نمذجة أداء مبرّد انضغاطي- كهروحراري منزلي هجين

ياسر عبد الرزاق الغنيمه*

دكتوراه في هندسة القوى الميكانيكية*

محاضر خارج الملاك، قسم التصميم الميكانيكي والانتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية،

جامعة الفرات*

الملخص

يُقدّم هذا العمل، دراسة تجريبية وعددية للسلوك الحراري والكهربائي لمبرّد كهروحراري- انضغاطي منزلي هجين، يجمع تقنيتي التبريد الانضغاطي والكهروحراري معاً. يتألف المبرّد من ثلاث حُجر تبريديّه (غرفة التجميد وغرفة الحفظ وغرفة الكهروحراريّة). الغرفة الكهروحراريّة مبرّدة بنظام تبريد كهروحراري مستقل. تمّ تصميم النموذج التجريبي للمبرّد المنزلي الهجين للعمل وفق الشروط المحلية. من جهة أخرى، تمّ بناء نموذج رياضي يُحاكي عمل هذا المبرّد باستخدام برنامج Simulink/ Matlab، بهدف دراسة تأثير عدد من العوامل على أدائه الحراري والكهربائي. تشمل: دراسة تأثير تغيّر قيمة جهد التغذية وقيمة المقاومة الحراريّة للمبادل الحراري على الجهة الساخنة للمبرّد الكهروحراري، إضافة لدراسة تأثير تغيّر قيمة جهد التغذية للمبرّد الانضغاطي. قُورنت نتائج الدراسة العددية والتجريبية للنموذج المدروس، و أظهرت تقارباً جيداً وبفارق لا يتجاوز 10%. كما أظهرت النتائج المتنبّأ بها من خلال حلّ النموذج الرياضي، انخفاض قيمة معامل أداء المبرّد الكهروحراري مع ازدياد جهد التغذية أو المقاومة الحراريّة للمبادل الحراري، كما أشارت إلى انخفاض درجة الحرارة الداخلية لغرفتي التجميد والحفظ مع ازدياد التغذية الكهربائية للمبرّد الانضغاطي.

الكلمات المفتاحية: نمذجة - أداء- مبرّد منزلي هجين - انضغاطي - كهروحراري.

1- مقدمة Introduction

تكتسب تطبيقات التبريد- في الوقت الحاضر- أهمية كبيرة، حيث يستخدم في أغلب مجالات الصناعة، الدوائيّة منها (كحفظ الأدوية و اللقاحات الطبية)، و الغذائية في مجال تبريد وحفظ المنتجات الطازجة لفترات طويلة. كما يستخدم وبشكل خاص، في أجهزة التبريد المنزليّة (كالثّلاجّات المنزلية، المجمّدات،...الخ). يتمّ التبريد باستخدام أحدى تقنيات التبريد التقليدية (نظام التبريد الانضغاطي، نظام التبريد الامتصاصي،...) أو الحديثة (كنظام التبريد الكهروحراري،...).

تعتبر أنظمة التبريد الانضغاطي أكثر الأنظمة استخداماً في مجال المبرّدات الصناعية و المنزليّة (الثّلاجات). يتألف هذا النظام من أربعة أقسام رئيسية: الضّاغط والمبخّر والمكثّف وصمام التمدّد، تتصل هذه الأقسام مع بعضها البعض في دارة مغلقة تحوي على وسيط تبريد - كالفريونات - الذي يتغيّر طوره أثناء مروره بأجزاء الدارة لتحقيق غاية التبريد، المتمثّلة بامتصاص الحرارة من المكان المراد تبريده ومن ثمّ طرحها إلى الوسط الخارجي. عادةً، تعمل أنظمة التبريد بانضغاط البخار بمجال درجة حرارة يتراوح بين [^{0}C] (5+ إلى 20 -) ويمكن أن تصل إلى[^{0}C] (45 -) في حالة استخدام نظام تبريد انضغاطي متعدد المراحل[1]. من جهة أخرى، يُعاني النظام سابق الذكر من مشكلة تذبذب درجة حرارة غُرفه التبريديّة وبكونه سبباً للعديد من المشاكل البيئية.

2- أهمية البحث وأهدافه Importance of the research and it aims

تتجلّى أهمية هذا البحث، أنّه يقّدم حلولاً للحدّ من استخدام نظام التبريد الانضغاطي ولبعض مشاكله، التي تتمثّل في الضرر الكبير الذي يُلحقه بالغلاف الجوي وتدمير طبقة الأوزون الحامية للأرض من الأشعة الشمسية الضارّة، كونه يستخدم وسائط تبريد ضارّة بالبيئة في عمله (كالفريونات أو الأمونيا)، الأمر الذي أثار انتباه علماء المناخ و البيئة للتفكير في إيجاد الحلول المناسبة لهذه المشكلة، حيث عُقدت عدّة مؤتمرات عالمية للمناخ آخرها مؤتمر دبي للمناخ 2023، بهدف تقليل الانبعاثات الغازية والحد من استخدام وسائط التبريد الضارة بالبيئة وتشجيع استخدام الأنظمة التبريدية الصديقة للبيئة. المشكلة الأخرى التي يعاني منها نظام التبريد الانضغاطي، تتمثّل في التذبذب الكبير لدرجة الحرارة الداخلية لحُجره التبريدية الذي قد يصل إلى [^{0}C] 8 [2]. هذا التذبذب سبب رئيسي في تلف المنتجات الغذائية واللقاحات الطبية التي تحتاج إلى تبريد بدرجة حرارة ثابتة للحفاظ على خواصها. برز نظام التبريد الكهروحراري الذي يعتمد على مبدأ العالم الفرنسي (Peltier effect-1834) كأحد التقنيات البديلة - الصديقة للبيئة - التي تساعد على خفض نسبة غازات (Chlorofluorocarbons-CFC's) في البيئة كونه لا يحوي أي وسيط تبريد ضار[3] ، فهو يعمل على مبدأ تحويل الطاقة الكهربائية النظيفة - منبع تيار كهربائي مستمر- إلى طاقة حراريّة تتجلّى بحدوث فارق حراري بين جهتي النظام، بحيث يتم امتصاص حرارة من جهة ونبذها من الجهة الأخرى، وفيه خاصية هامة وهي التحكّم الكبير في درجة حرارة التبريد المطلوبة للمكان المراد تبريده كونه يعتمد على تغذية كهربائية مستمرة بمعنى تلاشي ظاهرة التذبذب الحراري بشكل كبير. السيّئة الرئيسية له استخدامه في تطبيقات ذات سعة تبريديّة لا تتجاوز بضعة مئات من الواطات، وعامل أدائه المنخفض مقارنة مع نظام التبريد الانضغاطي. الأمر الذي دفع العلماء بالتفكير في نظام تبريد هجين يجمع مميزات كلا النظامين (نظام التبريد الانضغاطي والكهروحراري) ويتلافى مساؤهما. يهدف هذا البحث إلى:

- تصميم مبرّد منزلي هجين يضمّ تقنيتي التبريد الكهروحراري والانضغاطي، بحيث يجمع مميزاتهما ويتلافى مساؤهما و يعمل وفق الشروط المحلية.

- بناء نموذج رياضي للمبرّد المنزلي الهجين في بيئة برنامج Simulink/Matlab، يُحاكي سلوكه الحراري والكهربائي.

- دراسة تأثير عدد من المتغيّرات، بهدف التنبّؤ بتأثيرهما على أداء المبرّد المنزلي الهجين باستخدام الطرق العددية بهدف تقليل الوقت والجهد والتكلفة.

