هذه الدراسة في النمذجة الشاملة والتصميم الأمثل لموديلاتTEC1-12706 ، مع مراعاة المقاطع العرضية غير الثابتة للوصلات الحرارية. ركزت الدراسة بشكل موسع على الجانب الفيزيائي والرياضي لتقييم الأداء، حيث تم إجراء تجارب للتحقق من صحة النموذج النظري المقترح.

أثبتت الدراسة أن تحسين هندسة المكونات الداخلية للنموذج يمكن أن يؤدي إلى تحسين معامل الأداء بنسبة تصل إلى 15%. هذه التحسينات تساهم في تقليل الأثر البيئي من خلال تقليل الطاقة الضائعة، مما يعزز من كفاءة النظام بشكل عام.

تعتبر هذه النتائج مهمة في تطوير تقنيات التبريد الكهروحرارية، حيث تشير إلى أن التصميم الدقيق والمراعاة الهندسية للمكونات الداخلية يمكن أن تلعب دورًا حاسمًا في تحسين الأداء الطاقوي وتقليل الفاقد من الطاقة.

2. 3 تطبيقات مبردات بيلتييرفي الأنظمة الصديقة للبيئة والأجهزة المحمولة :

شهدت تقنيات التبريد خلال السنوات الأخيرة تطورًا ملحوظًا نتيجة التزايد المستمر في الطلب على أنظمة تبريد فعالة وصديقة للبيئة. وقد أصبحت الأنظمة التقليدية المعتمدة على دورات الانضغاط تواجه انتقادات متزايدة بسبب استهلاكها المرتفع للطاقة واعتمادها على غازات تبريد مضرة بالبيئة، مثل مركبات الكلوروفلوروكربون والهيدروفلوروكربون، التي تساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري واستنزاف طبقة الأوزون [25]. لذلك اتجهت الأبحاث الحديثة إلى تطوير تقنيات بديلة تعتمد على مبادئ فيزيائية أكثر توافقًا مع متطلبات التنمية المستدامة.

ومن بين هذه التقنيات برزت أنظمة التبريد الكهروحراري المعتمدة على تأثير بيلتيير، والتي تعتمد على انتقال الحرارة بين موصلين مختلفين عند مرور تيار كهربائي مستمر [37]. وتتميز هذه الأنظمة ببساطة تركيبها، وصغر حجمها، وانخفاض

الضجيج الناتج عنها، إضافة إلى غياب الموائع المبردة والضواغط الميكانيكية. وقد ساهمت هذه الخصائص في انتشار استخدامها في الأجهزة المحمولة والأنظمة الإلكترونية والطبية الحساسة.

كما أن التطور الكبير في مجال الإلكترونيات المحمولة والطاقة الشمسية زاد من أهمية وحدات بيلتيير، خاصة في التطبيقات التي تتطلب تبريدًا محدود القدرة مع استهلاك كهربائي مقبول وإمكانية تشغيل مستقلة عن الشبكات الكهربائية التقليدية [38].

جدول 1-2 :الخصائص العامة لمبردات بيلتيير

الوصف	الخاصية
تبريد كهروحراري	نوع التبريد
لا توجد	وجود أجزاء متحركة
غير مستعملة	استعمال غازات تبريد
منخفض جدًا	مستوى الضجيج
سهل ودقيق	التحكم الحراري
منخفضة	الصيانة
إلكترونية، طبية، محمولة	التطبيقات

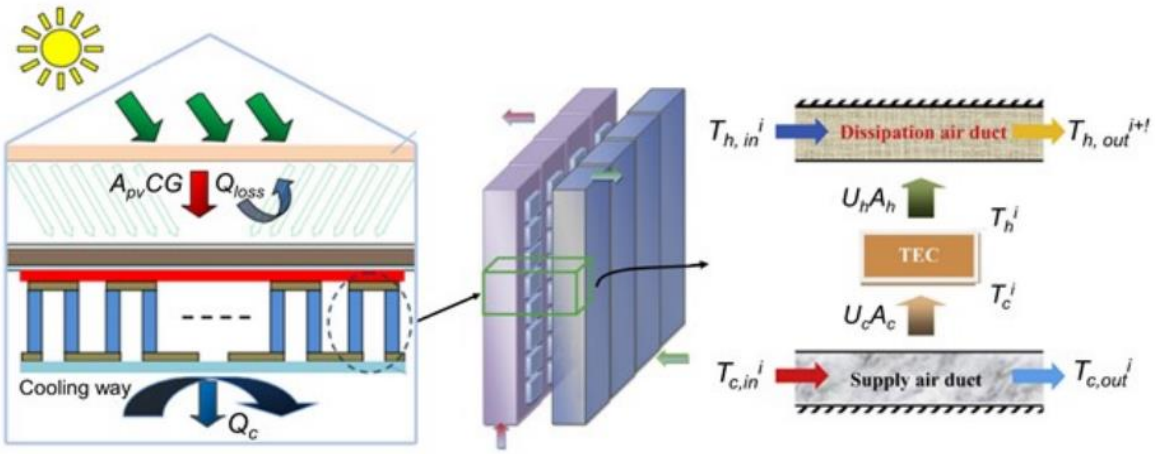
1.3.2 أهمية مبردات بيلتيير في الأنظمة الصديقة للبيئة :

تنوعت وتعددت أهمية هذه المبردات في الأنظمة البيئية من بينها نذكر ما يلي :

ازدادت أهمية الأنظمة الصديقة للبيئة نتيجة التشريعات الدولية الخاصة بتقليل الانبعاثات الملوثة وترشيد استهلاك الطاقة. وفي هذا المجال تُعتبر مبردات بيلتيير من الحلول البديلة الواعدة لأنها تعتمد على الطاقة الكهربائية المباشرة دون الحاجة إلى غازات تبريد ضارة [25].

تتميز هذه التقنية بعدة خصائص بيئية، أهمها غياب الانبعاثات الغازية وعدم وجود تسربات لموائع التبريد. كما أن غياب الأجزاء الميكانيكية المتحركة يقلل من التلوث الضوضائي ومن استهلاك زيوت التشحيم والمواد الصناعية المستخدمة في الضواغط التقليدية [37].

إضافة إلى ذلك، يمكن تشغيل وحدات بيلتيير بواسطة مصادر الطاقة المتجددة مثل الألواح الشمسية، وهو ما يجعلها مناسبة للمناطق الصحراوية والمعزولة. وقد أثبتت عدة دراسات إمكانية دمج هذه الوحدات مع الأنظمة الشمسية في تطبيقات حفظ الأدوية والأغذية [38].كما تساهم هذه الأنظمة في تقليل استهلاك المياه مقارنة ببعض أنظمة التبريد الصناعية التي تعتمد على التبريد المائي، الأمر الذي يزيد من أهميتها في المناطق الجافة.



الشكل 4-2 :نظام تهوية وتبريد كهروحراري صديق للبيئة يعمل بالطاقة الشمسية[39]

2. 3. 2 تطبيقات مبردات بيلتيير في أنظمة التبريد الجاف :

يقصد بالتبريد الجاف الأنظمة التي تعتمد على انتقال الحرارة مباشرة دون استخدام موائع تبريد أو دورات انضغاطية معقدة. وقد أصبحت وحدات بيلتيير من أكثر التقنيات استخدامًا في هذا المجال بفضل بساطة تركيبها وصغر حجمها [40].

- **تبريد المكونات الإلكترونية :**

تعاني المكونات الإلكترونية الحديثة من ارتفاع درجات الحرارة نتيجة زيادة كثافة القدرة الكهربائية، وهو ما يؤثر على كفاءة الأداء والعمر التشغيلي. لذلك تُستخدم وحدات بيلتيير لتبريد المعالجات الإلكترونية والدوائر الحساسة [41].

تتميز هذه التقنية بإمكانية توفير تبريد موضعي دقيق دون الحاجة إلى أنظمة تبريد ضخمة، كما أنها مناسبة للتطبيقات التي تتطلب استقرارًا حراريًا مرتفعًا مثل أجهزة الليزر والكاميرات الحرارية.

- **تبريد أجهزة الاستشعار :**

تحتاج أجهزة الاستشعار الإلكترونية إلى درجات حرارة مستقرة لتحسين دقة القياسات وتقليل التشويش الحراري. ولهذا تُستخدم وحدات بيلتيير داخل العديد من الحساسات والكواشف الضوئية وأجهزة التصوير الحراري.

- **التطبيقات الطبية والمخبرية :**

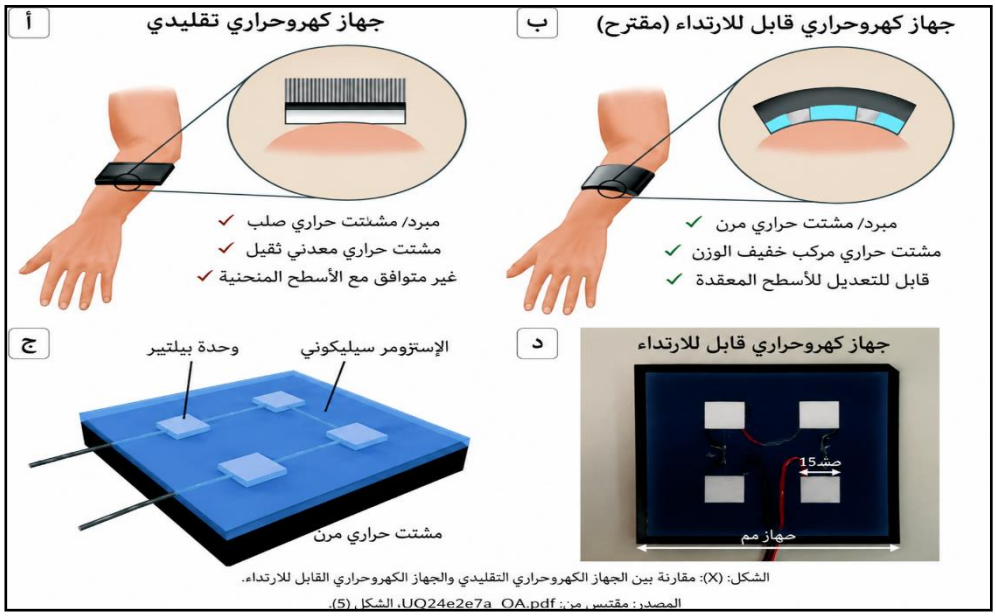
تدخل مبردات بيلتيير في صناعة العديد من الأجهزة الطبية مثل حاضنات العينات وأجهزة تحليل الدم وحفظ الأدوية الحساسة حراريًا [37]. كما تُستخدم في المختبرات البيولوجية والكيميائية التي تتطلب تحكمًا دقيقًا في درجات الحرارة.

