

Received	2025/11/19	تم استلام الورقة العلمية في
Accepted	2025/12/05	تم قبول الورقة العلمية في
Published	2025/12/06	تم نشر الورقة العلمية في

تحليل تجريبي مقارنة للأداء الديناميكي الحراري لنظام تبريد الثلجة عند الحمل المتوسط وضعف الحمل المتوسط وتأثيره على استهلاك الطاقة والكفاءة

¹ عادل محمد عبدالحفيظ كريم، ² مختار عبد الله علي الرياحي، ³ محسن أبوزيد يونس محرز

^{1 & 2} المعهد العالي لتقنيات التبريد والتكييف، سوكنه، ليبيا

³ المعهد العالي للهندسة التقنية، زوارة، ليبيا

Email: am_kraim@yahoo.com

الملخص

تقدم هذه الدراسة التجريبية تحليلاً مقارنة للأداء الديناميكي الحراري للثلاجات عند استخدام حمل تبريد متوسط الحجم بالنسبة لحجم الثلجة ومضاعفة هذا الحمل وذلك لاكتشاف الحمل المناسب للثلجة. وقد اختيرت درجة حرارة خط السحب ودرجة حرارة خط الطرد، والطاقة المستهلكة من قبل الضاغط، ومعامل الأداء COP، كدوال موضوعية. تشمل معلمات التشغيل التي تمت دراستها في هذه الورقة ودرجة حرارة التسخين الفائقة، ودرجة حرارة التبريد الدوني بالمبادل الحراري، ودرجة حرارة التبخر، في دورة التبريد. الثلجات هي ليست مجرد أداة لتبريد الطعام، بل هي وسيلة فعالة للحفاظ على صحتنا، وتوفير أموالنا، والمساهمة في جهود تقليل الهدر الغذائي العالمي، وما لذلك من أثر إيجابية على الأمن الغذائي واستدامة الموارد. ننصح بملء الثلجة بنسبة لا تزيد عن ثلاثة أرباع سعتها لتحقيق تبريد مثالي. أي يمكن القول بأن سعة الثلجة المطلوبة بشكل يومي من الأفضل ألا تزيد عن 50 إلى 70 بالمئة من السعة الكلية لها. أي يمكن القول بأن السعة الكلية للثلجة يمكن استعمالها عند الضرورة فقط وليس بشكل يومي؛ للمحافظة على كفاءة وعمر الثلجة وتقليل إستهلاك الطاقة. للحصول على أفضل أداء وكفاءة من الثلجة، يجب الحفاظ على مستوى تحميل متوسط يسمح بتدوير جيد للهواء البارد دون ترك مساحات فارغة كبيرة تهدر الطاقة. نتج عن هذا البحث التجريبي - حيث أن الدرجات الحرارية التي سجلت عن الدوال الموضوعية نتج عنها منحنيات بيانية تبين العلاقة بين

إنخفاض الحرارة مع مرور الزمن لحمل التبريد الافتراضي الأول 7 لتر، ومضاعفة هذا الحمل التبريدي إلى 14 لتر وجد أن معامل انتقال الحرارة يختلف بنسب متفاوتة عند فترات زمنية مساوية إلى 10 دقائق. يتبين من المنحنيات في البداية عند 25 درجة مئوية فمثلا عند التجربة الأولى باستعمال 7 لتر وبعد 10 دقائق تم إنخفضت درجة الحرارة إلى 10 درجة مئوية أي بمعدل إنخفاض بالحرارة 15 درجة مئوية في عشرة دقائق مما يبين إرتفاع في معدل إنتقال الحرارة، أما بعد مرور أكثر من نصف ساعة يتناقص معدل إنتقال الحرارة ليصل إلى درجة مئوية واحدة لكل عشرة دقائق. كما لاحظنا بالتجربة الثانية أن متوسط انتقال الحرارة لحمل التبريد يكون أقل من التجربة الأولى أي من 25 إلى 12 درجة مئوية خلال العشرة دقائق الأولى أي بمعدل إنخفاض بالحرارة 13 درجة مئوية في عشرة دقائق. مما سبق يتبين أهمية معرفة الفرق بين إستعمال حمل تبريد متوسط ومقارنته بضعف حجمه وما يترتب على ذلك من زيادة في إستهلاك للطاقة والمحافظة على جودة المادة المخزنة.

الكلمات المفتاحية: حمل التبريد، معامل الاداء، استهلاك الطاقة، درجة الحرارة المثالية.

Comparative Experimental Analysis of the Thermodynamic Performance of a Refrigerated Cooling System at Medium and Double Loads on Energy Consumption and Efficiency

¹Adel Mohamed A Kraim, ²Makhtar Alreahe, ³Muhsan Mahraz,

^{1&2}Higher institute of Refrigeration & Air Condition Technology, Sokna
Libya, ³College of Engineering Technology, Zuwara, Libya
Email: am_kraim@yahoo.com

Abstract

This experimental study presents a comparative analysis of the thermodynamic performance of refrigerators using an average cooling load relative to the refrigerator size and doubling this load to determine the appropriate refrigerator load. The suction line temperature, the discharge line temperature, the compressor power consumption, and the coefficient of performance (COP) were chosen as objective functions. The operating parameters studied in this paper include the superheating temperature, the subcooling

temperature of the heat exchanger, and the evaporation temperature in the refrigeration cycle. Refrigerators are not just a device for cooling food; they are an effective means of preserving our health, saving us money, and contributing to efforts to reduce global food waste, all of which have positive impacts on food security and resource sustainability. We recommend filling the refrigerator to three-quarters of its capacity to achieve optimal cooling. In other words, the daily required capacity of the refrigerator should ideally not exceed 50 - 70 % of its total capacity. This means that the total capacity of the refrigerator should be used only when necessary, rather than on a daily basis, to maintain its efficiency and lifespan, and reduce energy consumption. To achieve optimal performance and efficiency from your refrigerator, you must maintain a medium load level that allows for good circulation of cold air without leaving large empty spaces that waste energy. When this experimental research was evaluated, the recorded temperatures, which were based on objective functions, were used to generate graphical curves illustrating the relationship between temperature drop over time for a hypothetical initial cooling load of 7 liters and its doubling to 14 liters. The results showed that the heat transfer coefficient varied at different rates over successive 10-minute intervals. The curves show that, initially at 25°C, for example, in the first experiment using 7 liters, after 10 minutes the temperature dropped to 10°C, i.e., a temperature drop of 15°C in 10 minutes, indicating an increase in the heat transfer rate. However, after more than half an hour, the heat transfer rate decreased to 1°C per 10 minutes. It was also observed in the second experiment that the average heat transfer for the cooling load was lower than in the first experiment, from 25 to 12°C during the first 10 minutes, i.e., a temperature drops of 13°C in 10 minutes. From the above, it is clear that it is important to know the difference between using an average cooling load and comparing it to double its size, and the resulting increase in energy consumption and maintaining the quality of the stored material.