3- الدراسات المرجعية Literature review

أثارت مميزات نظام التبريد الكهروحراري، اهتمام العديد من العلماء للبحث والدراسة للاستفادة منها، كالوثوقية في العمل وانعدام الضجيج لعدم وجود أجزاء متحركة في الدارة وعمر تشغيلي طويل [4]. هذا جعله مستخدماً في أغلب المجالات الصناعية والطبية والفضائية، ومجال بحث واهتمام كبير من قبل الباحثين. قدّم (Francis et al., 2013) دراسة تضمّنت تقييم أداء المبرّد الكهروحراري عند شروط عمل مختلفة باستخدام برنامج Matlab. أثبتت النتائج أنّ معامل أداء المبرّد الكهروحراري يزداد بنقص قيمة الفارق الحراري بين طرفيه [5]. كما قدّم (Astrain et al., 2005) دراسة تجريبية وعددية تضمّنت تصميم نموذج تجريبي لمبرّد كهروحراري، و لنموذج رياضي لإجراء محاكاة عددية بهدف تقييم الأداء الحراري والكهربائي لهذا المبرّد. أشارت النتائج أنّ الاستهلاك الكهربائي للمبرّد الكهروحراري يعادل ضعفي استهلاك المبرّد الانضغاطي عند نفس شروط العمل[6]. من جهة أخرى، قام (Caglar, 2018) بدراسة الشروط المثلى لعمل المبرّد الكهروحراري والذي يمكن أن يُستخدم في حفظ المشروبات الباردة والأدوية الطبية[7]. بينما قدّم الباحث (Muchlis et al., 2023) دراسة تجريبية تضمّنت تحليل أداء مبرّد كهروحراري يستخدم وحدة تبريدية من النوع TEC- 12706 [3]. وقام الباحث (Bansal et al., 2000) بإجراء دراسة مقارنة أداء بين ثلاثة أنظمة تبريديّة مختلفة مستخدمة كمبرّدات منزليّة، أشارت النتائج أنّ المبرّد الانضغاطي كان الأفضل بمعامل أداء مساوي 2.59 يليه المبرّد الكهروحراري بـ 0.59، وأخيراً المبرّد الامتصاصي بـ 0.47 [8]. من جهة أخرى، تناولت العديد من الدراسات أنظمة التبريد المنزلية الانضغاطية بالبحث والتحليل، فقد قدّم الباحث (Azzouz et al., 2006) دراسة تضمّنت تحسين فعالية الطاقة في المبرّدات المنزلية الانضغاطية [9]. بينما قام الباحث (Baakeem et al., 2018) بدراسة نظام تبريد انضغاطي متعدّد الطبقات يُستخدم للحصول على درجات حرارة منخفضة [10]. تحسين عمل المبرّد الانضغاطي، كان مصدر اهتمام الباحثين، كالبحث الذي أنجزه (Mulary et al., 2005) وأثبت فيه، أنّه يمكن تقليل تذبذب درجة الحرارة داخل غُرف المبرّد الانضغاطي المنزلي، باستخدام ضاغط ذو سرعة ثابتة أو استخدام صمام تمدّد رقمي (صمام الخنق) مع ضاغط ذو سرعة متغيرة حسب الحمل الحراري[11]. لكن في الحقيقة وُجد أنّ استخدام هذه التقنيات الاضافية ضمن المبرّد الانضغاطي، تزيد من احتمالية وقوع الاعطال، إضافة لجعله مرتفع التكلفة وغير منافس اقتصادياً في الأسواق التجارية. من هنا نجد، أنّ استخدام المبرّدات المنزلية الهجينة أصبحت ضرورة ملحّة في المنازل الحديثة التي تستخدم تقنيات التبريد الصديقة للبيئة، فتناولت العديد من الابحاث هذه المبرّدات الهجينة بالبحث والدراسة للوصول للاستفادة القصوى من كلا نظامي التبريد المجتمعين معاً. في دراسة تجريبية وعددية قام (Söylemez et al.,2022) بدراسة السلوك الحراري والكهربائي لمبرّد انضغاطي- كهروحراري منزلي هجين.

أشارت النتائج لانخفاض الاستهلاك الطاقي للمبرّد الهجين بمقدار 10% و27% عند درجة حرارة للوسط الخارجي مساوية ل[^{0}C] 16 و [^{0}C] 32، على الترتيب[12]. في دراسة أخرى قدّم (Astrain et al., 2012) تطويراً وتحسيناً لبنية المبرّد المنزلي الهجين من خلال دراسة تغيير موضع المبرّد الكهروحراري ضمن جدرانه الداخلية. الأمر الذي أدّى إلى تحسّن الاستهلاك الطاقي للمبرّد الهجين، صُنّف من المستوى الاستهلاكي الطاقي [13]. (A) مما سبق نستنتج، قِلّة في الأبحاث التي تناولت دراسة السلوك الحراري والكهربائي للمبرّدات المنزلية الهجينة التي سيكون لها استخدام متزايد في المستقبل القريب لتواكب الاحتياجات الاساسية في الحياة المدينة الحديثة.

يُقّدم هذا العمل تصميماً تجريبياً لمبرّد منزلي هجين يجمع نظامي التبريد الانضغاطي والكهروحراري معاً، بهدف الجمع بين ارتفاع معامل أداء الاول والتحكّم الدقيق بدرجة الحرارة الداخلية للثاني، إضافة لتصميم نموذج رياضي يُحاكي السلوك الحراري والكهربائي للمبرّد المدروس باستخدام Simulink/Matlab. وكما يقدّم دراسة بارا مترية للنموذج الرياضي لمعرفة تأثير تغيّر قيمة جهد التغذية للمبرّد الانضغاطي، وتغيّر قيمة جهد التغذية والمقاومة الحرارية للطرف الساخن للمبرّد الكهروحراري على أداء للمبرّد المنزلي الهجين باستخدام الطرق العددية التي تحقق وفراً في الوقت والتكلفة.

4 - الدراسة التجريبية Experimental study

يُظهر الشكل (1) المبرّد المنزلي الهجين المدروس الذي تمّ انشاؤه انطلاقاً من هيكل مبرّد انضغاطي تجاري مكوّن من غرفتي تبريد أساسيتين: تُسمّى الأولى بغرفة التجميد والثانية بغرفة الحفظ، كما هو موضّح في الشكل (1a). تمّ خلال مراحل الإنشاء، إجراء تعديل من ناحية الحجم والعزل الداخلي على تصميم غرفة الحفظ الاساسية، بحيث قُسمّت إلى قسمين (غرفتين): الغرفة الأولى سُمّيت بغرفة التبريد الكهروحراري (الغرفة الوسطى)، وهي مبرّدة بنظام تبريد كهروحراري مستقل (باستخدام وحدة بلتييه التبريديّة)، بينما سُمّيت الغرفة الثانية بغرفة الحفظ وهي مبرّدة بنظام التبريد الانضغاطي الاساسي كما هو موضّح بالشكل(1b). يُبيّن الجدول(1) مواصفات المبرّد الانضغاطي الاساسي، بينما يُبيّن الجدول(2) سماكات جدران العزل للغرفة الكهروحراريّة. صُممت الغرفة الكهروحراريّة الجديدة بأبعاد [mm]420 x [mm] 450 x [mm] 300 كطول وعرض وارتفاع على الترتيب، وهي مبرّدة بنظام تبريد كهروحراري مستقل ومعزولة عن الغرف التبريديّة الأخرى.

الجدول (1). مواصفات المبرّد الانضغاطي الأساسي

المواصفة	القيمة
حجم المبرّد الانضغاطي	330 ليتر
حجم غرفة التجميد	82.5 ليتر
حجم غرفة الحفظ الاساسية	247.5 ليتر
وسيط التبريد المستخدم	R 134a
الاستهلاك الطاقي	2.3 kw.h/day
ابعاد المبرّد (الثلاجة)	620 [mm] x 630 [mm] x 1645 [mm]

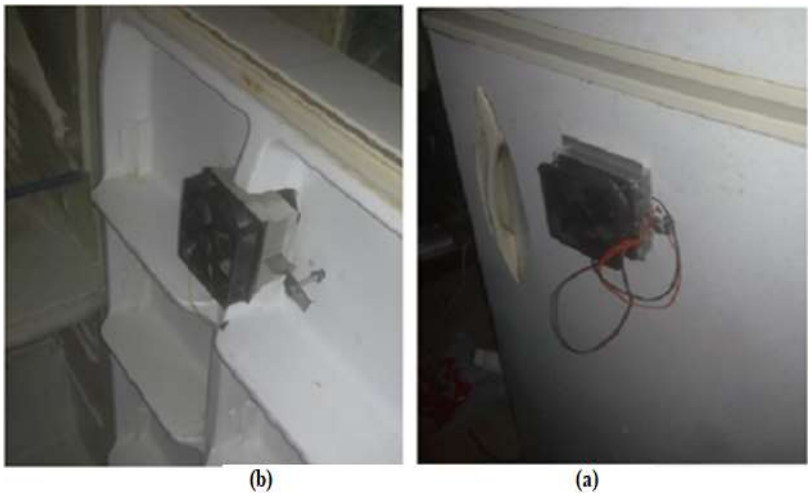
الجدول (2). سماكات جدران الغرفة الكهروحراريّة

الجدار	السماكة
السقف	0.060 [m]
الارضية	0.040 [m]

الجدار الخلفي	0.085 [m]
الامامي	0.080[m]
الجدران الجانبية	0.075 [m]

يتكوّن هذا النظام التبريدي الكهروحراري من وحدة تبريدية كهروحراريّة واحدة (تُسمّى وحدة بلتييه التبريدية) من النوع (Type TEC1- 12706) باستطاعة [W] 50 ، مع مبادلين حراريين (ماص الحرارة وماص البرودة) على طرفي الوحدة الكهروحراريّة. يتكوّن ماص البرودة المتوضّع على الجهة الباردة لوحدة تبريد بلتييه من 20 زعنفة من معدن الألمنيوم بأبعاد ([mm] 38 x 78[mm] x 78) مع مروحة تبريد داخلية، بينما يتكوّن ماص الحرارة المتوضّع على الجهة الساخنة لوحدة تبريد بلتييه من 23 زعنفة من معدن الألمنيوم بأبعاد (21 x 100[mm] x 120[mm]) مع مروحة تبريد خارجية، كما هو موضّح في الشكل (2a,b). استخدم في التجربة جهاز لقياس درجة حرارة غرف التبريد للمبرّد الهجين من النوع الرقمي بمجال[^{0}C] (50- إلى100+) ودقة قياس[^{0}C] 0.5± ، إضافة لجهاز (RXN Linear DC Power supply) لتأمين تغذية كهربائية لوحدة بلتييه ومرواح التبريد بمجال تغذية (0 إلى30) فولت و تيار كهربائي (0 إلى10) أمبير. الشكل(3) .