جدول 2-2 :أهم تطبيقات مبردات بيلتيير

التطبيق	المجال
حفظ الأدوية واللقاحات	المجال الطبي
تبريد المعالجات والدوائر	الإلكترونيات
حاضنات العينات	المجال المخبري
صناديق التبريد الصغيرة	الأجهزة المحمولة
أنظمة تبريد مستقلة	الطاقة الشمسية
تبريد أنظمة الليزر	الاتصالات

3.3.2 تطبيقات مبردات بيلتيير في الأجهزة المحمولة :

أدى التطور السريع في مجال الأجهزة المحمولة إلى الحاجة لأنظمة تبريد صغيرة الحجم وخفيفة الوزن وقليلة الضجيج. وقد وفرت وحدات بيلتيير هذه الخصائص بشكل واضح، مما ساهم في انتشارها في عدة تطبيقات حديثة [38].



الشكل 5-2 :استخدام مبردات بيلتيير في تبريد المعالجات الإلكترونية المحمولة[42]

✓ **صناديق التبريد المحمولة :**

تُستخدم وحدات TEC1-12706 بشكل واسع في المبردات المحمولة الخاصة بالمشروبات والأغذية، حيث يمكن تشغيلها بواسطة بطاريات أو منافذ السيارات الكهربائية. وتتميز هذه الأنظمة بسهولة النقل وعدم الحاجة إلى غازات تبريد.

✓ **حفظ اللقاحات والأدوية :**

في المناطق المعزولة أو الصحراوية، تُستخدم أنظمة التبريد الكهروحراري لحفظ اللقاحات والأدوية الحساسة حراريًا، خاصة عند دمجها مع الألواح الشمسية. وقد ساعد ذلك على تحسين ظروف التخزين الطبي في المناطق ذات البنية التحتية المحدودة [25].

✓ **تبريد الحواسيب المحمولة :**

تُستخدم مبردات بيلتيير في بعض أنظمة تبريد الحواسيب المحمولة ومعالجات الألعاب الإلكترونية، حيث تساعد على تقليل درجة حرارة التشغيل وتحسين الأداء.

✓ **الأجهزة الطبية المحمولة :**

أصبحت هذه التقنية تُستخدم في أجهزة الفحص الميداني وأجهزة التحليل المحمولة التي تحتاج إلى استقرار حراري مرتفع مع استهلاك منخفض للطاقة.

مزايا مبردات بيلتيير :

تمتلك مبردات بيلتيير مجموعة من الخصائص التي جعلتها مناسبة للعديد من التطبيقات الحديثة، ومن أهم هذه المزايا:

صغر الحجم وسهولة الدمج داخل الأنظمة الإلكترونية.

غياب الضوضاء والاهتزازات تقريبًا.

عدم استعمال غازات تبريد مضرة بالبيئة.

سهولة التحكم في درجة الحرارة.

انخفاض تكاليف الصيانة.

الاعتمادية العالية وطول العمر التشغيلي [40].

كما أن إمكانية تشغيلها بالطاقة الشمسية يجعلها مناسبة للأنظمة المستقلة منخفضة الاستهلاك الكهربائي.

عيوب مبردات بيلتيير :

رغم المزايا المتعددة لهذه التقنية إلا أنها تعاني من بعض القيود التقنية، ومن أهمها:

انخفاض الكفاءة الطاقوية مقارنة بالأنظمة الانضغاطية.

الحاجة إلى مشتتات حرارية فعالة لتبريد الجهة الساخنة.

محدودية القدرة التبريدية في التطبيقات الكبيرة.

ارتفاع استهلاك الطاقة عند زيادة الفرق الحراري المطلوب [41].

لذلك تظل هذه التقنية أكثر ملاءمة للتطبيقات الصغيرة والمتوسطة بدل الأنظمة الصناعية الكبيرة.

جدول 2-3 :مقارنة بين التبريد الكهروحراري والتبريد الانضغاطي

التبريد الانضغاطي	التبريد الكهروحراري	العنصر
موجودة	غير موجودة	**غازات التبريد**
موجودة	لا توجد	**الأجزاء المتحركة**
مرتفع نسبيًا	منخفض جدًا	**الضجيج**
معقدة نسبيًا	بسيطة	**الصيانة**
مرتفعة	متوسطة	**الكفاءة الطاقوية**
أكبر حجمًا	صغير ومدمج	**الحجم**
أعلى نسبيًا	منخفض	**الأثر البيئي**

2. 3. 4 دوروحدة TEC1-12706 في التطبيقات الحديثة :

تُعتبر وحدة TEC1-12706 من أكثر وحدات بيلتيير انتشارًا في المشاريع البحثية والتطبيقات الصغيرة. وتتكون من 127 زوجًا حراريًا وتعمل غالبًا عند جهد V12 وتيار يقارب A6.[41]

تتميز هذه الوحدة بسهولة التركيب والتكلفة المنخفضة، لذلك تُستخدم في:

- مشاريع التبريد بالطاقة الشمسية.
- المبردات المحمولة.
- تبريد الدوائر الإلكترونية.
- النماذج التعليمية والتجريبية.
- أنظمة التحكم الحراري الصغيرة.

كما تُستخدم في العديد من الدراسات المتعلقة بتحسين الأداء الحراري لمبردات بيلتيير وتطوير تقنيات إدارة الحرارة.

4.2 تحليل الفجوات البحثية :

تُظهر المراجعة الشاملة للدراسات السابقة أن معظم الأبحاث في مجال المواد النانوية وتطبيقاتها قد ركزت بشكل مكثف على المبادئ الفيزيائية الأساسية، مثل التوصيل الحراري، وخصائص المواد، وتطوير مواد جديدة لتحسين معامل الجودة ZT. هذا التركيز أدى إلى تحقيق تقدم ملحوظ في فهم كيفية تحسين أداء الأجهزة التي تعتمد على هذه المواد.

إلا أن هناك توجهات أخرى في الأبحاث، حيث تم استكشاف تطبيقات متخصصة للغاية، مثل استعادة الحرارة المهدرة من عوادم السيارات، وتحسين كفاءة الألواح الشمسية. هذه التطبيقات تسلط الضوء على أهمية الاستدامة وكفاءة الطاقة في الأنظمة الحديثة. ومع ذلك، تبرز فجوة بحثية واضحة تتمثل في ندرة الدراسات التي تقدم تقييماً طاقوياً وبيئياً متكاملاً لوحدة TEC1-12706.

تُظهر الأبحاث الحالية عدم وجود ارتباط كافٍ بين الأداء التجريبي الميداني لهذه الوحدة وبين جدوى الانتقال الكامل نحو أنظمة تبريد صديقة للبيئة، والتي تفتقر إلى الغازات الضارة. يشير هذا إلى ضرورة إجراء دراسات أعمق لفهم كيفية تحقيق التوازن بين الأداء والكفاءة البيئية.

علاوة على ذلك، لوحظ وجود تباين كبير في النتائج المتعلقة بنقطة التشغيل المثلى، حيث تختلف هذه النقطة بناءً على ظروف التشغيل المختلفة. هذا التباين يؤثر على استهلاك الطاقة ويؤدي إلى تأثير تسخين "جول" الذي يمكن أن يقلل من كفاءة الوحدة عند التيارات العالية. لذلك، هناك حاجة ملحة لفهم كيفية تحقيق توازن بين هذه العوامل المختلفة لضمان الأداء الأمثل.

1.4.2 موقع الدراسة الحالية منها :

تعتبر دراستنا بمثابة جسر يربط بين النظرية والتطبيق، ولتسد الفجوات البحثية المحددة سابقاً. تهدف هذه الدراسة إلى تقديم تحليل تجريبي دقيق للخصائص الحرارية والمردودية (COP) تحت ظروف تشغيل مختلفة، مع التركيز بشكل خاص على الجانب البيئي كبديل مستدام لآلات ضغط البخار التقليدية.

تسعى الدراسة إلى تحديد العوامل التقنية التي تضمن الأداء الأمثل لوحدة TEC1-12706 في التطبيقات المختلفة، بما في ذلك الأجهزة المحمولة وأنظمة التبريد الجاف. كما تهدف إلى تطوير استراتيجيات تساهم في تحسين الكفاءة الطاقوية وتقليل الأثر البيئي، مما يسهم في تحقيق أهداف الاستدامة.

من خلال هذه الدراسة، نأمل أن نتمكن من سد الفجوة بين النتائج المختبرية والمتطلبات الميدانية للأنظمة المستدامة، خاصة في المناطق التي تفتقر للبنية التحتية الكهربائية التقليدية. إن تحقيق هذا الهدف سيكون له تأثير كبير على تعزيز استخدام تقنيات التبريد الصديقة للبيئة، مما يسهم في تحسين جودة الحياة وتقليل الأثر البيئي.