Keywords: Cooling load, coefficient of performance, energy consumption, optimum temperature.

1. مقدمة

حمل التبريد هو كمية الحرارة التي يجب على نظام التبريد في الثلاجة إزالتها من داخلها للحفاظ على درجة الحرارة المنخفضة المطلوبة. هذا الحمل ليس ثابتاً، بل يتغير باستمرار بناءً على عدة عوامل، أهمها ما يتم وضعه داخل الثلاجة وطريقة استخدامها، أي هو الجهد الذي يجب أن تبذله الثلاجة للحفاظ على برودة الأشياء داخلها. الحرارة الكامنة في المواد حيث كلما زادت كمية المواد الغذائية داخل الثلاجة، زادت كمية الحرارة الإجمالية التي يجب على الثلاجة سحبها لتبريد هذه المواد إلى درجة الحرارة المطلوبة. فالأطعمة الجديدة التي توضع في الثلاجة تكون عادةً في درجة حرارة الغرفة، وهي أعلى بكثير من درجة حرارة الثلاجة الداخلية. يحدد مقدار الطاقة التي تستخدمها الثلاجة عن طريق ضرب الجهد في الأمبير. لكن الثلاجات تعمل بشكل مستمر طوال اليوم. لذلك، يجب تقسيم القوة الكهربائية للثلاجة بنسبة الثلث 3/1 لحساب ساعات التشغيل والإيقاف اليومي كمتوسط استخدام الطاقة. مع تزايد الطلب العالمي على الطاقة وتنامي المخاوف البيئية، أصبح تحسين استخدام الطاقة في الأنظمة الحرارية أمراً ضرورياً [1]. حظيت دراسة وتطوير أنظمة التبريد وتكييف الهواء المصغرة القائمة على ضغط البخار للتطبيقات صغيرة الحجم باهتمام واسع في السنوات الأخيرة نظراً لمزاياها مقارنةً بالتقنيات الأخرى المتاحة، سواءً النشطة أو السلبية [2]. ومن خلال اقتران نقل الحرارة والكتلة داخل الدورة أو إضافة مكونات فرعية، يتم التركيز بشكل كبير على تكوينات الدورة ذات كفاءة طاقة أعلى ونطاق تشغيل أوسع [3]. تقدم هذه الدراسة مراجعة شاملة لأحدث التقنيات والمواد المستخدمة في حلول التبريد المستدام للأنظمة الإلكترونية، مع التركيز على فعاليتها في التطبيقات الميكانيكية والفوائد البيئية المرتبطة بها. يهدف البحث بشكل رئيسي إلى تقييم الوضع الراهن والآفاق المستقبلية لتقنيات التبريد المستدام، مع إبراز دورها في مواجهة تحديات الإدارة الحرارية مع تقليل الآثار البيئية. [4] قدمت هذه الدراسة مراجعة شاملة لاستراتيجيات تحسين أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء في المباني التجارية والصناعية، مع التركيز على تعزيز كفاءة الطاقة وموثوقية النظام والاستدامة البيئية. تُعد أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء من أكبر مستهلكي الطاقة، مما يساهم بشكل كبير في تكاليف التشغيل في المباني الكبيرة. مع تزايد تكاليف الطاقة والضغوط التنظيمية والسعي نحو الاستدامة،

ظهرت التطورات التكنولوجية واستراتيجيات الإدارة لتحسين أداء أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء [5].

خلال السنوات القليلة الماضية، تطور دمج الطاقة الشمسية مع تكنولوجيا التبريد، مما وفر حلاً واعداً للتبريد المستدام. ومع ذلك، لا يزال هناك تحدٍ رئيسي، ألا وهو التقطع المتأصل في الطاقة الشمسية. فنظراً لتوزيعها الزمني غير المتساوي، يصعب ضمان التشغيل المستمر على مدار 24 ساعة عند الاعتماد على الطاقة الشمسية وحدها [6]. على الرغم من تركيز العديد من الدراسات على تصنيف أنظمة تبريد مراكز البيانات وتحسينها، إلا أن المراجعات المنهجية التي تستخدم أساليب القياس الجيولوجرافي نادرة نسبياً. تستخدم هذه المراجعة التحليل الجيولوجرافي لإستكشاف التصنيفات، وتحسينات التحكم، ومقاييس الطاقة لأنظمة تبريد مراكز البيانات، بهدف سدّ الفجوات البحثية [7]. في هذه الدراسة، استخدم نموذج الضاغط كدراسة حالة لتوضيح نهج جديد لدمج الاختبارات الميدانية وأعمال النمذجة. أجريت اختبارات ميدانية في مبنى مكاتب لجمع البيانات. للتعويض بمعدل تدفق الكتلة، تم التحقيق في ثلاثة نماذج تقليدية، بما في ذلك نموذج معامل 20، والنموذج القائم على الكفاءة، ونموذج معامل 20 القائم على الكفاءة، وثلاثة نماذج قائمة على التعلم الآلي بما في ذلك انحدار متجه الدعم، والشبكة العصبية، والغلبة العشوائية، ومقارنتها [8].