الشكل (1) الغرف التبريدية للمبرّد المنزلي الهجين المدروس والمبرّد الانضغاطي الاساسي.

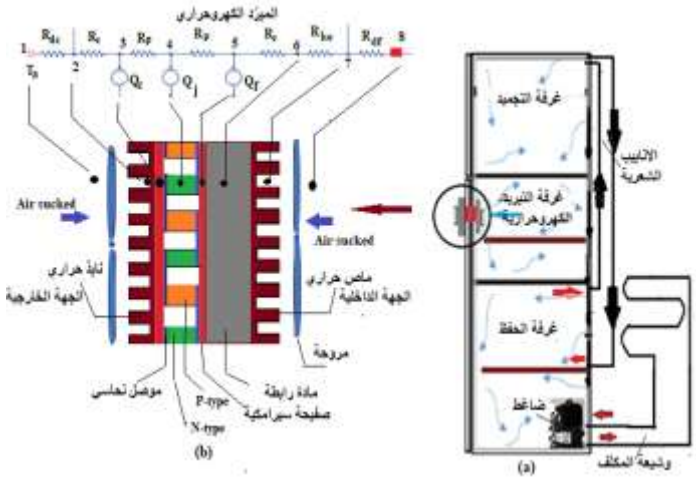


الشكل (2) ماص الحرارة(a) وماص البرودة (b)المستخدم مع وحدة تبريد بلتييه الكهروحرارية.

الشكل (3) أجهزة القياس المستخدمة خلال التجربة.

5 - الدراسة العددية Numerical study

5-1- بناء النموذج الرياضي



الشكل (4) تمثيل المبرّد المنزلي الهجين والمبرّد الكهروحراري.

تمّ بناء النموذج الرياضي (Mathematical model) اعتماداً على قوانين التشابه الكهربائي- الحراري ومعادلات التأثيرات الكهروحرارية وانتقال الحرارة، بهدف محاكاة السلوك الحراري والكهربائي للمبرّد المنزلي الهجين. يهدف النموذج الرياضي لدراسة الحالة العابرة لانتقال الحرارة عبر جدران الغرف التبريدية للمبرّد الهجين من جهة أولى، وبين الغرف والوسط المحيط بها من جهة ثانية. تضمّ التأثيرات الكهروحرارية: تأثير بلتييه **(Peltier effect)**، تأثير سيبك **(Seebeck effect)**، حرارة جول (Joule heat)، فيما تمّ اهمال تأثير حرارة طومسون لصغرها. تُعطى كمية الحرارة المطروحة عبر الجهة الساخنة لوحدة بلتييه ($Q_{p,h}$)، كالآتي[6]:

$$Q_{p,h} = n.S.\ I.T_h \qquad (1)$$

حيث: n عدد الأزواج الكهروحرارية (127 زوجاً كهروحرارياً) ، I التيار الكهربائي المار مقاساً بالأمبير، T_h درجة حرارة الجهة الساخنة لوحدة بلتييه مقاسة [K]، S معامل سيبك مقاساً [V / K] . علماً أنّ قيمة معامل سيبك تُعطى بالمعادلة التالية:

$$S = -(-0.09905\ T_h^2 + 930.6\ T_h + 22224.0)\ x10^{-9}, \quad T_h\ [\ K\ ] \qquad (2)$$

بالمثل، تُعطى كمية الحرارة المُمْتصة على الجهة الباردة ($Q_{p,c}$) بالمعادلة التالية:

$$Q_{p,c} = n.S.\ I.T_c \qquad (3)$$

حيث: T_c درجة حرارة الجهة الباردة لوحدة بلتييه مقاسة [K]. وتُعطى قيمة معامل سيبك بالمعادلة التالية:

$$S = (-0.09905\ T_c^2 + 930.6\ T_c + 22224.0)\ x10^{-9}, \quad T_c\ [K] \qquad (4)$$

بينما، تُعطى كمية الحرارة المتولّدة ضمن المبرّد الكهروحراري- حرارة جول- بالمعادلة:

$$Q_J = n.\ I^2\ .\ R_e \qquad (5)$$

حيث: R_e المقاومة الكهربائية للوحدة الكهروحرارية مقاسة بالأوم.

اعتُمِدَ في بناء النموذج الرياضي للمبرّد المنزلي الهجين على مبدأ تمثيل كل مكوّن من مكوّناته بعقدة أو أكثر في مخطط العقد، يفصل بين كل عقدتين متجاورتين مقاومة حرارية، وتتميّز كل عقدة بحجم وسعة حرارية نوعية وكثافة مختلفة تتعلّق بطبيعة المكوّن الذي تُعبر عنه. يُعبّر عن كل عقدة في مخطط العقد بمعادلة تفاضلية رياضية يتمّ تمثيلها في المخطط الصندوقي للنموذج الرياضي للمبرّد الهجين(الشكل (5)) بالاستفادة من مكتبة برنامج Simulink/Matlab و يكون لكل عقدة سعة حرارية خاصة [C]، تُعطى كالآتي:

$$C = V.\ C_p.\ \rho \qquad (6)$$

حيث:V، cp، ρ الحجم و الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت والكثافة للمكوّن الأساسي الممثّل بالعقدة المدروسة. من جهة أخرى، يُحسب التدفق الحراري العابر بين العقد المتجاورة بالمعادلة التالية[11]:

$$(\rho.V.Cp)_n.\frac{\partial T_n}{\partial t} = \sum \frac{T_n - T_{nb}}{R} + Q_{gen} \qquad (7)$$

حيث: n ترتيب العقدة المدروسة.T_n ، T_{nb} درجة حرارة العقدة المدروسة والمجاورة لها، على الترتيب. R المقاومة الحرارية للعقدة المدروسة، Q_{gen} كمية الحرارة المتولّدة داخل العقدة المدروسة. تُحسب قيمة المقاومة الحرارية للعقدة بناء على الشكل الهندسي للجزء المدروس وخواصه الفيزيائية ومعادلة انتقال الحرارة المتعلّقة. في المحصلة، تمّ تمثيل المبرّد المنزلي الهجين بنموذج رياضي مكوّن من 13 عقدة تمثّل كافة مكوّناته الأساسية. أيّ 13 معادلة رياضية تُعبّر عن معادلات التدفق الحراري بين العقد المتجاورة. يتمُّ حلّ للنموذج الرياضي بحلّ المعادلات الكهروحرارية ومعادلات انتقال الحرارة معاً، مع الأخذ بعين الاعتبار الفرضيات التالية أثناء الحلّ: 1) إهمال تأثير حرارة طومسون في المعادلات الكهروحرارية.2) اعتبار المواد متماثلة الخواص في كل الاتجاهات. يُبَين الجدول (3) الخصائص الحراريّة والكهربائيّة للمواد المستخدمة في النموذج الرياضي للمبرّد الكهروحراري.

الجدول (3) الخصائص الحرارية والكهربائية لمكوّنات المبرّد الكهروحراري.

المكوّن	المادة المستخدمة	الكثافة [kg/m^3]	الحرارة النوعية [J/kg.K]	الايصالية الحرارية [W/m.K]	معامل سيبك [V/K]
المبادل الحراري للجهة الباردة	الالمنيوم	2770	900	237	–
المبادل الحراري للجهة الساخنة	الالمنيوم	2770	900	237	–
المادة الرابطة	النحاس	8300	385	401	–
موصل كهربائي	النحاس	8300	385	401	–
القاعدة	السراميك	3220	419	31	–
انصاف النواقل	Bi_2Te_3	7740	200	K	S

من جهة أخرى، تمّ حساب المقاومات الحرارية بين العقد في النموذج الرياضي (الجدول (4)) كالآتي: تُعطى المقاومة الحرارية المكافئة الممثّلة لوحدة بلتييه (الوحدة الكهروحرارية) التبريدية، بالمعادلة التالية:

$$R_p = R_{Alumina} + \frac{R_{Par}}{n} \quad (8)$$

حيث: $R_{Alumina}$ المقاومة الحرارية للصفيحة السيراميكية مقاسةً بالأوم ، R_{par} المقاومة الحرارية للزوج الكهروحراري مقاسة بالأوم ، n عدد الأزواج الكهروحرارية. وتُعطى المقاومة الحرارية للمبادلات الحرارية على الجهة الباردة والساخنة لوحدة بلتييه التبريدية بالمعادلة:

$$R_{df,dc} = \Delta T/Q_c \quad (9)$$

حيث: Q_c, ΔT الفرق الحراري بين طرفي المبادلات الحرارية لوحدة بلتييه وقيمة الحرارة الممتصة على الجهة الباردة أو المطروحة على الجهة الساخنة مقدرة بالواط، على الترتيب. بينما تُعطى قيمة المقاومة الحرارية لسطوح التلامس بين وحدة بلتييه والمبادلات الحرارية [8] (R_c = 0.03[K/W]). بالمثل، تُحسب بقية المقاومات الحرارية الخاصة بجدران العزل للغرف التبريدية للمبرّد المنزلي الهجين وهي (R_{rte}، R_{cong} ، R_{te} ، R_{ref} ، R_{tec}) وفقاً لآليّة الانتقال الحراري السائدة إما بالتوصيل أو بالحمل بالمعادلة التالية:

الجدول (4) المقاومات الحرارية للمبرّد المنزلي الهجين المدروس

رمز المقاومة	اسم المقاومة (دلالة الرمز)	القيمة
R_{dc}	المقاومة الحرارية للمبادل الحراري على الجهة الساخنة	0.22[^{0}C/W]
R_c	المقاومة الحرارية لسطوح التلامس بين وحدة بلتييه والمبادلات الحرارية	0.03[^{0}C/W]
R_p	المقاومة الحرارية لوحدة بلتييه التبريدية	0.7[^{0}C/W]
R_t	المقاومة الحرارية لمسامير الربط(d = 5 mm)	9.14[^{0}C/ W]
R_{ais}	المقاومة الحرارية لجدار الفاصل بين الجهة الباردة والساخنة للمبادل الحرارية	523.4[^{0}C/W]
R_{he}	المقاومة الحرارية للمادة الرابطة	0.43[^{0}C/W]
R_{df}	المقاومة الحرارية للمبادل الحراري على الجهة الباردة	0.22[^{0}C/W]
R_{cong}	المقاومة الحرارية للعازل لجدران غرفة التجميد	3.13[^{0}C/W]
R_{tec}	المقاومة الحرارية للجدار العازل بين غرفتي التجميد والكهروحرارية	14.96[^{0}C/W]
R_{ref}	المقاومة الحرارية للجدار العازل للمبرّد	1.09[^{0}C/W]
R_{te}	مقاومة الحرارية للجدار العازل بين الغرفة الكهروحرارية والوسط الخارجي	6.85[^{0}C/W]
R_{rte}	المقاومة الحرارية للجدار العازل بين غرفتي الكهروحرارية وغرفة الحفظ	12.56[^{0}C/W]

$$R_{wall} = 1/ U.A \quad (10)$$

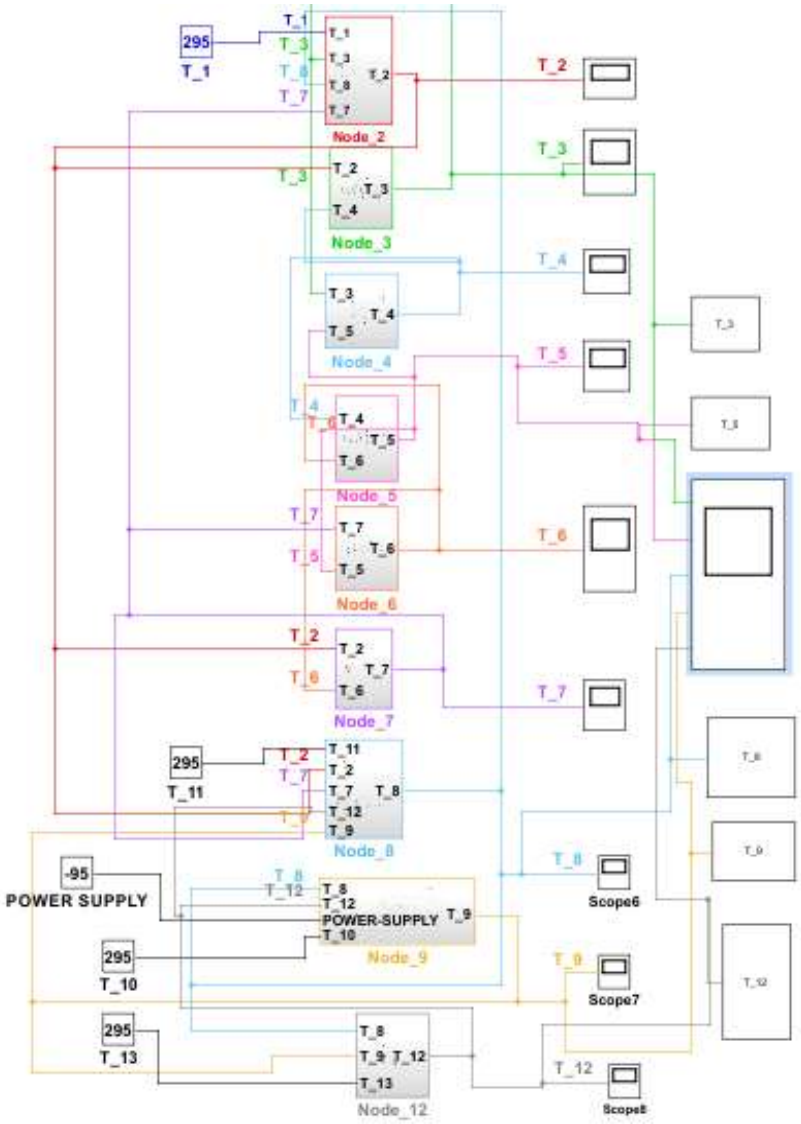
حيث: U معامل انتقال الحرارة الاجمالي ويُحسب من المعادلة التالية:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_{ext}}} \quad [\ W/\ m^2\ K\ ] \quad (11)$$

حيث: h_{ext}, h_{int} معامل الحمل الحراري الداخلي والخارجي لجدران المبرّد الهجين على الترتيب، ويُحسب وفق العلاقات التالية:

$$Re < Re_{x,c} \approx 5x10^5 \text{ ، } 0.6 \leq Pr \leq 50 \quad Nu_L = 0.664 Pr^{1/3} Re_L^{1/2} \quad (12)$$

5-2- تمثيل معادلات العقد في بيئة برنامج Simulink/MATLAB



الشكل (5) النموذج الرياضي للمبرّد المنزلي الهجين باستخدام برنامج Simulink/Matlab

مُثّل المبرّد المنزلي الهجين بنموذج رياضي على شكل مخطط صندوقي(الشكل5) في بيئة Simulink/Matlab، مُعبراً عن تمثيل 13 معادلة تفاضلية حاكمة لعمل هذا المبرّد المدروس، تقابل 13عقدة وفق الآليّة التالية: 3 عقد ممثّلة لوحدة بلتييه التبريدية (العقد 3، 4، 5). 6عقد تمثل أجزاء ومكونات المبرّد الانضغاطي، بقية العقد تُمثّل درجة حرارة الوسط الخارجي. تتّصف المعادلات الكهروحرارية للنموذج الرياضي أنَّها معادلات تفاضلية غير خطية من الدرجة الأولى، لأنها تتعلق بدرجة الحرارة. استخدمت طريقة التكامل لحلّ معادلات النموذج الرياضي للمبرّد الهجين. تمّ استنتاج المعادلات الرياضية، كالآتي:

- المعادلة الرياضية للعقدة الأولى: تُمثّل العقدة (1) متغيّر درجة حرارة الوسط المحيط بالمبرّد، اعُتبرت ثابتة خلال حلّ المعادلات، $T_{1,10,11,13} = 295$ [K]

- المعادلة الرياضية للعقدة الثانية:

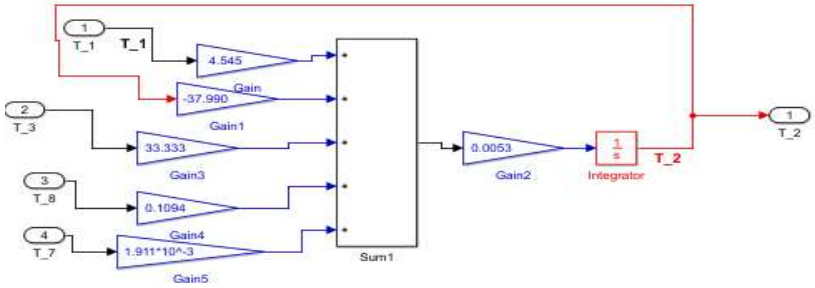
تُمثّل العقدة الثانية متغيّر المقاومة الحرارية للمبادل الحراري على الجهة الساخنة، وتُعطى المعادلة الرياضية لهذه العقدة بالشكل الآتي:

$$(\rho.V.Cp)_2.\frac{\partial T_2}{\partial t} = \sum Q_2 = Q_{1\to2} + Q_{3\to2} + Q_{7\to2} + Q_{8\to2} + Q_{2,gen.} \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{(\rho.V.Cp)_2}\left[+\frac{T_1}{R_{dc}} - \left(\frac{1}{R_{dc}} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{ais}} + \frac{1}{R_t}\right)T_2 + \frac{T_3}{R_c} + \frac{T_7}{R_{ais}} + \frac{T_8}{R_t} + 0\right] \quad (14)$$

حيث: Cp_2, ρ_2, V_2 الحجم والكثافة والحرارة النوعية عند ضغط ثابت للعقدة الثانية الممثّلة للمبادل الحراري للجهة الساخنة المصنوع من الالمنيوم، وتُحسب كالآتي:

$C_2 = \rho_2 . V_2 . C_{p2} = 2700 \times 7.74 \times 10^{-4} \times 900 = 188[J/K]$. تُمثّل العقدة الثانية في Simulink/Matlab كما موضّح في الشكل (6).