الفصل الثالث :

قياسات عملية و نتائج التسخين و التبريد و خصائص المبرد بلتير

الفصل 3 : قياسات عملية و نتائج التسخين و التبريد و خصائص المبرد بلتير

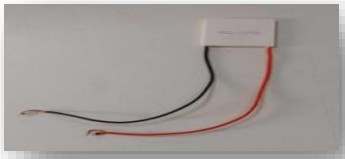
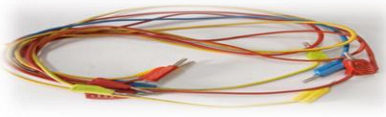
3. 1 تمهيد:

يستعرض في هذا الفصل إجراء قياسات مخبرية عملية و الحصول على نتائج التبريد والتسخين ، وخصائص المبرد بلتير في الدارات الكهربائية العادية ، وحساب التغذية اللازمة من الألواح الكهروضوئية باستغلال الطاقة الشمسية

3. 2 الخصائص التجريبية نموذج المبرد بلتير :

3. 2. 1 الأدوات و الأجهزة المخبرية اللازمة للتصميم :

جدول 1-3: الأجهزة المستخدمة

قطعة بلتير	
مروحة : تستخدم لتحريك الهواء حول المشتت و بالتالي تحسين تبادل الحرارة	
مولد كهربائي	
جهاز الفولط متر : يتم من خلاله قياس فرق الجهد في الدارة	
جهاز الأمبير متر : يتم من خلاله قياس شدة التيار الكهربائي المار في الدارة	
الحامل :	
أسلاك التوصيل :	
الترمومتر : جهاز قياس درجة الحرارة	

2.2.3 مبدأ العمل:

يعمل نظام التصميم الذي قمنا بتركيبه على النحو التالي:

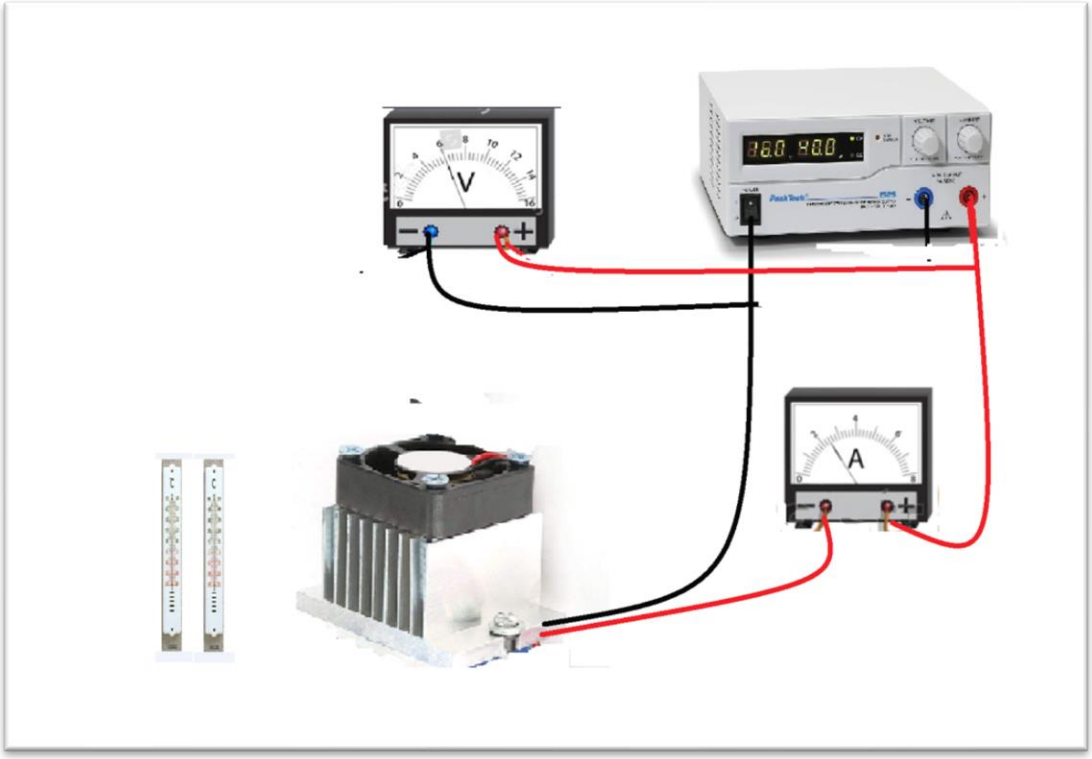
- نطبق جهد كهربائي و نقرأ شدة التيار الكهربائي على جهاز الأمبير متر.
- يتم تشغيل المروحة المروحة لخفض درجة الحرارة الهواء الداخلي للقدر المطلوب.
- تتم مراقبة درجتي الحرارة الساخنة و الباردة للقطعة البلتير، و إجراء التعديلات اللازمة
- على التركيب لتحقيق أفضل النتائج ، على جهاز قياس درجة الحرارة.
- نسجل جميع النتائج في جداول خاصة بوحدة بلتير
- بعد القيام بكل الإجراءات اللازمة و أخذ النتائج يمكننا تحليلها و القيام بباقي الحسابات لمعرفة اللوح الكهربائي اللازم للتصميم

3.2.3 تركيب التصميم:

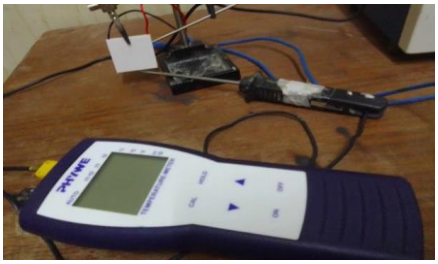
لتركيب هذا التصميم نقول باتباع الخطوات التالية:

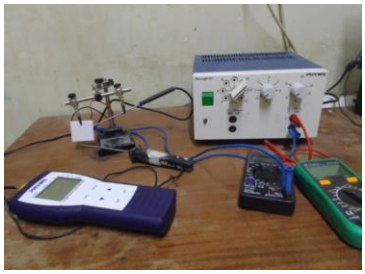
- تحضير جميع الأجهزة اللازمة لعمل التجربة.
- تركيب المروحة على الجهة الساخنة لقطعة البلتير لتشتيت الحرارة و بواسطة اللاصق
- و تثبيتها على الحامل.
- ربط المولد الكهربائي على التفرع مع جهاز الفولط متر لقياس الجهد و على التسلسل مع قطعة البلتير و جهاز الأمبير متر لقياس شدة التيار الكهربائي .

المخطط :



نطبق جهد 12 فولط و نقوم بقياس التيار الممتص و درجات حرارة الوجه الساخن و الوجهالبارد خلال مدة زمنية

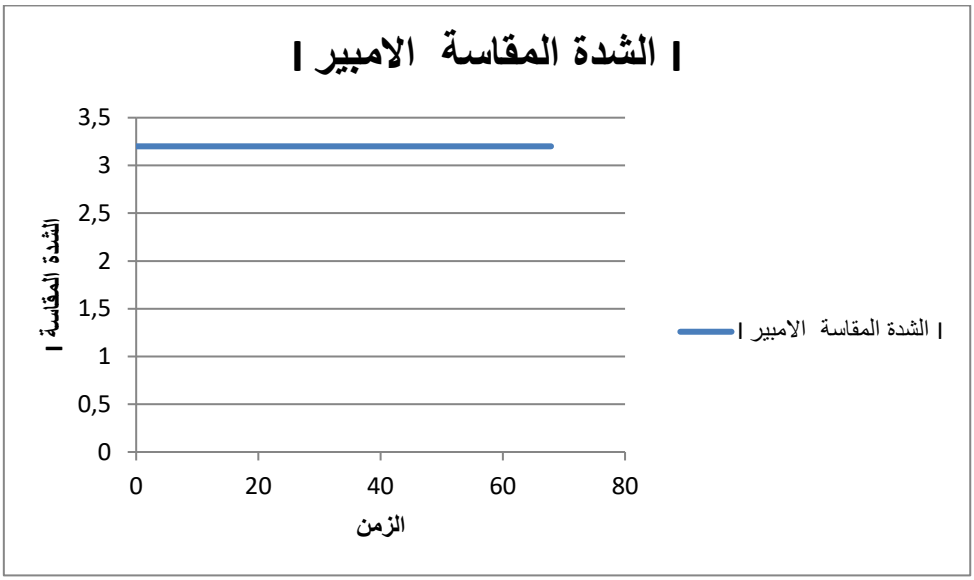




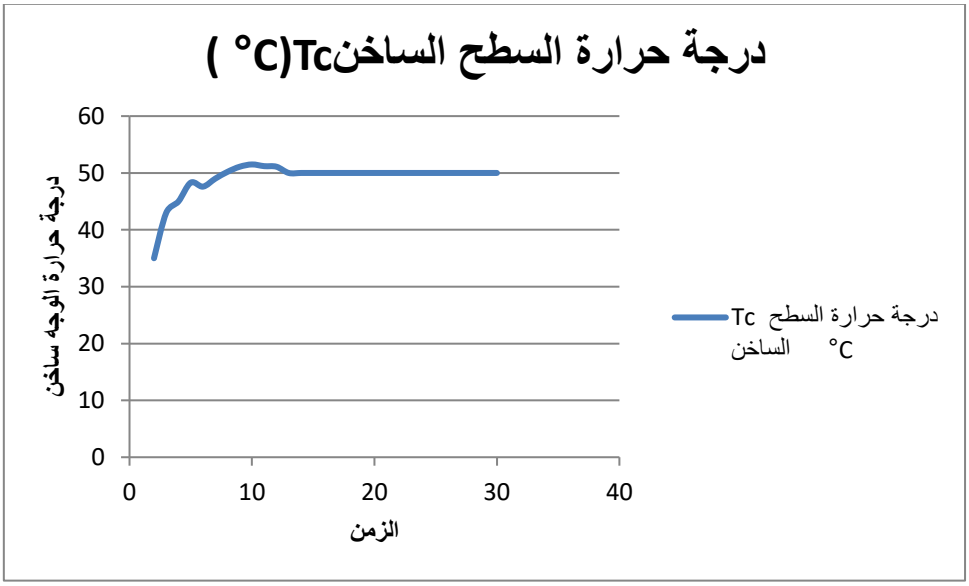
تحصلنا على الجدول التالي :