صناعة التبريد قطاع كثيف الاستهلاك للطاقة. تُعد زيادة كفاءة أنظمة التبريد الصناعية أمراً بالغ الأهمية لخفض تكاليف الإنتاج وتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. غالباً ما يكون تحسين أنظمة التبريد أمراً معقداً ويستغرق وقتاً طويلاً. وهنا تبرز أهمية تقنيات مثل البيانات الضخمة والذكاء الاصطناعي [9]. قد يكون قياس معدل تدفق الكتلة في أنظمة التبريد باستخدام عدادات التدفق مكلفاً، خاصةً مع مراعاة تكلفة المعدات نفسها وتكاليف التركيب والصيانة [10]. على مدى العقود القليلة الماضية، زاد إجمالي استهلاك الطاقة بينما ظلت موارد الطاقة محدودة. إدارة الطلب على الطاقة أمر بالغ الأهمية لهذا السبب. لحل هذه المشكلة، يتم تقديم التنبؤ باستهلاك طاقة المبردات المبردة بالماء باستخدام التعلم الآلي والتعلم العميق [11].

ظهرت نتائج المحاكاة التأثير الكبير للمتغيرات التي تم أخذها في الاعتبار في هذه الدراسة. على سبيل المثال، استهلكت الحالة الأكثر استهلاكاً للطاقة طاقة تزيد عن 3432 مرة

عن الحالة الأقل استهلاكًا. أحدث سلوك الشاغل فرقًا يصل إلى أكثر من 7 مرات في استهلاك الطاقة [12]. الطاقة المستخدمة لتبريد المساحات في المباني السكنية لها تأثير كبير على أداء الطاقة المنزلية. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير نموذج تنبؤ سهل الاستخدام وخالٍ من البنية التحتية ودقيق يعتمد على مجموعات بيانات المرافق واسعة النطاق من منازل متطوعين مجهولة الهوية تقع في ثلاث مناطق مناخية مختلفة في الولايات المتحدة، إلى جانب بيانات الطقس المقابلة ومعلومات البناء. والجدير بالذكر أنه تم تصميم العديد من المعلومات الجديدة المتعلقة بخصائص الطقس والبناء في إجراء النمذجة واختبارها لتكون مفيدة لتحسين أداء التنبؤ بالنموذج [13].

مقارنة سوائ التبريد الثنائية بالثلاثية، وُجد أن إضافة مُركَّب الغليان المتوسط R290 يُقلِّل الاستهلاك اليومي للطاقة. عندما تكون نسبة الكتلة لـ R601a/R1150 $0.70/0.30$ ، يكون أقل استهلاك يومي للطاقة عند درجة حرارة -70 درجة مئوية هو 9.06 كيلوواط/ساعة خلال 24 ساعة. أما عندما تكون نسبة الكتلة لـ R601a/R290/R1150 $0.70/0.10/0.20$ ، يكون الاستهلاك اليومي للطاقة 8.42 كيلوواط/ساعة خلال 24 ساعة. أي إن المكون الأول، وهو أقل بنسبة 7.06% من استهلاك R601a/R1150. هذا يُشير إلى أن الاختيار الدقيق لمكونات سائل التبريد وتحسين تركيبته يُمكن أن يؤدي إلى توفير كبير في الطاقة. وعلاوة على ذلك، لوحظ أيضًا أنه من بين هذه المكونات الثلاثة، فإن المكون منخفض الغليان R1150 له التأثير الأكثر أهمية على ضغوط النظام وقوة التشغيل، يليه R601a و R290 [14].

أظهرت النتائج تحقيق الأداء الحراري الأمثل للنظام، وانخفاض مدة إزالة الجليد واستهلاكه بنسبة 44.02% و 37.03% على التوالي، بالإضافة إلى إمكانية زيادة كفاءة إزالة الجليد وكفاءة الطاقة بنسبة 17.92% و 9.96% على التوالي، مقارنةً بنظام FCS التقليدي. [15] يوفر تأثير المرونة الحرارية مسارًا بديلًا للتبريد الفعال والصديق للبيئة. وتحديدًا، يُعدّ زيادة تردد التشغيل فعالًا في تعزيز قدرة التبريد للتطبيقات العملية. ومع ذلك، يواجه التطبيق الناجح للتبريد المرن الحراري عالي التردد تحديات تتعلق أساسًا بتعزيز نقل الحرارة ضمن حجم صغير [16].

منذ صيف عام 2022، عانى العالم أجمع من الظواهر الجوية غير الطبيعية المتمثلة في ارتفاع درجة الحرارة المحيطة. تُعدّ معدات التبريد، وخاصةً معدات التبريد المحمولة،

ضرورية للحماية الشخصية في البيئات ذات درجات الحرارة العالية، إلا أن أداء التبريد والتصغير كانا يمثلان تحديًا. طُوِّر مكيف هواء محمول يعتمد على جهاز تبريد أشباه الموصلات لتبريد جسم الإنسان. يبلغ الوزن الإجمالي للجهاز 450 جرامًا. يبلغ إجمالي استهلاك الطاقة للجهاز 82 واط، وتبلغ نسبة استهلاك الطاقة للوحة التبريد أشباه الموصلات 0.85 [17]. في هذه الدراسة، طُوِّرت مواد تغيير الطور المغلفة بالكبسولات الدقيقة (MPCMs) ذات خصائص حرارية ممتازة للتخزين البارد منخفض الحرارة. ظهرت مادة MPCM ثنائية النواة هذه محتوى حراريًا تخزينيًا أعلى (144.3 كيلوجول/كجم)، بزيادة قدرها 13.9% مقارنةً بالمادة أحادية النواة (1-ديكانول) [18]. بفضل تقنيات الاستعادة، يُمكن استعادة الحرارة المُهدرة الناتجة عن عمليات غير مُستخدمة لاستخدامات أخرى داخل المنشأة نفسها أو خارجها. وبالإضافة إلى الفائدة الاقتصادية، يُعدّ استعادة الحرارة المُهدرة مفيدًا للغاية من الناحية البيئية، خاصةً إذا كانت الطاقة المُستردة تُجنّب استهلاك الوقود الأحفوري، ما يُحسّن البصمة الكربونية للمنشأة الصناعية [19].