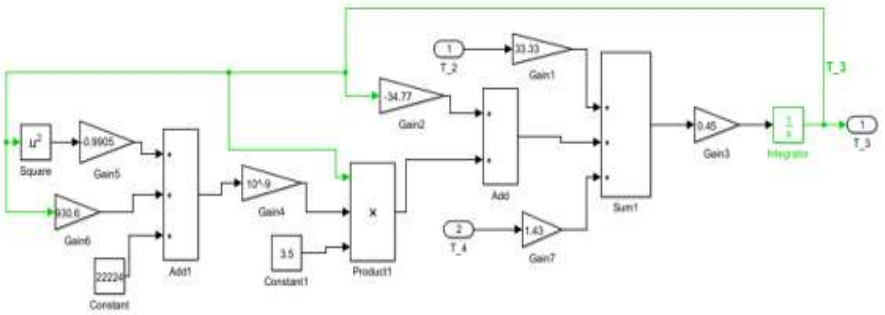
الشكل (6) تمثيل معادلة العقدة الثانية باستخدام برنامج Simulink/matlab

- المعادلة الرياضية للعقدة الثالثة: تُمثّل العقدة الثالثة متغيّر درجة حرارة الجهة الساخنة للقاعدة السيراميكية، وتُستنتج معادلتها الرياضية كالآتي:

$$(\rho.V.Cp)_3.\frac{\partial T_3}{\partial t} = \sum Q_3 = Q_{2\to3} + Q_{4\to3} + Q_{3,gen.} \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{1}{(\rho.V.Cp)_3}\left[+\frac{T_2}{R_c} - \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_p} + S3.I\right)T_3 + \frac{T_4}{R_p}\right] \quad (16)$$

حيث: Cp_3, ρ_3, V_3 الحجم والكثافة والحرارة النوعية عند ضغط ثابت للعقدة الثالثة الممثلة لدرجة حرارة الجهة الساخنة للقاعدة السيراميكية. والمصنوعة من مادة السراميك. من جهة ثانية، تُحسب كمية الحرارة المتولّدة في العقدة الثالثة كالآتي: $Q_{3,gen} = Q_{h,\ Peltier} = S_3.\ I.\ T_3.\ T_3 = T_{h,peltier}$. تُمثّل معادلة العقدة (3) في Simulink/matlab، كما هو موضّح بالشكل(7).



الشكل (7) تمثيل معادلة العقدة الثالثة باستخدام برنامج Simulink/matlab

بالمثل، يمكن استنتاج بقية المعادلات الرياضية الخاصة ببقية العقد، كالآتي:

$$\frac{\partial T_4}{\partial t} = \frac{1}{(\rho.V.Cp)_4}\left[+\frac{T_3}{R_p} - 2\left(\frac{1}{R_p}\right)T_4 + \frac{T_5}{R_p} + \right. \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_5}{\partial t} = \frac{1}{(\rho.V.Cp)_5}\left[\frac{T_4}{R_p} - \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_p} + S5.I\right)T_5 + \frac{T_6}{R_c}\right] \quad (18)$$

$$\frac{\partial T_6}{\partial t} = \frac{1}{(\rho.V.Cp)_6}\left[\frac{T_5}{R_c} - \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{he}}\right)T_6 + \frac{T_7}{R_{he}} + 0\right] \quad (19)$$

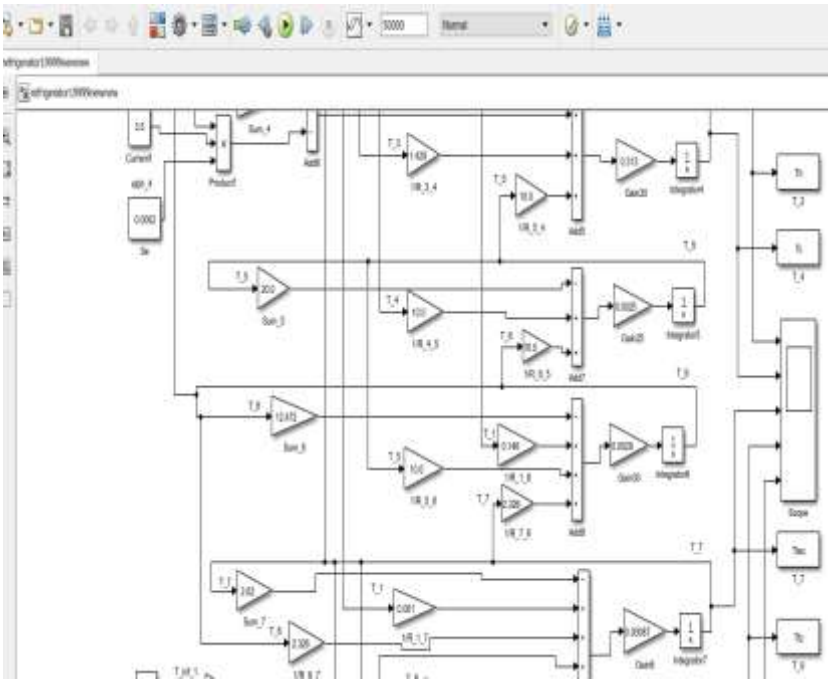
$$\frac{\partial T_7}{\partial t} = \frac{1}{(\rho.V.Cp)_7}\left[\frac{T_2}{R_{ais}} + \frac{T_6}{R_{he}} - \left(\frac{1}{R_{ais}} + \frac{1}{R_{he}} + \frac{1}{R_{df}}\right)T_7 + \frac{T_8}{R_{df}} + 0\right] \quad (20)$$

$$\frac{\partial T_8}{\partial t} = \frac{1}{(\rho.V.Cp)_8}\left[\frac{T_2}{R_t} + \frac{T_7}{R_{df}} - \left(\frac{1}{R_t} + \frac{1}{R_{df}} + \frac{1}{R_{tec}} + \frac{1}{R_{te}} + \frac{1}{R_{rte}}\right)T_8 + \frac{T_9}{R_{tec}} + \frac{T_{11}}{R_{te}} + \frac{T_{12}}{R_{rte}} + 0\right] \quad (21)$$

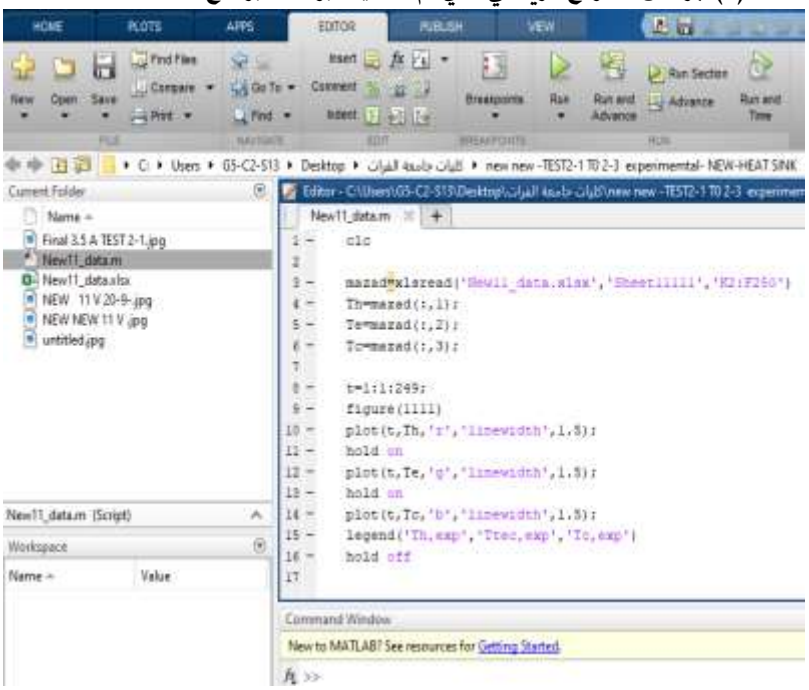
$$\frac{\partial T_9}{\partial t} = \frac{1}{(\rho.V.Cp)_9}\left[\frac{T_8}{R_{tec}} - \left(\frac{1}{R_{tec}} + \frac{1}{R_{cong}} + \frac{1}{R_{fz-ff}}\right)T_9 + \frac{T_{10}}{R_{cong}} + \frac{T_{12}}{R_{fz-ff}} + Q9,gen\right] \quad (22)$$

$$\frac{\partial T_{12}}{\partial t} = \frac{1}{(\rho.V.Cp)_{12}}\left[\frac{T_8}{R_{tec}} + \frac{T_9}{R_{fz-ff}} - \left(\frac{1}{R_{rte}} + \frac{1}{R_{ref}} + \frac{1}{R_{fz-ff}}\right)T_{12} + \frac{T_{13}}{R_{ref}} + Q12,gen\right] \quad (23)$$