جدول 2-3 : النتائج المتحصل عليها

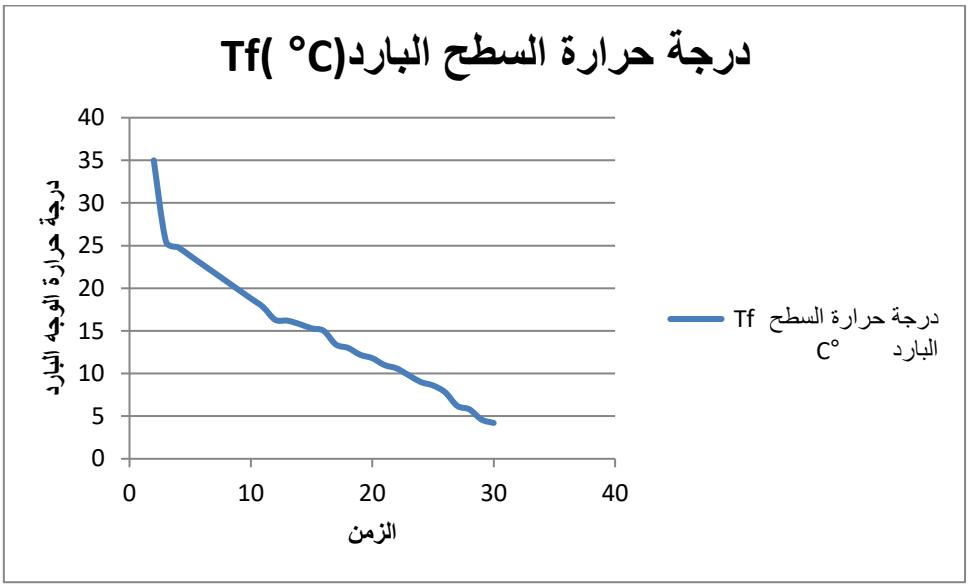
T الزمن دقيقة	I الشدة المقاسة الامبير I	Tc درجة حرارة السطح الساخن °C	Tf درجة حرارة السطح البارد °C
0	3.2	35	35
1.11	3.2	43	25.5
2	3.2	45	24.8
2.17	3.2	48.3	23.8
3.36	3.2	47.6	22.8
4.45	3.2	49	21.8
6.18	3.2	50.2	20.8
8.36	3.2	51.1	19.8
10.55	3.2	51.5	18.8
13.5	3.2	51.2	17.8
21.46	3.2	51.1	16.3
22.39	3.2	50	16.2
29.49	3.2	50	15.8
34.29	3.2	50	15.3
35.49	3.2	50	15
40.29	3.2	50	13.4
41.49	3.2	50	13
43.89	3.2	50	12.2
45.09	3.2	50	11.8
47.49	3.2	50	11
48.69	3.2	50	10.6
51.09	3.2	50	9.8
53.49	3.2	50	9
54.69	3.2	50	8.6
57.09	3.2	50	7.8
61.89	3.2	50	6.2
63.09	3.2	50	5.8
66.69	3.2	50	4.6
67.89	3.2	50	4.2



الشكل 1-3: منحنى تغير الشدة المقاسة بدلالة الزمن



الشكل 2-3: منحنى تغير درجة حرارة الوجه االساخن بدلالة الزمن



الشكل 3-3 :منحنى تغير درجة حرارة الوجه االبارد بدلالة الزمن

3.3 دراسة خصائص القطعة بلتيرعند تطبيق جهد متغير :

بمولد جهد مستمر من 0 الى 30 فولط في وسط درجة حرارته 27°C

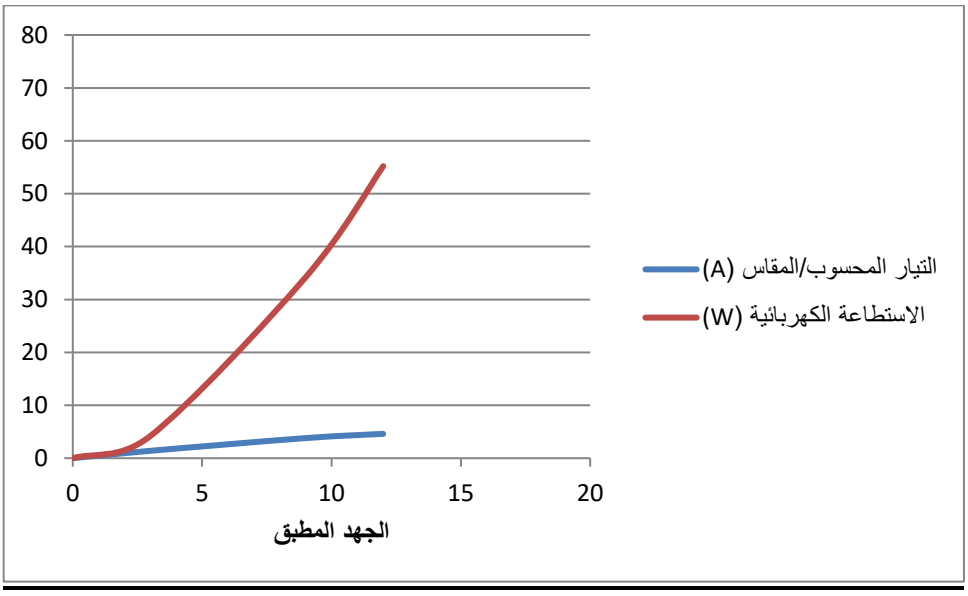
نقوم بقياس شدة التيار و درجات الحرارة للوجه الساخن وللوجه البارد وحساب الاستطاعة الحرارة و الكهربائية ومعامل الاداء في حالتين :

1. بدون استعمال المشتت
2. باستعمال المشتت
3. منحصل على الجداول التالية :

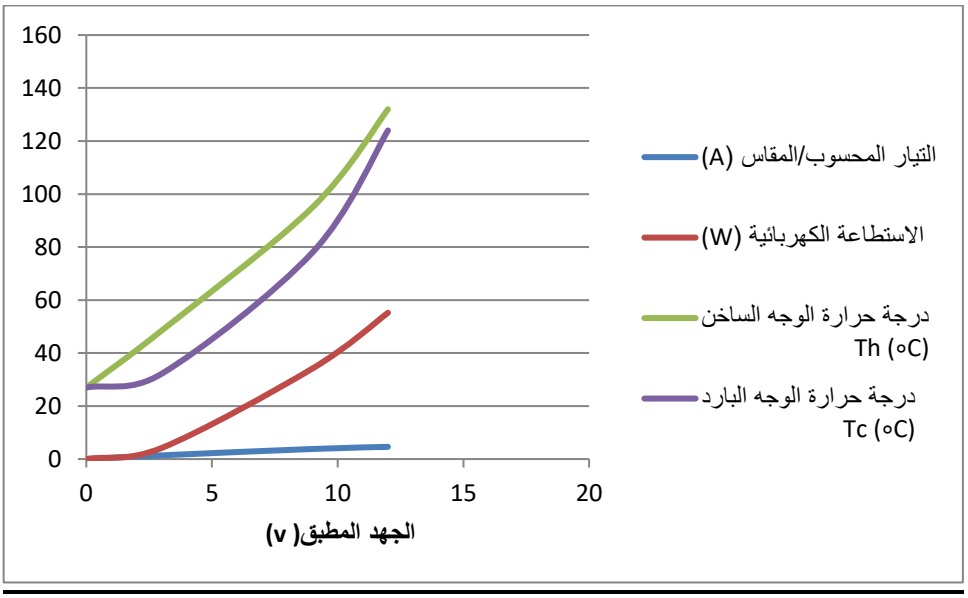
<u>اولا : بدون مشتت الحرارة</u>

جدول 3-3 : خصائص القطعة بلتير عند تطبيق جهد متغير بدون مشتت حرارة

الجهد المطبق (V)	التيار المحسوب/المقاس (A)	الاستطاعة الكهربائية (W)	درجة حرارة الوجه الساخن Th (oC)	درجة حرارة الوجه البارد Tc (oC)	الاستطاعة الحرارية للوجه الساخن Qh (W)	الاستطاعة الحرارية للوجه البارد Qc (W)	معامل الأداء COP
0	0.0	0.0	27.0	27.0	0.0	0.0	0.00
3	1.4	4.2	48.5	32.2	4.8	-0.6	0.00 (تسخين ذاتي)
9	3.8	34.2	95.0	78.0	35.1	-0.9	0.00 (انتقال عكسي للحرارة)
12	4.6	55.2	132.0 حد التلف	124.0	54.0	-1.2	0.00
15	*5.0 نظري*	*75.0*	> 150 احتراق	148.0	--	--	0.00 تلف القطعة
18	*تالف*	*تالف*	تالف	تالف	--	--	--
21	*تالف*	*تالف*	تالف	تالف	--	--	--
24	*تالف*	*تالف*	تالف	تالف	--	--	--
27	*تالف*	*تالف*	تالف	تالف	--	--	--
30	*تالف*	*تالف*	تالف	تالف	--	--	--