2. منهجية البحث وأجزاء المنظومة:

اختيار ثلاجة مختبرية بالشكل (1) ادناه يوضح حجمها ومواصفاتها. أبعاد الصندوق المكعب للثلاجة 45 سم إلى كلا من الطول والعرض والارتفاع، بحجم كلي مساوي إلى 0.09 متر مكعب أي 90 لتر. ونظرًا لأن حيز التبريد يشمل المبخر القصري الذي ينقص من الحجم الكلي بمقدار 25 لتر تقريبًا. لذلك تم تحديد الحمل التبريد للتجربتين حيث الحمل المتوسط 7 لتر للتجربة الأولى وضعف الحمل المتوسط 14 لتر للتجربة الثانية.

1.2 تحديد حالتين رئيسيتين للدراسة:

الحالة الأولى: تحميل الثلاجة بحمل تبريد متوسط لسعتها التشغيلية 7 لتر ويمكن تحديد ذلك بحجم أو وزن تقريبي لمواد محاكاة.

الحالة الثانية: تحميل الثلاجة بضعف السعة للتجربة الأولى 14 لتر مع الأخذ في الاعتبار عدم إعاقة حركة الهواء.

تم تحديد المتغيرات المستقلة حمل التبريد والمتغيرات التابعة استهلاك الطاقة، درجة الحرارة الداخلية في نقاط مختلفة إلى عبوة الماء ودرجة حرارة غرفة التجميد، زمن الوصول إلى

- درجة الحرارة المطلوبة، دورة عمل الضاغط أي كم يحتاج من الوقت للوصول إلى الصفر المئوي لحمل الماء.
- تم تحديد الاجهزة المستخدمة في التجربة كلابمتر لقياس استهلاك الطاقة، مقاييس حرارة متعددة، مواد محاكاة لحمل التبريد متمثل بعبوات المياه، و تتبع النقاط الاتية:
- تحديد فترات القياس وتسجيل البيانات. وذلك كل عشرة دقائق
 - حساب المتغيرات الخارجية مثل درجة حرارة الغرفة المحيطة بالثلاجة والرطوبة النسبية.
 - الجهاز المختبري لغرفة تجميد Focus 802



الشكل 1 منظومة التبريد Focus 802 تعمل بوسيط التبريد R12

شغل الضاغط الميكانيكي W_c

$$W_c = (h_2 - h_1) \quad (1)$$

شغل الضاغط الكهربائي W_{ci}

$$W_{ci} = M_R (h_2 - h_1) = I * V * \cos \Theta \quad (2)$$

معدل تدفق وسيط التبريد M_R

$$M_R = W_{ci} / W_c = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 \quad (3)$$

التأثير التبريدي R_E

$$R_E = Q_e / M_R \quad (4)$$

الحرارة المطروحة بالمكثف Q_c

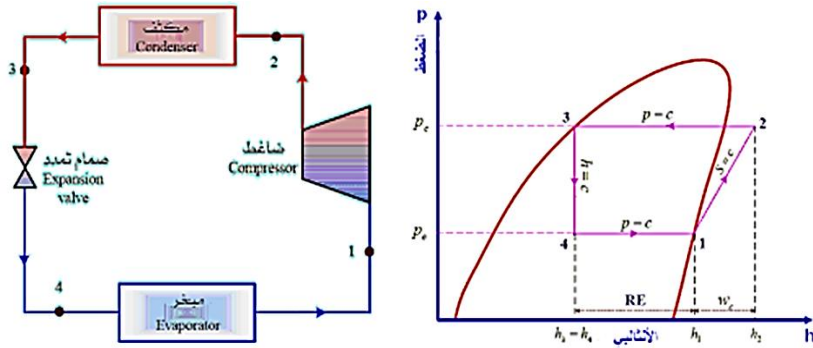
$$Q_c = M_R (h_2 - h_3) \quad (5)$$

حمل التبريد بالمبخر Q_e

$$Q_e = M_R (h_1 - h_4) \quad (6)$$

معامل الاداء COP

$$\begin{aligned} \text{COP} &= Q_e / W_c = M_R / W_c = T_e / (T_c - T_e) \\ &= (h_1 - h_4) / (h_2 - h_1) \end{aligned} \quad (7)$$



الشكل 2 يبين العلاقة بين الضغط و الانتالبي مطابقا لمراحل الدورة

الانتروبي ثابت من 1 إلى 2 $S = C$ & الضغط ثابت من 2 إلى 3 $P = C$

الانتالبي ثابت من 3 إلى 4 $h = C$ & الضغط ثابت من 4 إلى 1 $P = C$

لتمثيل الدورة على مخطط $P-h$ فأننا نحتاج إلى الآتي: ضغط التكثيف P_c ، ضغط P_e التبخير، T_3 درجة حرارة خط السائل، T_1 درجة حرارة خط السحب.

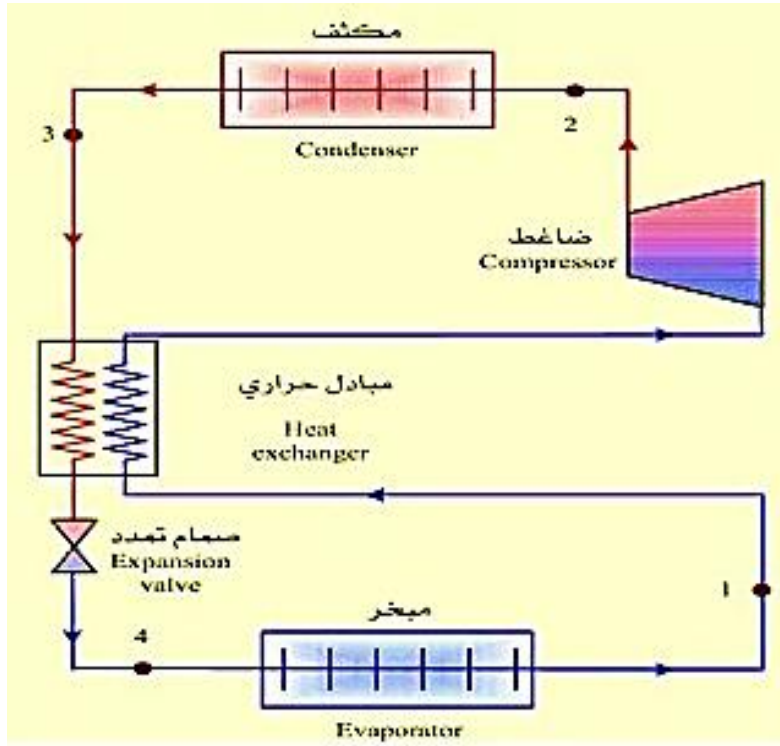
يتم تتبع T_1 لتقاطع مع P_e لنحصل على النقطة الأولى (1) نأخذ درجة حرارة الخروج من الضاغط لتحديد T_2 ومنها نتتبع الخط الممثل لها حتى يتقاطع مع ضغط التكثيف P_c وبذلك نحدد النقطة الثانية (2). يمكن أيضا بعد تحديد النقطة (1) يتم محاذات خطوط الإنتروبي ونقاطها مع ضغط التكثيف P_c لتحديد النقطة (2)