مُدخلات النموذج الرياضي تتضمّن الخصائص الهندسيّة (الأبعاد) و الحراريّة و الكهربائيّة وقيمة جهد التغذية لوحدة بلتييه التبريدية والمبرّد الانضغاطي، قيمة المقاومات الحراريّة للمبادلات الحرارية على الجهة الباردة والساخنة لوحدة بلتييه. بينما مخرجات النموذج الرياضي، تشمل: قيم درجة حرارة العقد الكلية المعبرّة عن المبرّد المنزلي الهجين، قيم معامل أداء المبرّد الكهروحراري والمبرّد الهجين. يبين الشكل (8) جزء من النموذج الرياضي الممثّل للمبرّد المنزلي الهجين بكافة مكوناته الأساسية وحُجره التبريدية الثلاث، والذي تم تصميمه بواسطة برنامج Simulink/matlab، بالاستفادة من عناصر مكتبة Simulink. علماً أنّ النموذج الرياضي التفصيلي الممثّل للمبرّد الهجين موضّح في الشكل (5). كما يبين الشكل (9) الكود البرمجي المُستخدم لإظهار النتائج ورسم المخططات البيانية. حيث يتمُّ أولا ادخال البيانات أي نتائج القياسات التجريبية والعددية إلى ملف أكسل وتنظيمها بالشكل المناسب ومن ثمّ يتم تصديرها إلى برنامج Matlab من خلال كود برمجي لاستيراد البيانات من ملف Excel كما هو موّضح بالشكل (10)، وليتم اظهار ورسم المخططات البيانية المطلوبة بواسطة برنامج الماتلاب. يتضمّن الكود المكتوب - الشكل (10)- الخطوات الرئيسية المستخدمة وتختلف حسب عدد المتغيرات المدروسة (في هذه الحالة الموضحّة لدنيا ثلاث متغيرات فقط لدرجة الحرارة، وهي T_{ter} ,T_h, T_c) وعدد القراءات 249 قراءة لدرجة الحرارة للمتغيرات الثلاث حيث تمّ إدخالها إلى ملف إكسل بإسم (sheet11111):



الشكل (8) جزء من النموذج الرياضي الذي تم تصميمه بواسطة برنامج Simulink/matlab



الشكل (9) الكود البرمجي المستخدم لإظهار النتائج ورسم المخططات البيانية

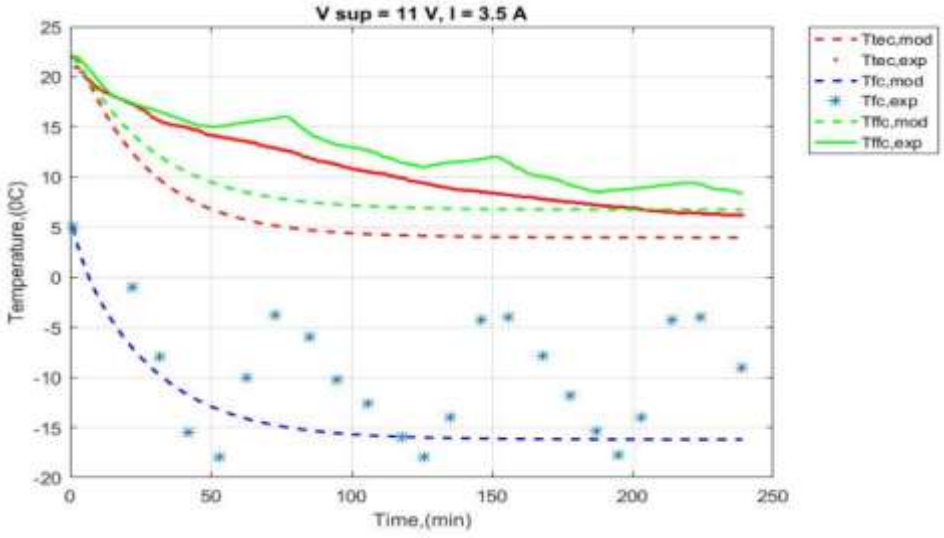
1-clc
2-mazad = xlsread('New11_data.xlsx',' sheet 11111','K2: F250')
3-
4- Th = mazad (:, 1);
5-Te =mazad (:, 2);
6-Tc = mazad (:, 3);
7-
8- t = 1:1:249;
9-figure(1111)
10- plot(t,Th,'r','linewidth',1.5);
11- hold on

```
12- plot(t,Te,'g', 'linewidth',1.5);
13-hold on
14-plot(t,Tc,'b', 'linewidth',1.5 ) ;
15-legend ('Temp.Tter','Temp.Th','Temp.Tc')
16- hold off
```

الشكل (10) التعليمات الرئيسية المستخدمة الكود البرمجي المستخدم لرسم المخططات البيانية-حالة 3 متغيرات.

5-3 - التحقق من صحة عمل النموذج الرياضي

بهدف التحقق من صحة عمل النموذج الرياضي الممثّل للمبرّد المنزلي الهجين. تمّ إجراء مقارنة النتائج العددية المتنبّأ بها من حل النموذج مع القياسات التجريبية للغرف التبريدية للمبرّد الهجين، أظهرت نتائج المقارنة تقارباً جيداً بين نتائج كلا الطريقتين عند بلوغ الحالة المستقرة لدرجة الحرارة للغرف التبريديّة الثلاث للمبرّد (غرفة التجميد، غرفة التبريد الكهروحراري، وغرفة الحفظ)، وبمعّدل فرق لا يتجاوز 10%. يُظهر الشكل (11) منحنيات درجات الحرارة التجريبية والعددية للغرف التبريدية الثلاث للمبرّد الهجين في الحالة المستقرة من درجة الحرارة. نُلاحظ أنّ منحنيات درجة الحرارة التجريبية و العددية للغرفة الكهروحرارية ($T_{tec,exp}$)،($T_{tec,mod}$) تبلغ القيمة [^{0}C]4.0، [^{0}C] 6.2 على الترتيب، عند بلوغ الحالة المستقرة وبزمن تبريدي حوالي 210 دقيقة مع تذبذب صغير جداً في درجة الحرارة إذا ما قُورن بقيمته في غرفتي التجميد والحفظ . وهي خاصية هامة للتبريد الكهروحراري. وكما يُلاحظ أنّ درجة الحرارة التجريبية لغرفة التجميد($T_{fc,exp}$) تتراوح بين [^{0}C] 3.5- و [^{0}C] 18.5- وذلك عند بلوغ الحالة المستقرة وبزمن تبريدي حوالي 55 دقيقة، مع تذبذب بدرجة الحرارة مساوي [^{0}C] 9± في غرفة التجميد وقيمة [^{0}C] 5± في غرفة الحفظ ($T_{ffc,exp}$). سبب التذبذب يعود لطبيعة عمل الضاغط الذي يعمل ويتوقف لفترات عديدة. علماً أنّه تمّ أخذ القيمة المتوسطة لدرجة الحرارة العددية لغرفة التجميد عند حلّ النموذج الرياضي بسبب صعوبة محاكاة عمل الضاغط رياضياً.



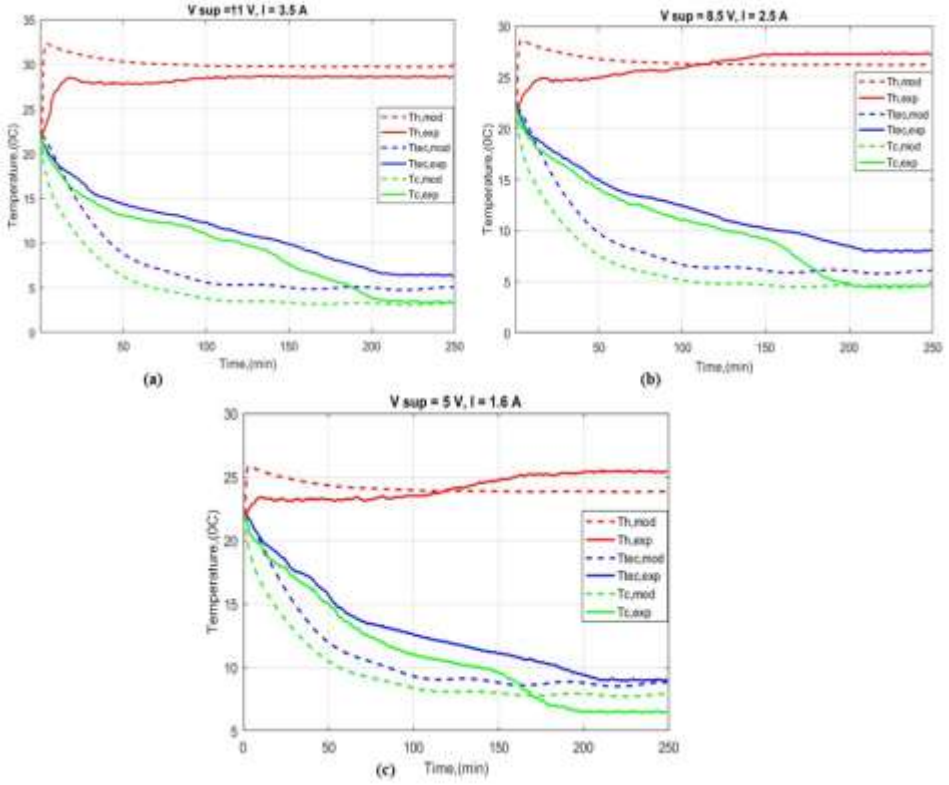
الشكل (11). تمثيل منحنيات درجة حرارة الغرف التبريدية الثلاث للمبرّد الهجين.