الشكل 3-4 : تغييرات التيار المقاس و الاستطاعة الكهربائية بدلالة الجهد المطبق

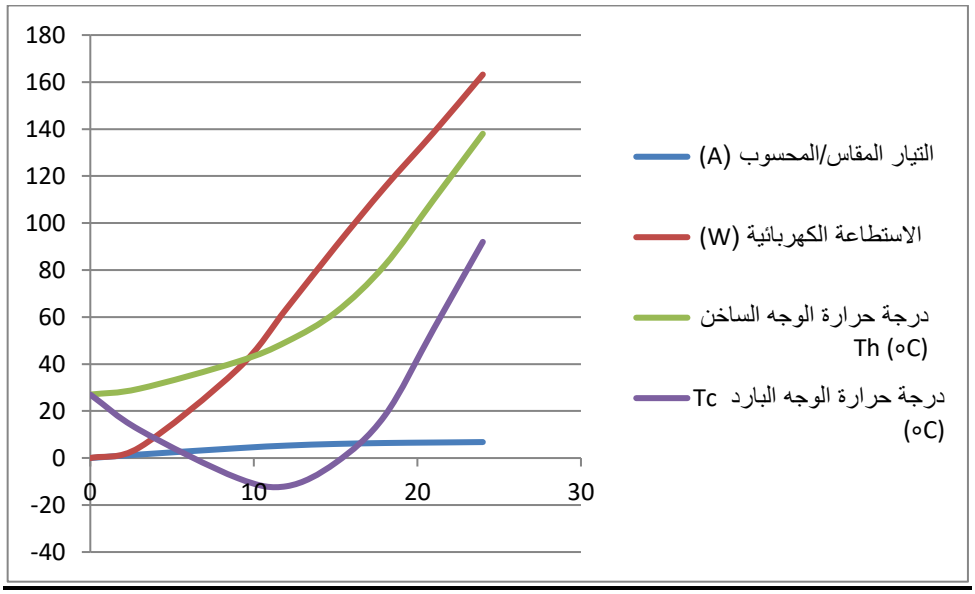


الشكل 3-5 : تغيرات خصائص الوحدة بدلالة الجهد المطبق

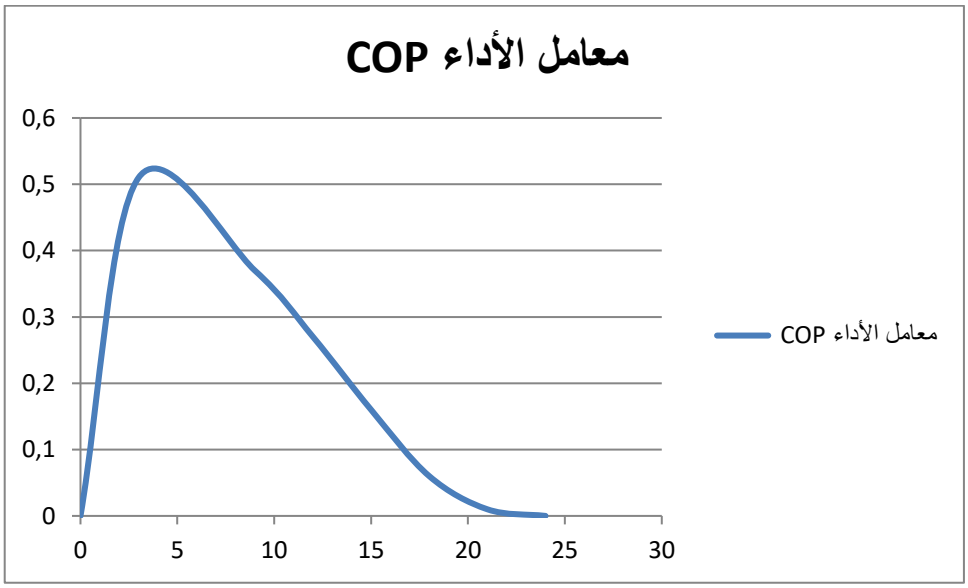
ثانيا : بتركيب مشتت الحرارة

جدول 3-4 :خصائص القطعة بلتير عند تطبيق جهد متغير بتركيب مشتت حرارة

الجهد المطبق (V)	التيار المقاس/المحسوب (A)	الاستطاعة الكهربائية (W)	درجة حرارة الوجه الساخن Th (oC)	درجة حرارة الوجه البارد Tc (oC)	الاستطاعة الحرارية للوجه الساخن Qh (W)	الاستطاعة الحرارية للوجه البارد Qc (W)	معامل الأداء COP
0	0.0	0.0	27.0	27.0	0.0	0.0	0.00
3	1.5	4.5	29.5	12.0	6.8	2.3	0.51
9	4.2	37.8	41.0	-8.5	52.0	14.2	0.37
12	5.3	63.6	49.5	-12.0 (أقصى تبريد)	81.1	17.5	0.27
15	6.0	90.0	62.0	-2.0	104.5	14.5	0.16
18	6.4	115.2	82.0	18.0	123.0	7.8	0.06
21	6.6	138.6	110.0	55.0	141.0	2.4	0.01
24	6.8	163.2	> 138 (بداية التلف)	92.0	--	--	0.00 (تلف حراري)
27	*تالف*	*تالف*	تالف واحتراق	تالف	--	--	--
30	*تالف*	*تالف*	تالف واحتراق	تالف	--	--	--



الشكل 3-6 : خصائص الوحدة بدلالة الجهد المطبق



الشكل 3-7 : تغيرات معامل الاداء COP بدلالة الجهد

3. 4 تحليل وملاحظات علمية على نتائج وجود المشتت:

1. **تحسن الأداء عند الجهود العادية (V3–V12):**

- نلاحظ أن الوجه البارد Tc ينخفض بشكل ممتاز ليصل إلى **C12°–** عند جهد V12، وذلك لأن المشتت حافظ على درجة حرارة الوجه الساخن عند C49.5°، مما أتاح للقطعة خلق فارق حراري (ΔT) يقارب C61.5°.
- قيم الاستطاعة الحرارية للوجه البارد (Qc) موجبة، مما يعني أن القطعة تمتص الحرارة بفعالية وتؤدي وظيفة التبريد بنجاح.

2. **تراجع الأداء عند تجاوز الجهد الاسمي (V15):**

- عند V15، تبدأ كفاءة التبريد بالتراجع (ترتفع Tc إلى C2–°)، لأن الحرارة المتولدة داخلياً عبر تأثير جول أصبحت أكبر من قدرة المشتت الصغير على التخلص منها.

3. **نقطة الانهيار الحراري (V24–V30):**

المشتت المرفق بوزن 11 gوأبعاد صغيرة يعجز تماماً عن التعامل مع استطاعة كهربائية تتجاوز 130 .Wلذلك، عند جهد 24 Vوما فوق، تخترق الحرارة المرتدة الوجه البارد لتصل إلىC° 92 ، وتتجاوز حرارة الوجه الساخن C°138، مما يؤدي إلى تسييل اللحام الداخلي وتدمير القطعة نهائياً، لتصبح قيم الجهود 27 Vو 30 Vغير قابلة للتطبيق عملياً نتيجة احتراق المنظومة .

بناءً على نتائج محاكاة الحالة الثانية (باستعمال المشتت والمروحة)، يمكنك الحصول على درجة حرارة تجميد تساوي -2على الوجه البارد للقطعة عبر طريقتين تشغيليتين مختلفتين،

- **الطريقة الأولى: التشغيل في النطاق الآمن والمثالي -لخيار الأفضل**

الجهد المطبق : يتم ضبط مولد الجهد المستمر في النطاق بين 9-V12

- **الطريقة الثانية: التشغيل في النطاق الحرج-خيار غير مستقر**

الجهد المطبق: يتم ضبط المولد على جهد 15 V

كيفية التحكم : بمجرد رفع الجهد إلى 15 V في التجربة أن درجة الحرارة تمر بنقطة أقصى تبريد -12عند 12 V تبدأ بالارتفاع مجدداً لتستقر عند -2

للايجاد قطع بلتير اكثر كفاءة لدينا:

القطعة التجارية التي نستخدمها (TEC1-12706) تعتمد على مادة بزموت تيلورايد Bi_2Te_3) التقليدية. لتطوير الأداء، ينقسم التوجه العلمي إلى مسارين: تعديل المادة الحالية عالي النانو، أو استبدالها بمواد متقدمة .

3.4.1 الهيكلي للمواد الحالية: (Nanostructuring of Bi2Te3)

بدلاً من تغيير المادة بالكامل، يتم تعديل بنيتها الفيزيائية مجهرياً لرفع مقياس الاستحقاق الحراري الكهربائيZT ، والذي يتحكم مباشرة في كفاءة القطعة ومعامل الأداء وهو معامل سيبك، S الموصلية الكهربائية σ، و (K) الموصلية الحرارية. الهدف هنا هو خلق مادة تفصل الكهرباء عن الحرارة اي انها تمرر الكهرباء وتمنع الحرارة

3.4.2 استبدال المواد بأشباه موصلات متقدمة: (Advanced Materials)

للوصول إلى درجات تجمد عميقة من 10 -إلى 30- وبكفاءة طاقة عالية، نقترح استخدام المواد التالية كبدائل متطورة:

أ. سبائك السيزيوم والبزموت والأنتيمون(Cs-Bi-Sb-Te)

تعتبر هذه المواد (مثل CsBi4Te6)من أفضل البدائل المصممة خصيصاً للعمل في درجات الحرارة المنخفضة جداً (أقل من 250 K أو ما دون -23°C). وتمتاز بمعامل سيبك مرتفع عند درجات الحرارة المنخفضة مقارنةً بمادة بزموت تيلورايد التقليدية(Bi_2Te_3) ، التي تنخفض كفاءتها كلما ازدادت البرودة.

ب. مواد السكوتيروديت (Skutterudites)

وهي مركبات تعتمد على الكوبالت أو النيكل أو الحديد مع الزرنيخ أو الأنتيمون، وتمتلك بنية بلورية تحتوي على 'أقفاص مجهرية' يمكن ملؤها بذرات ثقيلة مثل الباريوم أو اللانثانوم. تؤدي اهتزازات هذه الذرات إلى تشتيت الحرارة وخفض الموصلية الحرارية، مما يمنح المادة كفاءة تشغيلية مرتفعة وقدرة تبريد قوية تسمح بالوصول إلى درجات حرارة تقارب -30°C دون استهلاك مفرط للتيار الكهربائي.

ج. المواد المعتمدة على السيلينيوم (Bi-Sb-Te-Se) :

يؤدي تطعيم السبيكة الأساسية بعنصر السيلينيوم بنسب مدروسة إلى تحسين استقرار البلورات من النوع n-type والنوع p-type، وتقليل ظاهرة التأين الذاتي عند الفروقات الحرارية المرتفعة، مما يرفع معامل الأداء (COP) بنسبة قد تصل إلى 30% عند درجات الحرارة القريبة من التجمد.

3. 5 مقترح التصميم الهندسي لتحقيق الهدف عملياً :

حتى مع استخدام أفضل المواد شبه الناقلة، يبقى الوصول إلى درجات حرارة تتراوح بين -10 °C و -30 °C بمعامل أداء مرتفع أمراً صعباً عند الاعتماد على طبقة تبريد واحدة(Single-stage) ، وذلك بسبب الفارق الحراري الكبير المطلوب.

المقترح الأمثل: النظام المتتالي(Cascaded / Multi-stage TEC)

- ✓ الفكرة: استخدام نظام بلتيير مكوّن من طبقتين أو ثلاث طبقات متراكبة.
- ✓ آلية العمل: تمتص الطبقة العلوية (الباردة) الحرارة من الوسط المراد تبريده وتنقلها إلى مستوى حراري متوسط، ثم تتولى الطبقة السفلية الأكبر حجماً والأعلى قدرةً امتصاص هذه الحرارة وضخها نحو المشتت الحراري الخارجي.
- ✓ النتيجة: يؤدي توزيع الحمل الحراري بين المراحل المختلفة إلى تقليل العبء على كل طبقة، مما يرفع معامل الأداء الكلي (COP) للمنظومة، ويتيح الوصول إلى درجات حرارة تقارب -30°C بكفاءة أعلى واستقرار تشغيلي أفضل.

جدول 5-3 : المواصفات التصميمية المقترحة لنظام بلتيير متعدد المراحل

الطبقة	عدد الأزواج (Pairs)	الأبعاد الهندسية الخارجية المقترحة	الجهد التشغيلي المثالي	التيار المثالي
الطبقة الأولى (العلوية)	32زوجاً	20×20 mm	3.8 V	2.8 A
الطبقة الثانية (السفلية)	80زوجاً	40×40 mm	9.6 V	3.2 A

3. 6 الخصائص الكهربائية، الحرارية، والفيزيائية للمواد نصف الناقلة المكونة لـ:TEC1-12706. موديول Peltier الشهيروالمستخدم بكثرة في التبريد الكهروحراري

3. 6. 1 الخصائص الكهربائية والحرارية والفيزيائية للمواد نصف الناقلة المكونة لـTEC1-12706 :

يعد TEC1-12706 من أكثر الموديولات الكهروحرارية شيوعاً واستخداماً في تطبيقات التبريد والتنظيم الحراري. يعتمد أداؤه بشكل مباشر على الخصائص البنيوية والفيزيائية للمواد شبه الموصلة المكونة له.