من درجة حرارة خط السائل T_3 نحدد تقاطع الخط الممثل لها مع خط التشبع للغاز ومنها نقوم بمحاذات خطوط الإنثالبي الأفقية حتى نصل خط تشبع السائل ومنه نأخذ عموديا إلى الأعلى حتى نتقاطع مع خط P_c وبذلك نحصل على النقطة (3).
نقوم برسم خط عمودي إلى الأسفل من النقطة (3) ليتقاطع مع P_e وبذلك نحصل على النقطة (4) وتكمل تمثيل الدورة.

وضيفة المبادل الحراري بالمنظومة هي التخميص والتبريد الدوني لوسيط التبريد.
تعريف التخميص:- هو إرتفاع درجة حرارة وسيط التبريد عن درجة حرارة الغليان لسائل وسيط التبريد حيث إن درجة حرارة غليان وسيط التبريد المستعمل بالمنظومة R12 مساوية إلى 29.4 درجة مئوية.

التخميص = درجة حرارة الدخول للضاغط - درجة حرارة المبخر $T_e - T_1$
تعريف التبريد الدوني:- هو إنخفاض درجة حرارة سائل وسيط التبريد عن درجة غليان وسيط التبريد المستعمل بالمنظومة R12 مساوية إلى 29.4 مئوية.

التبريد الدوني = درجة حرارة التكثيف - درجة حرارة خط السحب $T_3 - T_c$
يوضح الشكل 3 أهمية المبادل الحراري بدورة التبريد وأهمية المبادل في تقليل إستهلاك الطاقة حيث يعمل المبادل الحراري على تقليل درجة حرارة السائل الساخن المكثف قبل دخوله الى صمام التمدد ، والمبخر كما يعمل بنفس الوقت على تسخير غاز وسيط التبريد قبل دخوله الى الضاغط و التخلص من أي سائل موجود معه كما هو موضح بالشكل 3.



الشكل 3 أهمية المبادل الحراري بدورة التبريد

3. إجراء التجربة

قمنا ببتثبيت أجهزة قياس الحرارة على كل من عبوات المياه الممثل لحمل التبريد ودخول وخروج خط السحب بالمبادل الحراري ودخول وخروج خط الطرد بالمبادل الحراري، تم تشغيل الجهاز من مفتاح التشغيل بعد أوصاله بالتيار الكهربائي. تم أخذ قياس درجة حرارة غرفة التبريد من المقياس المثبت بالجهاز المستخدم المساوية إلى 26 درجة مئوية. تم قراءة المقاييس كل عشرة دقائق حتى الوصول إلى درجة الصفر المئوي. تم قياس استهلاك الطاقة من قبل الضاغط في نهاية التجربة: سحب التيار = 0.577 أمبير. حيث نلاحظ تناقص قيمة التيار المسحوب كلما قلت درجة حيز التبريد. قياس الضغط العالي عند نهاية التجربة = 8.2 بار والمنخفض 1.05 بار. نقوم بإضافة قيمة الضغط الجوي 1 بار للحصول على الضغط المطلق.

طريقة العمل:- نثبت مقاييس درجة الحرارة لقياس درجة حرارة كلا من خط السحب وذلك بعد المبادل الحراري وآخر لقياس درجة حرارة خط السائل. ثم نشغل الجهاز لمدة العشرة دقائق الاولى كي تستقر الحالة بالدورة ثم نأخذ القياسات من مقاييس الضغط ودرجة الحرارة كما بالجدول الاتي:

درجة حرارة خط السائل قبل الدخول إلى صمام التمدد T_3	درجة حرارة خط السحب T_1	ضغط المكثف P_c	ضغط المبخر P_e
30 مئوية	18 مئوية	9 + 1 + 8	2.2 = 1 + 1.2
303 = 273 + 30	291 = 273 + 18	بار	بار
كلفن	كلفن	Mpa 0.9	Mpa 0.22

من مخطط P-h لوسيط التبريد R12 الذي تعمل به الدورة نقوم بتمثيل الدورة على المخطط ونحدد الخواص التالية لوسيط التبريد:

جدول 1 مقاييس الضغط ودرجة الحرارة

P_c Mpa	P_e Mpa	T_1 K	T_1 K	T_1 K	T_1 K	h_1 KJ/Kg	h_2 KJ/Kg	$=h_4$ h_3 KJ/Kg
0.9	0.24	291	341	303	266	228	254	92