6 - مناقشة النتائج Results discussion

تمَّ دراسة تأثير عدة عوامل على عمل المبرّد المنزلي الهجين، لمعرفة مدى تأثيرها على سلوكه الحراري والكهربائي، وهي:

6 -1- تأثير تغير جهد التغذية للمبرّد الكهروحراري

يُظهر الشكل (12) منحنيات درجات الحرارة الجهة الباردة والساخنة والغرفة الكهروحرارية في حالة تغير جهد التغذية الكهربائية لوحدة بلتييه التبريدية من 5 ، 8.5 ، 11 فولت. مُثّلت منحنيات القيم التجريبية بالخط المستمر و منحنيات القيم العددية بالخط المتقطع. تشير النتائج العددية إلى ارتفاع درجة حرارة الجهة الباردة لوحدة بلتييه التبريدية من [^{0}C] 1.83 إلى [^{0}C] 5.26 إلى [^{0}C] 7.03 مقارنة بالقيم التجريبية [^{0}C] 3.2 ، [^{0}C] 4.5 ، [^{0}C] 6.50 عند تناقص جهد التغذية من 11 إلى 8.5 إلى 5 فولت، على الترتيب. بالنسبة لدرجة حرارة الغرفة الكهروحرارية، تشير النتائج العددية إلى ارتفاع درجة حرارة الجهة الباردة لوحدة بلتييه التبريدية من [^{0}C] 4 إلى [^{0}C] 6.68 إلى [^{0}C] 8.08 مقارنة بالقيم التجريبية [^{0}C] 6.2 ، [^{0}C] 8.0 ، [^{0}C] 9.0 عند تناقص جهد التغذية من 11 إلى 8.5 إلى 5 فولت، على الترتيب. نستطيع ملاحظة أنّ الفارق الأكبر بين قيم القياسات التجريبية والعددية لا يتجاوز [^{0}C] 2، وهي نتيجة مقبولة إذا ما أخذنا بعين الاعتبار أخطاء قياسات التجربة وأجهزة القياس. من جهة أخرى، يمكننا حساب معامل أداء المبرّد الكهروحراري العددي والتجريبي $COP_{ter,mod}$ ، $COP_{ter,exp}$ اعتماداً على قيم درجات الحرارة للجهة الباردة والساخنة لوحدة بلتييه التبريدية. تشير النتائج إلى أَنّ القيمة العددية لمعامل أداء المبرّد الكهروحراري ازدادت من 0.141 إلى 0.240 إلى 0.378 مقارنة بالقيم التجريبية المماثلة 0.16، 0.283 ، 0.420 وذلك عند تناقص قيم جهد تغذية للمبرّد الكهروحراري 11 و8.5 و5 فولت ، على الترتيب، كما هو مُوَضَّح في الجدول (5) . الذي يُظهر أَنَّ الفارق الأكبر بين قيم معامل أداء المبرّد الكهروحراري التجريبية والعددية لا تتجاوز 4%.



الشكل (12). منحنيات درجة الحرارة التجريبية والعددية T_h, T_c, T_{tec} في حالة تغير جهد التغذية

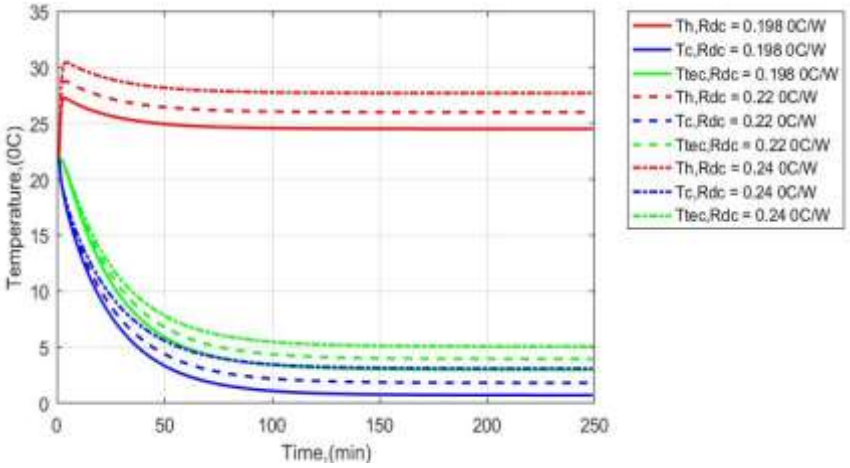
الجدول (5). مقارنة قيم معامل الأداء التجريبي والعددي للمبرّد الكهروحراري.

قيمة جهد التغذية	COP_{ter}		
Volt	$COP_{ter, mod}$	$COP_{ter, exp}$	ΔCOP_{ter}

11[V]	0.141	0.160	0.019
8.5[V]	0.240	0.283	0.043
5[V]	0.378	0.420	0.042

6-2-تأثير تغير المقاومة الحرارية للمبادل الحراري على الجهة الساخنة للمبرّد الكهروحراري

يُبَيّن الشكل (13) منحنيات درجات الحرارة الجهة الباردة والساخنة والغرفة الكهروحرارية في حالة تغيّر قيمة المقاومة الحرارية للمبادل الحراري للطرف الساخن لوحدة بلتييه التبريدية وفقاً الحالات المدروسة التالية R_{dc} = (0.22 [^{0}C/W] ، (R_{dc} 10% +) ، (R_{dc} 10% -)) وعند جهد تغذية للمبرّد الكهروحراري بقيمة 11 فولت. نُلاحظ في الشكل (13) ، أنّه عندما تزداد قيمة المقاومة الحرارية للمبادل الحراري على الجهة الساخنة بمقدار 10 % (R_{dc} = 0.24 [^{0}C/W]) يؤدي ذلك إلى ارتفاع درجة حرارة الجهة الساخنة لوحدة بلتييه التبريدية من [^{0}C] 26.0 إلى [^{0}C] 27.7 ، و ارتفاع درجة حرارة الجهة الباردة من [**^{0}C**] 1.83 إلى[^{0}C] 3.11 ، وارتفاع درجة حرارة الغرفة الكهروحرارية من[^{0}C] 4.0 الى [^{0}C] 5.08 ، بمعّدل زيادة 6.54 % و 69.95% و 27% على الترتيب. يمكن تفسير ذلك أنّ ازدياد قيمة المقاومة الحرارية للمبادل الحراري على الجهة الساخنة يؤدي لانخفاض معدلات النبذ الحراري عبر وحدة بلتييه التبريدية للوسط الخارجي. كما يُظهر الشكل (13) ، أنّه عندما تنقص المقاومة الحرارية 10% (R_{dc} = 0.198 [^{0}C/W] يُؤدي ذلك إلى انخفاض درجة حرارة الجهة الساخنة لوحدة بلتييه التبريدية من [^{0}C] 26.0 إلى [^{0}C] 24.50، وانخفاض درجة حرارة الجهة الباردة من [^{0}C] 1.83 إلى [^{0}C] 0.73 ، وانخفاض درجة حرارة الغرفة الكهروحراريّة من [^{0}C] 4.0 الى [^{0}C] 3.0 ، بمعدل تناقص 90.00 % و 60.11% و 25.00% على الترتيب. يكمن السبب في أنّ تناقص قيمة المقاومة الحرارية للمبادل الحراري للجهة الساخنة يزيد من فعالية النبذ الحراري عبر وحدة بلتييه التبريدية إلى الوسط الخارجي. بمعنى نبذ حراري بمعدّل أعلى.