- **الخصائص الكهربائية(Electrical Characteristics)**

يعتمد تشغيل هذا الموديول على تيار كهربائي مستمر .(DC) وتتحدد كفاءته بالقيم القصوى والنموذجية المقاسة عند درجة حرارة غرفة قياسية Th = 25°C إلى 50 °Cكالتالي:

الجهد الأقصى :(V_{max}) يبلغ حوالي 15.4 فولت، في حين يعمل الموديول عادةً عند جهد اسمي مستقر يساوي 12 فولت.

التيار الأقصى :(I_{max}) يصل إلى حدود 6.0 أمبير كحد أقصى مسموح به للحفاظ على الاستقرار الحراري.

المقاومة الداخلية :(ACR) تتراوح قيمتها بين 1.98 أوم و 2.40 أوم، وتُقاس باستخدام تيار متناوب بتردد قدره 1 .KHz

عدد الأزواج الكهروحرارية :يحتوي الموديول داخلياً على 127 زوجاً من المواد نصف الناقلة المتصلة على التوالي، وهو ما يفسر الرقم "127" في رمزه الكودي.

- **الخصائص الحرارية(Thermal Characteristics)**

تحدد هذه المؤشرات القدرة الديناميكية الحرارية للموديول على نقل وتصريف الحرارة من الجانب البارد إلى الجانب الساخن:

- **قدرة التبريد القصوى :(Q_{max})** تتراوح بين 60 واط و 63 واط، ويتم تحقيق هذه القيمة عند تطبيق أقصى تيار وجهد ممكنين بشرط أن يكون فرق درجات الحرارة بين الطرفين منعدماً.($\Delta T = 0$)
- **فارق درجة الحرارة الأقصى :(ΔT_{max})** يصل إلى نطاق يتراوح بين 66 °C و 75 °C عندما يتم عزل الطرف البارد كلياً وضمان تصريف حراري مثالي من الطرف الساخن.
- **درجة حرارة التشغيل القصوى :**حرصاً على سلامة الموديول، يجب ألا تتجاوز درجة حرارته الداخلية 138°C؛ لمنع انصهار اللحامات الداخلية الدقيقة أو تدهور الخصائص الفيزيائية لأشباه الموصلات.

- **خصائص ومكونات المواد نصف الناقلة: (Semiconductor Properties)**

يتكون الموديول بنيوياً من مصفوفة هندسية تتألف من أعمدة صغيرة جداً من مواد نصف ناقلة موصلة كهربائياً على التوالي وحرارياً على التوازي.

أولاً: التركيب الكيميائي والتطعيم

المادة الأساسية المستعملة في التصنيع هي **تيلوريد البزموت(Bi_2Te_3)** ، ويتم تطعيمها (تشويبها) لإنتاج نوعين من ناقلات الشحنة:

- **النوع السالب :(N-type)** يتم تشويبه بمركبات غنية بسيلينيد البزموت (Bi_2Se_3) لرفع تركيز الإلكترونات الحرة المسؤولة عن نقل الشحنة.
- **النوع الموجب :(P-type)** يتم تشويبه باستخدام تيلوريد الأنتيموان (Sb_2Te_3) لزيادة تركيز الفجوات (Holes) الموجبة.

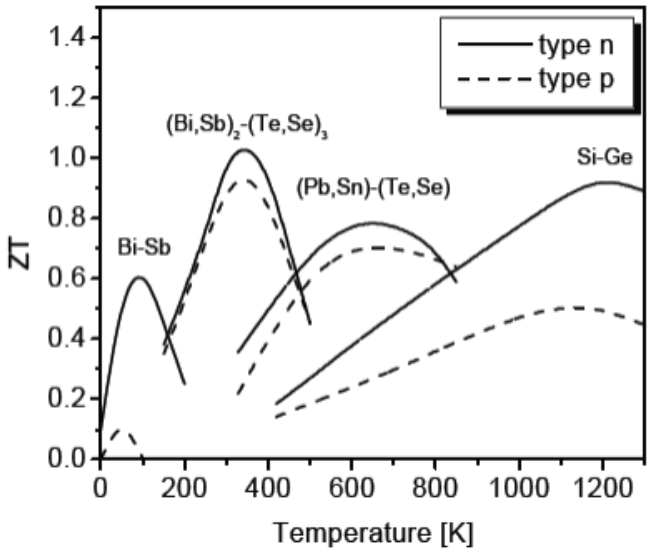
ثانياً: الخصائص الفيزيائية للمادة

وقع الاختيار علمياً وصناعياً على مركب Bi_2Te_3 نظراً لامتلاكه أعلى معامل جدارة (ZT) بالقرب من درجة حرارة الغرفة، ويتميز بالثوابت الفيزيائية التالية:

- **معامل سيبك :(Seebeck Coefficient - α)** مرتفع جداً، مما يمنحه كفاءة عالية في توليد الجهد الكهربائي عند وجود فارق حراري، أو توليد برودة حرارية عند تدفق التيار (تأثير بلتيير).
- **الناقلية الكهربائية :(σ)** مرتفعة لتقليل ضياعات الطاقة الكهربائية الناتجة عن مفعول جول الحراري(I^2R) ، والتي تؤثر سلباً على أداء التبريد.
- **الناقلية الحرارية :(k)** منخفضة للغاية، وهي ميزة حاسمة تمنع الحرارة المتولدة في الطرف الساخن من الارتداد والتوصيل الطبيعي نحو الطرف البارد، مما يحافظ على كفاءة عملية التبريد.

3. 6. 2 تحسين خصائص الأداء للمبردات الكهروحرارية :

شهدت العقود الأخيرة أبحاثاً مكثفة ركزت على تطوير المواد الكهروحرارية. تشكل سبائك البزموت-أنتيموان، وعائلة تيلوريد البزموت وتيلوريد الرصاص، إلى جانب سبائك السيليكون-جرمانيوم، القواعد الأساسية لهذه الصناعة.



الشكل:8-3 يمثل تغير عامل الجدارة ZT بدلالة درجة الحرارة للمواد التقليدية من النوع nالنوع p

ومع ذلك، فإن هذه المواد التقليدية تظل محدودة الفعالية ولا تعمل بكفاءة إلا في نطاقات حرارية ضيقة ومحددة. وفيما يتعلق بنطاق درجات الحرارة المنخفضة والقريبة من درجة حرارة الغرفة، يظل مركب تيلوريد البزموت (Bi_2Te_3) هو الخيار الأكثر استخداماً واعتماداً.

إن الهدف الاساسي لتحسين أجهزة التبريد القائمة على تأثير بلتيير مثل TEC1-12706 يكمن في رفع معامل الجدارة غير البعدي (ZT) إلى أقصى قيمة ممكنة، والذي تحكمه العلاقة الرياضية التالية:

$$\frac{S^2\sigma T}{k} = ZT \qquad (\mathbf{III-1})$$

حيث تعبر الرموز عن الثوابت التالية:

Sمعامل سيبك(Seebeck Coefficient)

σالناقلية الكهربائية$(\Omega \cdot m)^{-1}$(Electrical Conductivity)

Tدرجة الحرارة المطلقة(Absolute Temperature)

kالناقلية الحرارية الإجمالية(W/(m · K)(Thermal Conductivity)

بناءً على هذه المعادلة، يتطلب رفع كفاءة النظام زيادة بسط الكسر (معامل سيبك والناقلية الكهربائية) مع خفض المقام (الناقلية الحرارية للشبكة البلورية والإلكترونية) في آن واحد.

وعلى الرغم من الاستخدام التجاري الواسع للمواد القائمة على تيلوريد البزموت، فإن توظيفها على نطاق صناعي أوسع يواجه عقبة انخفاض المردود الكلي وكثافتها الطاقوية المحدودة. ومن هنا، فإن نافذة التطوير المعاصرة تمر عبر دمج أشباه الموصلات ذات البنيات النانوية المتقدمة (مثل مركبات $Sb_2Te_3(GeTe)_n$ أو سبائك السكوتيروديت)، والتي تتيح فصل خصائص النقل الكهربائي عن النقل الحراري، مما يساهم في رفع معامل الأداء (COP) وتوسيع النطاق التشغيلي للمنظومة.

3. 7 آليات تحسين الأداء من خلال التصميمات الهندسية ودمج تكنولوجيا النانو :

تتمحور التقنيات الحديثة لرفع كفاءة المواد الكهروحرارية حول التلاعب بالبنية المجهرية للمادة على مقياس النانو لتعديل سلوك الفونونات والإلكترونات، وذلك عبر ثلاثة محاور أساسية:

3. 7. 1 هندسة الواجهات والحدود البلورية(Grain Boundaries)

تعتمد هذه التقنية على تخليق شبكات من البلورات أو المركبات النانوية لزيادة كثافة الحدود الحبيبية والواجهات البينية داخل المادة. تعمل هذه الانقطاعات الهندسية على تشتيت "الفونونات "(الجسيمات الكمومية المسؤولية عن نقل الحرارة الاهتزازية) بشكل انتقائي وصارم، في حين تسمح بمرور الإلكترونات دون عوائق تذكر. يؤدي هذا الفصل الفيزيائي إلى خفض حاد في الناقلية الحرارية للشبكة البلورية دون الإضرار بالتدفق الكهربائي، مما يدفع بقيمة ZT نحو الأعلى.

3. 7. 2 تقنية ترسيب الطبقات الرقيقة والشبكات الفائقة: (Superlattices)

تتيح هذه الآلية هندسة مكدسات متناوبة بدقة من الطبقات ذات السمك النانوي، مما يؤدي إلى تشكيل ما يُعرف بـ" الآبار الكمومية (Quantum Wells) "نتيجة لحصر حوامل الشحنة (الإلكترونات والثقوب) في أبعاد محددة. يغير هذا الحصر الكمي من كثافة الحالات الإلكترونية للمادة، ويسمح بكسر الارتباط التقليدي بين المعاملات الكهروحرارية، مما يرفع معامل سيبك (S) ويقلل الناقلية الحرارية في آن واحد.