شغل الضاغط W_c

$$W_c = M_R (h_2 - h_1) \quad (8)$$

حيث معدل التدفق لوسيط التبريد M_R

$$M_R = W_{ci} / W_c \quad (9)$$

$$W_{ci} = I * V * \cos \Theta = 1.8 * 220 * 0.85 = 336.6 \text{ W}$$

$$M_R = 336.6 / (h_2 - h_1) = 336.6 / (254 - 228) = 13 \text{ g/s}$$

$$W_c = M_R (h_2 - h_1) = 13 (254 - 228) = 338 \text{ kW}$$

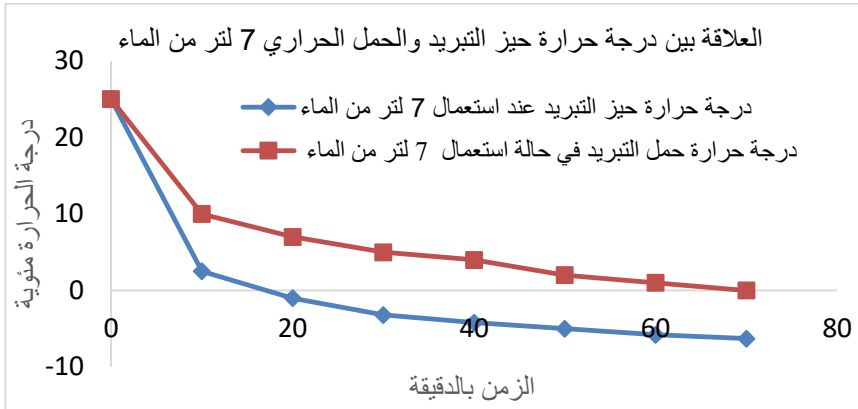
الحرارة المطروحة بالمكثف Q_c

$$Q_c = M_R (h_2 - h_3) = 13 (254 - 92) = 2106 \text{ kW}$$

يتضح انه عند العشرة دقائق الأولى من بدء تشغيل المنظومة نلاحظ أن شغل الضاغط الكهربائي يساوي 336.6 كيلووات، شغل الضاغط الحجمي يساوي 338 كيلووات، الحرارة المطروحة بالمكثف تساوي 2106 كيلووات.

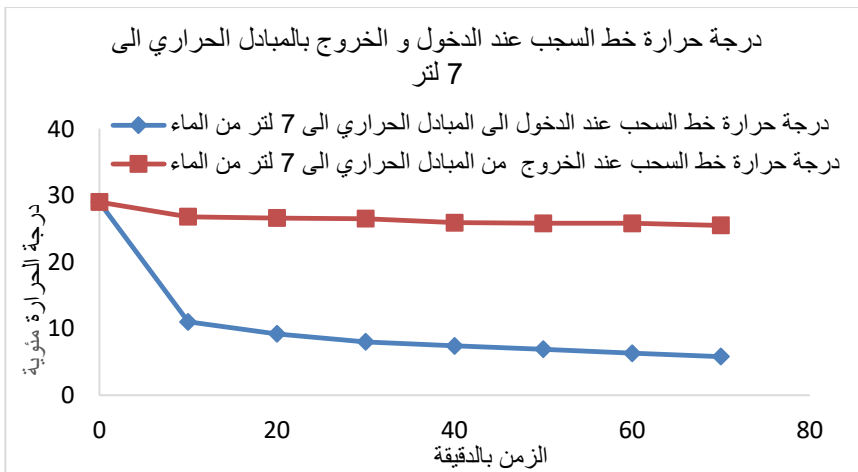
يمكن حساب استهلاك الطاقة للتجربة الأولى بحمل التبريد المتوسط 7 لتر من الماء يكون حساب استهلاك الطاقة = فرق الجهد * قيمة التيار المسحوب
 $= 220 * 1.8 = 396 \text{ واط}$

حساب استهلاك الطاقة للتجربة الأولى خلال 70 دقيقة والذي يكافئ 1.16 ساعة
إستهلاك الطاقة = $396 * 1.16 = 459.36 \text{ واط/ساعة} = 0.459 \text{ كيلو واط/ساعة}$
و بنفس الطريقة نحسب استهلاك الطاقة للتجربة الثانية و بذلك نتمكن من رسم منحنيات العلاقة بين استهلاك الطاقة بالتجربتين كما هو مبين بالأشكال المدرجة بهذه الورقة.
يبين الشكل 4 العلاقة بين درجة حرارة حيز التبريد، وحمل التبريد حيث نلاحظ أنه كلما قلت درجة حرارة حيز التبريد زاد معدل انخفاض حرارة حمل التبريد وحيث ان الدرجة المطلوبة لحمل التبريد هي الصفر المئوي فإننا نجد إنخفاض بدرجة حرارة حيز التبريد إلى 6 مئوية. كما نلاحظ الإنخفاض الكبير بدرجات الحرارة إلى كليهما خلال العشرة دقائق الأولى أما بعد برودة كلا من الحيز وحمل التبريد فإن معدل إنخفاض درجات الحرارة يقل لكليهما. عند تتبع المنحنى بالتجربة الأولى يتبين معدل انتقال الحرارة كبير أي من 25 إلى 10 درجة مئوية خلال العشرة دقائق الأولى. كما نلاحظ تناقص معدل انتقال الحرارة خلال النقاط المتتالية أي بعد مرور 20 دقيقة ويتناقص أيضا بعد مرور 30 دقيقة تدريجيا. أي يمكن القول أن معدل انتقال الحرارة يقل بين المبخر مع حمل التبريد كلما قلة درجة حرارة حمل التبريد، كما بالشكل ادناه.



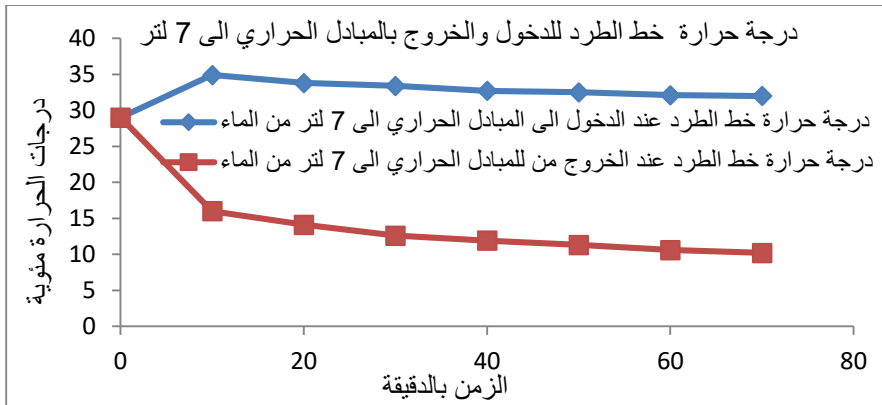
الشكل 4 العلاقة بين درجة حرارة حيز التبريد والحمل الحراري 7 لتر من الماء

يبين الشكل 5 العلاقة بين درجة حرارة خط السحب عند دخول وسيط التبريد إلى المبادل الحراري القادم من المبخر الممثل بالمنحنى الأزرق حيث يوضح التدرج بالتبريد بهذا الخط من درجة 29 مئوية وهي درجة حرارة اجزاء المنظومة عند بدء التشغيل ليبرد خلال العشر دقائق الأولى إلى 9 مئوية أي بفارق 20 درجة مئوية. أما منحنى درجة حرارة خط السحب عند الخروج من المبادل الحراري فيبتين أن الانخفاض خلال العشرة دقائق الأولى من 29 إلى 27 مئوية بدرجتين فقط وذلك نتيجة لتعرض وسيط التبريد بالمبادل الحراري مع خط الطرد الساخن، لذلك تكون الدرجة عند الخروج أعلى منه عند الدخول لخط السحب.