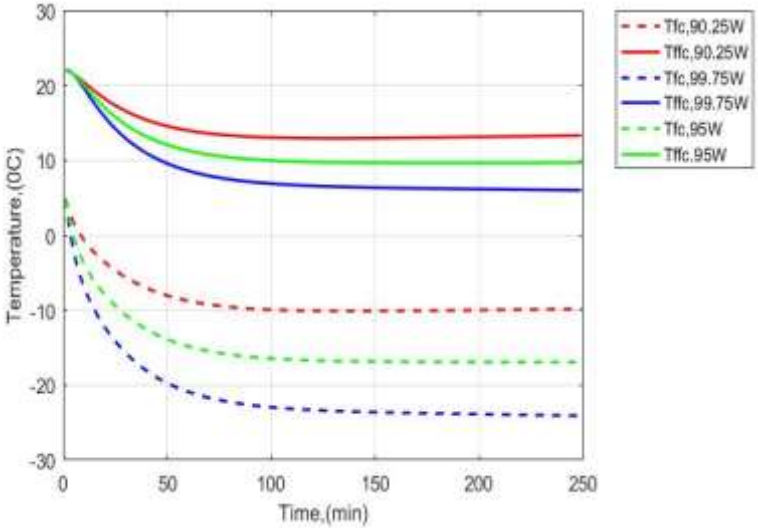


الشكل (13). منحنيات T_h, T_c, T_{tec} بحالة تغير المقاومة الحرارية للمبادل الحراري للجهة الساخنة للمبرّد الكهروحراري

6 - 3- تأثير تغير قيمة جهد التغذية للمبرّد المنزلي الهجين

يُظهر الشكل (14) منحنيات درجة الحرارة غرفة التجميد غرفة الحفظ للمبرّد المنزلي الهجين في حالة تغيّر قيمة التغذية الكهربائية عند قيم [95 W] ، [90.25W (-5 %)]، [99.75 W (+5%)] . تُشير النتائج العددية

أنّه في حالة ازدياد قيمة التغذية بنسبة 5 %، يقود ذلك إلى انخفاض درجة حرارة غرفة التجميد وغرفة الحفظ من [^{0}C] 16.5- إلى[^{0}C] 23.98 - ومن [^{0}C] 6.67 إلى [^{0}C] 2.33 ، بنسبة تغير 47.12% ، 65.06% على الترتيب. يُفسر ذلك أنّ ازدياد قيمة التغذية الكهربائية للمبرّد المنزلي الهجين، يقود إلى ازدياد معّدلات امتصاص الحرارة من داخل الغرف التجميد والحفظ بسبب ازدياد التأثير التبريدي للمبرّد الانضغاطي الاساسي. من جهة ثانية، تشير النتائج الحاصلة أنّه في حالة نقصان قيمة التغذية الكهربائية بنسبة 5 % يقود ذلك إلى ارتفاع درجة حرارة غرفة التجميد وغرفة الحفظ من[^{0}C] 16.5- إلى[^{0}C] 8.6 - ومن[^{0}C] 6.67 إلى [^{0}C] 9.00 ، بنسبة تغير 47.23% ، 64.94% على الترتيب. نلاحظ أنّ تقصان قيمة التغذية الكهربائية للمبرّد المنزلي الهجين، أدى إلى ارتفاع درجات الحرارة داخل الغرف التجميد والحفظ بسبب انخفاض معدّلات امتصاص الحرارة من داخلها لانخفاض التأثير التبريدي للمبرّد الانضغاطي الأساسي.



الشكل (14) درجة حرارة غرفتي التجميد و الحفظ T_{ffc}, T_{fc} في حالة تغير التغذية الكهربائية للمبرّد الانضغاطي.

7- الخلاصة: يمكن أن نجمل النتائج الحاصلة بالنقاط التالية:

1 ـ صُممّ النموذج الرياضي باستخدام Simulink/Matlab ليحاكي الاداء الحراري والكهربائي للمبرّد المنزلي الهجين، بالاستفادة من قوانين التشابه الحراري الكهربائي ومعادلات التأثيرات الكهروحرارية وانتقال الحرارة.

2 ـ أظهرت مقارنة النتائج التجريبية والعددية المتنبّأ بها من خلال حل النموذج الرياضي للمبرّد المنزلي الهجين، تقارباً كبيرا في النتائج و بفارق أقل من 10%.

3 ـ أظهرت النتائج العددية تناقص معامل أداء المبرّد الكهروحراري في حالة ازدياد جهد التغذية أو ازدياد المقاومة الحراريّة للمبادل الحراري على الجهة الساخنة.

4 - تشير النتائج إلى انخفاض درجة حرارة غرفتي التجميد والحفظ في حالة زيادة التغذية الكهربائية للمبرّد الانضغاطي.

References:

1. KO, J., Thu, K., and MIYAZAKI, T., 2020- **Investigation of a cascaded CO_2 refrigeration system using phase change materials for energy-saving potentials.** *Applied Thermal Engineering*, 182,116104.
2. VIAN, G., and ASTRAIN, D., 2009- **Development of a hybrid refrigerator combining thermoelectric and vapor compression technologies**. *Applied Thermal Engineering*, 29 (15), 3319–3327.
3. MUCHLIS, A., UTOMO, K.Y., SUPRIYONO, and MULYANTO, T., 2023- **Performance analysis of the thermoelectric TEC-12706-based cooling system in cooler box design.** *International Journal Science and Technology*,2(1), 65-72.
4. LAGHZAL, F., MBAIRI, S. I., TIHANE, A., ALSAAD, A., and, NARJIS, A., 2024- **Comprehensive overview on thermoelectricity- Materials, applications and recent advances.** *Materials Science and Engineering B*,307-117512.
5. FRANCIS, O., LEKWUWA, C. J., and JOHN, I. H., 2013-**Performance evaluation of a thermoelectric refrigerator**. *International Journal of Engineering and Innovative Technology* 2(7), 18-24.
6. ASTRAIN, VIAN, J.G., and ALBIZUA, J., 2005-**Computational model for refrigerators based on Peltier effect application**. *Applied Thermal Engineering* 25(17-18), 3149-3162.
7. ÇAĞLAR ,A .,2018 - **optimization of operational conditions for a thermoelectric refrigerator and its performance analysis at optimum conditions**. *International Journal of Refrigeration* , 96. 70 - 77
8. BANSAL, K., and MARTIN, A., 2000- **Comparative study of vapour compression, thermoelectric and absorption refrigerators**, *International Journal of Energy Research,* (24) 2 ,93-107.
9. AZZOUZ , K ., LEDUCQ , D., GUILPART, J .,GOBIN , D., 2005 - **Improving the energy officiency of a vapor - compression system using aphase change material ; proceedings 2 nd Conference on phase change material and slurry ,** *Yverdon les Bains , Switzerland* .
10. .BAAKEEM , S ., ORFI , J ., ALABDULKAREM , A ., 2018 - **optimization of a multistage vapor - compression refrigeration system for various refrigerants ,** *Applied thermal Engineering , 136 . p . 84 - 96*
11. MULARY, V., KULKARNI, A., AGONAFER, D., SCHMIDT, R., 2005- **Effect of the location and the properties of thermostatic expansion valve sensor bulb on the stability of a refrigeration system**, *Journal Heat Transfer,* (127), 85-94.
12. SOYLEMEZ, E., ALPMAN, E., ONAT, A., and HARTOMACIOGLU, S., 2022- **CFD analysis for predicting cooling time of a domestic refrigerator with thermoelectric cooling system.** *International Journal of Refrigeration,* (123) 138-149.
13. ASTRAIN, D., MARTINZE, A., and RODRIGUEZ, A., 2012-**Improvement of a thermoelectric and vapour compression hybrid refrigerator.** *Applied thermal engineering,* 39, 140-150.
14. MARTINEZ, A., ASTRIAN, D., ODRIGUEZ, A., and ARANGUREN, P., 2016- **Advanced computational model for Peltier effect based refrigerators**. *Applied Thermal Engineering,* (95), 339–347.

Modeling Performance of a Vapor Compression-Thermoelectric Domestic Hybrid Refrigerator

Yasser Abdulrazak Alghanima
Phd in Power Mechanical Engineering
Lecturer, Dept. of Desigen Mechanical & Product, Faculty of Mechanical& Electrical Engineering, University of Alfurat

Abstract

The work presents a numerical and experimental study of the thermal and electrical behavior of the hybrid domestic refrigerator that combines thermoelectric and vapor compression technologies. The hybrid refrigerator has three compartments, one of them is cooled by thermoelectric cooling system. The prototype experimental is designed and tested under local conditions. On the other hand, a mathematical model created by using Simulink/matlab, to simulate performance of the hybrid refrigerator and then, study effect of varying a several variables on the thermal and electrical performance of the hybrid refrigerator, as supplied voltage and the thermal resistance of heat sink -hot side of thermoelectric refrigerator, in addition, to vary supplied voltage of vapor compression refrigerator. A comparison study between the numerical and experimental results was performed. it showed a good agreement. However, the predicted results by the mathematical model showed decreasing the coefficient of performance of the thermoelectric refrigerator with increase the supplied voltage or thermal resistance of hot side of thermoelectric refrigerator. Also, the results showed the increase the supplied voltage to vapor compression leads to decrease interior temperature of the freezer and saving compartments of the hybrid refrigerator.

Keywords: Modelling, Performance, Household hybrid, Compression, Peltier.