3. 7. 3 إدراج الجسيمات النانوية: (Nanoparticle Inclusion)

تتضمن هذه الطريقة تطعيم مصفوفة Bi_2Te_3 الأساسية بإدراجات نانوية من عناصر ممتازة التوصيل أو ذات بنية مميزة مثل الذهب، أو الغرافين، أو أنابيب الكربون النانوية .(CNTs) تولد هذه الإدراجات تأثيراً فيزيائياً يُعرف بـ" التصفية الطاقوية(Energy Filtering) "، حيث تتشكل حواجز جهد كهربائي عند الواجهات البينية تقوم بتشتيت وحجب حوامل الشحنة ذات الطاقة المنخفضة انتقائياً، مما يؤدي إلى قفزة في قيمة معامل سيبك (S) مع الحفاظ على استقرار وثبات الناقلية الكهربائية.(σ)

ولضمان جودة هذه المواد النانوية المركبة، تعتمد خطوط الإنتاج الحديثة على دمج طرق التصنيع الكيميائي من أسفل إلى أعلى (Bottom-up) للتحكم الدقيق في المقياس النانوي، يليه تلبيد متطور وسريع باستخدام تقنية الشرارة البلازمية (Spark Plasma Sintering - SPS)لدمج المادة الكتلة مع منع نمو الحبيبات البلورية والحفاظ على الخصائص النانوية المكتسبة.

3. 8 استعراض ومقارنة المواد المبتكرة ذات الكفاءة العالية :

يمثل البحث عن بدائل متطورة لمركب تيلوريد البزموت التقليدي Bi_2Te_3 ضرورة ملحة لتجاوز عقبات السمية، التكلفة المرتفعة، ومحدودية درجات حرارة التشغيل. وتتوزع هذه المواد المبتكرة على عدة عائلات فيزيائية نوضحها بالتفصيل من خلال الجدولين التاليين:

3. 8. 1 التحليل النوعي لعائلات المواد المبتكرة :

يوضح الجدول رقم (1-3) الخصائص البنيوية والوظيفية لأبرز البدائل المطروحة في الأبحاث الحديثة:

جدول (3-6): استعراض تفصيلي للمواد المبتكرة البديلة وخصائصها الكهروحرارية

الوصف والخصائص والمميزات الكهروحرارية الوظيفية	عائلة المادة / التصنيف
تعتمد على دمج بنيات مجهرية معقدة للغاية مثل مشتقات من نوع 3 $GeTe\text{-}Bi_2Te_3$أو 17 .$Sb_2Te_3(GeTe)$ تكمن ميزتها الأساسية في القدرة على الوصول إلى قيم جدارة (ZT) قياسية تتجاوز 2، مستفيدة من المجالات الفيروكهربائية المتولدة على المقياس النانوي والتي تشتت الحرارة بامتياز.	**مركبات التيلوريد المعدلة**
توفر هذه المركبات المعدنية البينية استقراراً حرارياً ممتازاً ومقاومة ميكانيكية فائقة تلائم التطبيقات ذات درجات الحرارة المرتفعة. وخلافاً للمواد الكلاسيكية السامة والنادرة مثل تيلوريد البزموت أو تيلوريد الرصاص(PbTe) ، فإن سبائك هويسلر (لا سيما القائمة على الفاناديوم، الحديد، والألومنيوم مثل Fe_2VAl)تتميز بوفرة عناصرها في الطبيعة، وانخفاض تكلفتها، وصداقتها للبيئة.	**سبائك من نوع هويسلر (Half-Heusler)**
تُظهر أطوار زينتل المتقدمة، مثل المركب القياسي$Yb_{14}MnSb_{11}$ ، ناقلية حرارية منخفضة للغاية تقترب من الحد الزجاجي الأدنى، مع الحفاظ على خصائص نقل إلكتروني ممتازة كأشباه موصلات. تُصنف كخيارات مثالية لمشاريع استرجاع الطاقة المهدرة وتحويل الحرارة العالية إلى طاقة كهربائية في تطبيقات الفضاء والمستشعرات الحرارية المتقدمة بفضل روابطها البنيوية المعقدة التي تفصل الإلكترونات عن الفونونات.	**المركبات القائمة على طور زينتل(Zintl)**
تمثل النواة الأساسية لتطوير أجهزة التبريد المرنة والمحمولة .(Wearable Electronics) بفضل مرونتها الميكانيكية العالية وخفة وزنها، يمكن تشكيلها لتلتصق بالأسطح المعقدة أو جسم الإنسان، حيث تستغل تأثير بلتيير لتنظيم الحرارة وتوليد البرودة مباشرة من التيار الكهربائي دون الحاجة لأي أجزاء ميكانيكية متحركة.	**البوليمرات الناقلة وأشباه الموصلات العضوية**

2.8.3التحليل الكمي والمقارنة الفيزيائية بين عائلات المواد :

يقدم الجدول رقم (2-4) مقارنة فيزيائية وكمية دقيقة توضح الفروقات الأساسية في الأداء ونطاقات التشغيل بين المواد التقليدية والبدائل الحديثة:

جدول (7-3): مقارنة معايير الأداء والخصائص الفيزيائية بين عائلات المواد الكهروحرارية

عائلة المواد الكهروحرارية	نوع التوصيل (Conduction)	عامل الجدارة (ZT)	نطاق درجة الحرارة الأمثل(K)	الخصائص الفيزيائية والتشغيلية الرئيسية
Bi_2Te_3وسبائكه التقليدية (المرجع)	N, P	1.0إلى 1.5	250 K - 500 K	أداء ممتاز وثابت بالقرب من درجة حرارة الغرفة، لكنه يعاني من قيود التحلل البنيوي والتدهور عند تخطي حاجز درجات الحرارة المتوسطة نتيجة لتفكك المزيج البلوري.
أطوار زينتل(Zintl) مثال: $Yb_{14}MnSb_{11}$	P	1.3إلى 1.5	800 K - 1100 K	بنية بلورية بالغة التعقيد، تمنحها ناقلية حرارية شديدة الانخفاض، مما يجعلها مثالية للتطبيقات الفضائية والمستشعرات الحرارية المتقدمة في البيئات القاسية.
سبائك هويسلر (Half-Heusler) مثال : (Hf,Zr,Sb,ZrNiSb)	N, P	1.0إلى 1.5	600 K - 1000 K	استقرار حراري مذهل ومقاومة ميكانيكية ممتازة ضد الإجهادات، مما يضعها كأفضل خيار لتطبيقات استرجاع طاقة العوادم في المحركات الضخمة والتطبيقات الصناعية الثقيلة.
مركبات التيلوريد المعدلة (Chalcogenides) مثال: SnTe, PbTe	N, P	1.5إلى 2.2	500 K - 900 K	تعتمد على بنية بلورية نانوية مركبة ومصنعة بتقنيات الصهر السريع، تحقق كفاءة طاقوية بالغة الارتفاع؛ وترتبط سعة تشغيلها واستقرارها بنوعية المعالجة الكيميائية المطبقة.
أشباه الموصلات العضوية والبوليمرات الناقلة	N, P	1.5إلى 2.0	حتى K800	مرونة هندسية استثنائية وقابلية تشكيل عالية؛ تضمن هندستها الجزيئية فصلاً تاماً لمسارات نقل الحرارة الاهتزازية عن مسارات نقل الإلكترونات الحرة لتوليد برودة فعالة.

خاتمة عامة

خاتمة عامة

من خلال التجارب المخبرية المنجزة والقياسات العملية التي قمنا بها في هذه الدراسة، تمكنا من فهم السلوك الحراري والطاقوي لمبرد بلتير عند تشغيله بجهد مستمر. وسمحت لنا هذه الدراسة بتحديد الحدود التشغيلية الحقيقية للقطعة المستخدمة، والوقوف على مدى أهمية نظام التشتيت الحراري في إنجاح عملية التبريد أو التسبب في تلف المنظومة بالكامل، وذلك بسبب التوازن الحرج بين تأثير بيلتير الامتصاصي وتأثير جول المبدد للطاقة.

وقد أكدت الملاحظات المتحصل عليها م الدراسة أن كفاءة التبريد واستقرار الفارق الحراري يرتبطان بضبط الجهد في نطاق تشغيلي آمن ومثالي يسمح للحامل الحراري بالعمل دون إجهاد. في المقابل، تبيّن عمليًا أن محاولة رفع الجهد لتجاوز الحد الاسمي، أو تشغيل القطعة دون وسيلة تشتيت كافية، يتسبب سريعًا في تراكم الحرارة وضخها عكسيًا نحو الوجه البارد، مما يرفع من احتمالية انهيار الأداء تمامًا وانصهار اللحام الداخلي للمنظومة؛ وهي نتيجة تفسر بوضوح تباين الاستنتاجات في الأدبيات السابقة وتضع حلولاً عملية لتفادي تلف القطع في التطبيقات الميدانية.

إذ توصلنا إلى ان درجات تجمد عميقة ومستقرة لخدمة أنظمة التبريد الصديقة للبيئة المعتمدة على الألواح الكهروضوئية، يتطلب تجاوز القيود الفيزيائية للمواد التقليدية. ونوصي بناءً على هذه الدراسة بالتوجه نحو استغلال المواد شبه الموصلة الحديثة ذات البنى النانوية التي تفصل بين التوصيل الكهربائي والحراري، مع ضرورة تبني التصميم الهندسي القائم على تركيب الطبقات المتتالية لتوزيع العبء الحراري ورفع معامل الأداء الإجمالي للنظام و يعتمد TEC1-12706على مركبات Bi_2Te_3ويحقق أفضل أداء قرب درجة حرارة الغرفة، بينما تمثل المواد النانوية والبدائل الحديثة المسار الرئيسي لرفع الكفاءة الطاقوية وتحسين معامل الجدارة .**ZT**

قائمة المراجع

قائمة المراجع

[1] "EDF, 'Explained: Thermoelectricity | MIT News.' http://news.mit.edu/2010/explained thermoelectricity-0427 (accessed Jun. 11, 2020)".

[2] S. IBTISSEM, "Étude et Modélisation d ' un Générateur Thermoélectrique," 2013.

[3] أنفال, "دراسة الظاهرة الكهروحرارية و تطبيقات المبرد بلتير في التبريد باستغلال الطاقة الشمسية," *جامعة قاصدي مرباح ورقلة*. and ب. مية

[4] L. DJABOU, F. LEBSSISE, and K. MOKRANI, "Génération de courant par effet thermoélectrique à base du module Peltier," *UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA*.