الشكل 5 علاقة درجة حرارة خط السحب عند الدخول والخروج بالمبادل الى 7 لتر

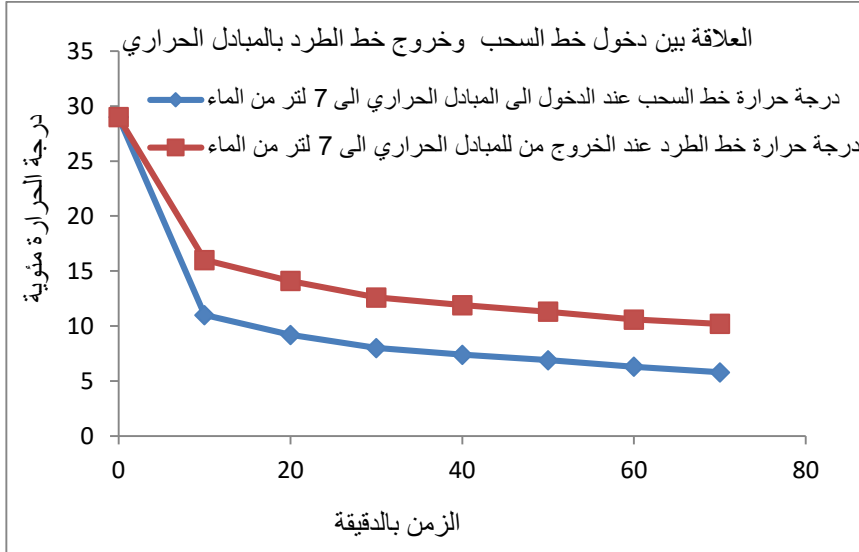
يبين الشكل 6 العلاقة بين درجة حرارة خط الطرد عند الدخول والخروج بالمبادل الحراري حيث يصل إلى أعلى درجة حرارة 35 مئوية في العشرة دقائق الأولى عند الدخول للمبادل ومنها ينخفض بنسبة بسيطة إلى 32 مئوية خلال 70 دقيقة وهذا الانخفاض بسبب برودة المبخر الذي يبرد بدوره الضاغط. أما بالنسبة إلى المنحنى باللون الأحمر يبين الانخفاض بدرجات الحرارة لخط الطرد عند الخروج من المبادل الحراري من 30 مئوية إلى 16 مئوية خلال العشرة دقائق الأولى ومنها يستمر بالانخفاض بمعدل أقل نتيجة لتبريده داخل المبادل من قبل خط السحب.



الشكل 6 علاقة درجة حرارة خط الطرد عند الدخول والخروج بالمبادل الى 7 لتر

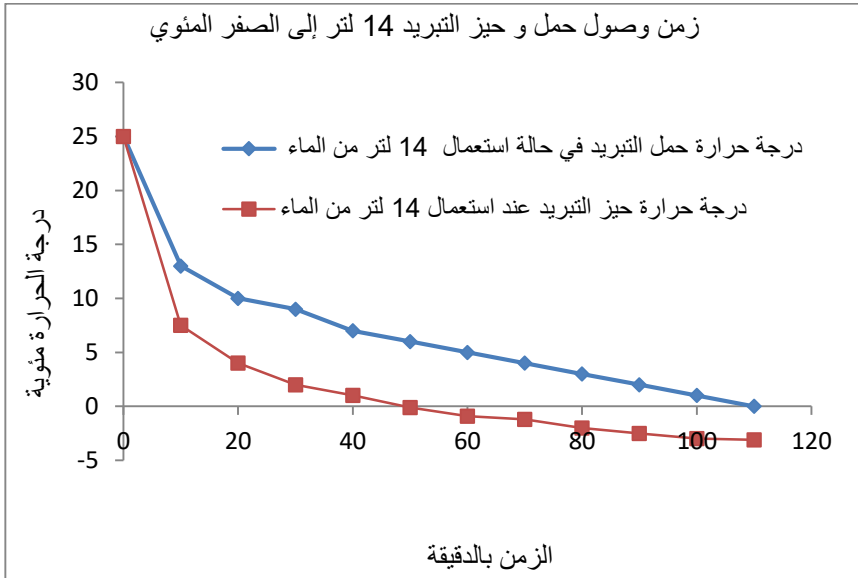
يبين الشكل 7 العلاقة الطردية بين دخول خط السحب للمبادل ، وخروج خط الطرد منه حيث يبين توافق المنحنيين معا بشكل واضح أي كلما برد دخول خط السحب أدى ذلك إلى برودة خروج خط الطرد. عند تتبع المنحنى بالتجربة الثانية يتبين معدل انتقال الحرارة أقل منه في التجربة الأولى أي من 25 إلى 12 مئوية خلال العشرة دقائق الأولى. كما نلاحظ تناقص معدل انتقال الحرارة خلال النقاط المتتالية أي بعد مرور 30 دقيقة من بدء التشغيل تصل إلى 9 مئوية. من خلال مقارنة المنحنيين يتبين ان الفرق واضح بين استعمال 7 لتر و 14 لتر. إن حمل التبريد 7 لتر يقلل من إستهلاك الطاقة ويزيد من المحافظة على المنتج. يبين الشكل 7 وضيفة المبادل الحراري في نقل الحرارة بين خط السحب وخط الطرد حيث أن أقل قيمة لدرجات الحرارة بالمبادل الحراري تكون عند دخول خط السحب والممثلة بالمنحنى باللون الأزرق حيث تصل إلى 6 درجات مئوية. أما

بالنسبة إلى المنحنى باللون الأحمر فإنه يمثل درجة حرارة الخروج من المبادل الحراري لخط الطرد أي بعد تبريده في المبادل والذي يصل إلى 10 درجات مئوية مما يدل على توفير أكبر في استهلاك الطاقة عند استعمال المبادل الحراري بين خط السحب وخط الطرد.