[5] S. Chetrat, "Étude théorique des propriétés thermoélectriques des matériaux et leurs applications," 2023, *faculté des sciences et de la technologie* univ bba*.

[6] D. M. Rowe, *Thermoelectrics handbook: macro to nano*. CRC press, 2005.

[7] H. J. Goldsmid, *Introduction to thermoelectricity*, vol. 121. Springer, 2010.

[8] F. R. Pratama and V. Saraswati, "Design of Thermoelectric Peltier Effect Demonstrator using Modul TEC-12706 and TEG-SP1848," *Phys. Educ. Res. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, 2023.

[9] R. A. Y. GOUTAL Mohamed Amine, "Amélioration des performances d'un système de refroidissement à effet Peltier," 2021.

[10] E. Comparative and E. Deux, "Mémoire," 2019.

[11] S. Choi, U. Han, H. Cho, and H. Lee, "Review: Recent advances in household refrigerator cycle technologies," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 132, pp. 560–574, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.133.

[12] E. A. Hafiz, "Advanced Refrigeration and Air Conditioning Systems".

[13] S. Djezzar and A. H. Meniai, "Etude de mélanges d'alcanes dans les machines de réfrigération a absorption et modélisation de leurs propriétés et performances," 2019, *Université Constantine 3 Salah Boubnider, Faculté de génie des procédés ....*

[14] T. J. Seebeck, *Magnetische polarisation der metalle und erze durch temperatur-differenz*, vol. 70. Engelmann, 1895.

[15] G. Borelius, "Über die thermoelektrischen Erscheinungen als Mittel zur Analyse der metallischen Mischkristalle und über den Ursprung der Thermoelektrizität," *Ann. Phys.*, vol. 358, no. 16, pp. 615–628, 1918.

[16] J. C. A. Peltier, *Nouvelles expériences sur la caloricité des courans électriques*. 1834.

[17] S. P. Thompson, "The Kelvin Lecture.'The life and work of Lord Kelvin,'" *J. Inst. Electr. Eng.*, vol. 41, no. 191, pp. 401–423, 1908.

[18] W. T. B. Kelvin, *Mathematical and physical papers: collected from different scientific periodicals from May, 1841, to the present time*, vol. 1. Cambridge University Press, 1882.

[19] X. Zhu, Y. Yu, and F. Li, "A review on thermoelectric energy harvesting from asphalt pavement: Configuration, performance and future," *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, p. 116818, 2019.

[20] J. Kollert, "Über den Wirkungsgrad der Thermosäulen," *ETZ*, vol. 11, pp. 333–339, 1890.

[21] A. F. Ioffe, L. S. Stil'Bans, E. K. Iordanishvili, T. S. Stavitskaya, A. Gelbtuch, and G. Vineyard, "Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling," *Phys. Today*, vol. 12, no. 5, p. 42, 1959.

[22] D. M. Rowe, *CRC handbook of thermoelectrics*. CRC press, 2018.

[23] L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus, "Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit," *Phys. Rev. B*, vol. 47, no. 19, p. 12727, 1993.

[24] T. M. Tritt, *Thermal conductivity: theory, properties, and applications*. Springer Science & Business Media, 2005.

[25] G. J. Snyder and E. S. Toberer, "Complex thermoelectric materials," *Nat. Mater.*, vol. 7, no. 2, pp. 105–114, 2008.

[26] K. Biswas *et al.*, "High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures,"

Nature, vol. 489, no. 7416, pp. 414–418, 2012.

[27] J. He and T. M. Tritt, "Advances in thermoelectric materials research: Looking back and moving forward," *Science (80-.).*, vol. 357, no. 6358, p. eaak9997, 2017.

[28] C. E. Ouserigha, G. E. Ogobiri, and A. E. Lucky, "Evaluation of the TEC1-12706 device ' s performance for the development of a portable Peltier thermoelectric cooler box .," vol. 6, no. 15, pp. 93–105, 2025, doi: 10.5281/zenodo.17714012.

[29] A. Muchlis, K. Y. Utomo, and T. Mulyanto, "Performance analysis of the thermoelectric tec 12706-based cooling system in cooler box design," *Int J Sci Technol*, vol. 2, no. 1, pp. 65–72, 2023.

[30] M.-W. Tian, F. Aldawi, A. E. Anqi, H. Moria, H. S. Dizaji, and M. Wae-hayee, "Cost-effective and performance analysis of thermoelectricity as a building cooling system; experimental case study based on a single TEC-12706 commercial module," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 27, p. 101366, 2021.

[31] S. Maryani and R. D. Kusumanto, "Solar panel optimization using peltier module TEC1-12706," *J. Mech. Civ. Ind. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 43–50, 2023.

[32] M. H. Harun *et al.*, "A study on the potential of peltier in generating electricity using heat loss at engine and exhaust vehicle," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 49, no. 1, pp. 77–84, 2018.

[33] E. Salsabila, T. A. Ajiwiguna, and A. Suhendi, "Performance evaluation of TEC1-12706 thermoelectric cooler module at low temperature experimentally," in *2019 International conference on information and communications technology (ICOIACT)*, IEEE, 2019, pp. 835–838.

[34] A. K. Mainil, A. Aziz, and M. Akmal, "Portable thermoelectric cooler box performance with variation of input power and cooling load," *Aceh Int. J. Sci. Technol*, vol. 7, no. 2, pp. 85–92, 2018.

[35] T. Gong *et al.*, "Numerical simulation on a compact thermoelectric cooler for the optimized design," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 146, pp. 815–825, 2019.

[36] C. Qiu and W. Shi, "Comprehensive modeling for optimized design of a thermoelectric cooler with

non-constant cross-section: Theoretical considerations," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 176, p. 115384, 2020.

[37] S. B. Riffat and X. Ma, "Thermoelectrics: a review of present and potential applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 913–935, 2003.

[38] D. Champier, "Thermoelectric generators: A review of applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 140, pp. 167–181, 2017.

[39] W. Chen, X. Shi, J. Zou, and Z. Chen, "Thermoelectric coolers: progress, challenges, and opportunities," *Small Methods*, vol. 6, no. 2, p. 2101235, 2022.

[40] S. Lineykin and S. Ben-Yaakov, "Modeling and analysis of thermoelectric modules," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 2, pp. 505–512, 2007.

[41] N. Ahammed, L. G. Asirvatham, and S. Wongwises, "Entropy generation analysis of graphene–alumina hybrid nanofluid in multiport minichannel heat exchanger coupled with thermoelectric cooler," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 103, pp. 1084–1097, 2016.

[42] J. Choi, C. Dun, C. Forsythe, M. P. Gordon, and J. J. Urban, "Lightweight wearable thermoelectric cooler with rationally designed flexible heatsink consisting of phase-change material/graphite/silicone elastomer," *J. Mater. Chem. A*, vol. 9, no. 28, pp. 15696–15703, 2021.

الملخص

يقدم هذا العمل دراسة مخبرية وتقييمًا تطبيقيًا لأداء منظومة تبريد كهروحرارية تعتمد على القطعة التجارية (TEC1-12706). ركزت التجارب على تحديد العلاقة بين الجهد الكهربائي المطبق وتغيرات درجات الحرارة على الوجهين الساخن والبارد، مع حساب معامل الأداء الطاقوي (COP) في حالتي تشغيل: بدون مشتت حراري وباستعماله، تمهيدًا لتشغيل المنظومة بالطاقة الشمسية. بينت النتائج أن غياب المشتت يؤدي سريعًا إلى تلف القطعة، بينما ساهم المشتت في خفض درجة حرارة الوجه البارد إلى 12C°- عند جهد يتراوح بين 9 و 12 فولط. وتأكّد تطبيقيًا أن رفع الجهد إلى 15 فولط فما فوق يؤدي إلى مفعول عكسي بسبب حرارة "جول" المتولدة داخليًا. لتجاوز هذه الحدود والوصول إلى درجات تجمد أعمق (من 10C°-الى 30C°-)، يقترح البحث استبدال المادة التقليدية بسبائك حديثة مثل مركبات السكوتيروديت، مع تصميم هندسي يعتمد على تركيب طبقات تبريد متتالية لتوزيع الحمل الحراري.

الكلمات المفتاحية: تبريد بلتير، قطعة (TEC1-12706)، معامل الأداء، مواد كهروحرارية

Abstract

This work presents a laboratory study and an applied evaluation of the performance of a thermoelectric cooling system based on the commercial module (TEC1-12706). The experiments focused on determining the relationship between the applied electrical voltage and the temperature variations on both the hot and cold sides, while calculating the coefficient of performance (COP) under two operating conditions: without a heat sink and with its use, in preparation for operating the system with solar energy. The results indicated that the absence of the heat sink quickly leads to the degradation of the module, whereas the heat sink contributed to reducing the cold side temperature to -12°C at a voltage ranging between 9 and 12 Volts. It was practically confirmed that raising the voltage to 15 Volts and above leads to a counterproductive effect due to the internally generated Joule heating. To overcome these limitations and reach deeper freezing temperatures (from -10°C to -30°C), the research proposes replacing the conventional material with modern alloys such as skutterudite compounds, along with an engineering design based on cascading sequential cooling layers to distribute the thermal load.

Keywords: Peltier cooling, TEC1-12706 module, coefficient of performance, thermoelectric materials

Résumé

Ce travail présente une étude expérimentale et une évaluation pratique d'un système de refroidissement thermoélectrique utilisant le module commercial (TEC1-12706). Les essais ont porté sur la détermination de la relation entre la tension appliquée et les variations de température sur les faces chaude et froide, avec le calcul du coefficient de performance (COP) sous deux modes de fonctionnement : avec et sans dissipateur thermique, en vue d'une alimentation par énergie solaire. Les résultats ont montré que l'absence de dissipateur entraîne une défaillance immédiate du module, tandis que l'utilisation d'un dissipateur adéquat a permis d'abaisser la température de la face froide à -12C° dans une plage de tension de 9V à 12V. Expérimentalement, dépasser 15V a provoqué un effet thermique inverse dû au chauffage Joule interne. Pour surmonter ces limites et atteindre des températures de congélation plus basses 10 C°à -30C°l'étude suggère de remplacer le matériau classique par des alliages avancés comme les Skutterudites, combinés à une conception géométrique en cascade multi-étagée pour répartir la charge thermique

Mots-clés: Refroidissement Peltier, module TEC1-12706, coefficient de performance, matériaux thermoélectriques