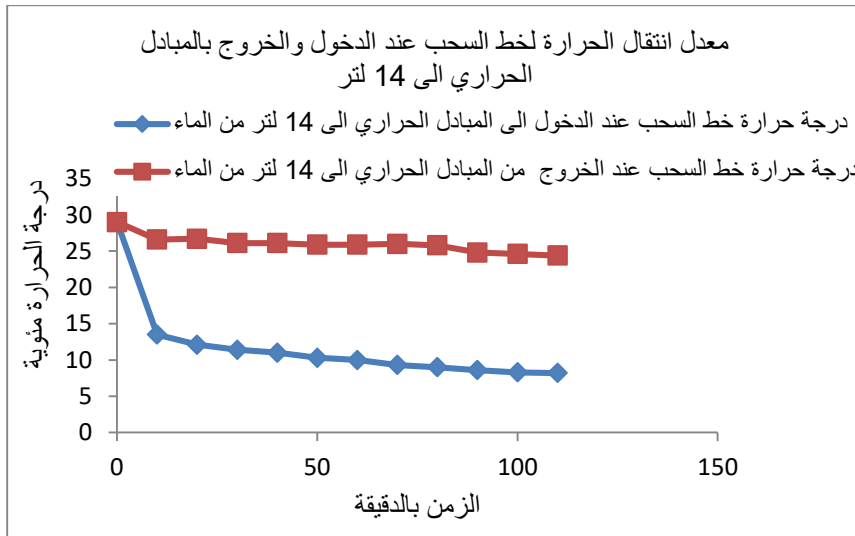
الشكل 7 علاقة دخول خط السحب وخروج خط الطرد بالمبادل

يبين الشكل 8 زمن وصول حمل التبريد عند استعمال 14 لتر إلى الصفر المئوي خلال 110 دقيقة حيث تكون درجة حرارة حيز التبريد -3 مئوية كما يبين أنه كلما برد حيز التبريد زاد معامل انتقال الحرارة منه إلى حمل التبريد.



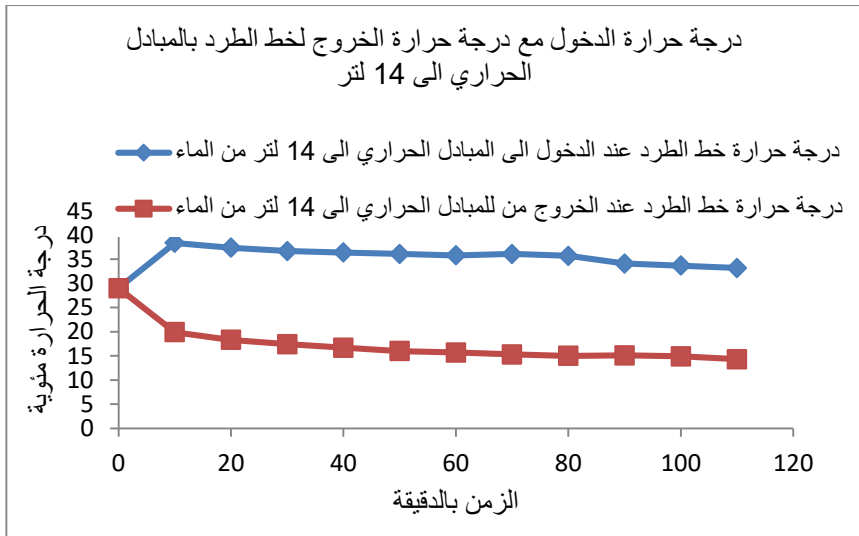
الشكل 8 زمن وصول حمل وحيز التبريد 14 لتر إلى الصفر المئوي

يبين الشكل 9 معدل إنتقال الحرارة الكبير بين درجة حرارة خط السحب عند الدخول والخروج بالمبادل الحراري حيث يفسر هذا الفرق بينهما نتيجة للتبادل الحراري داخل المبادل بين خط السحب وخط الطرد خلال المدة الزمنية 110 دقيقة.



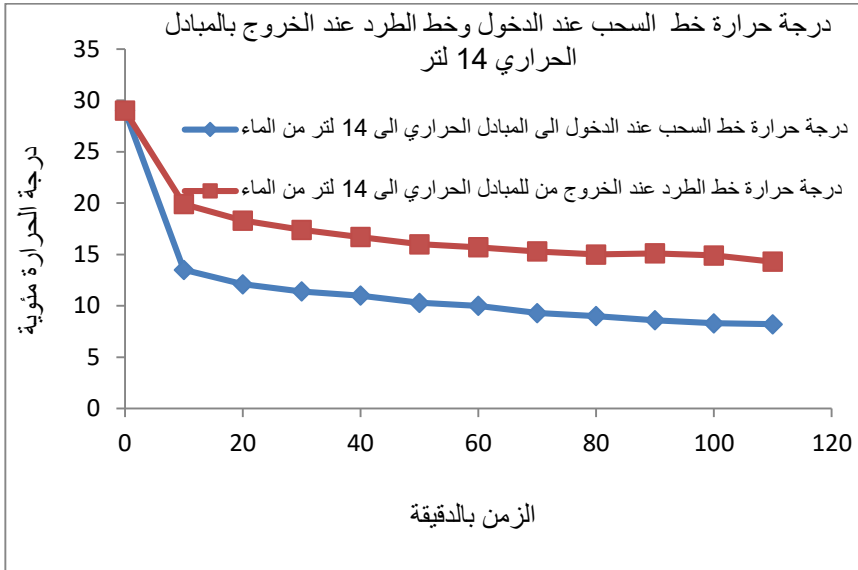
الشكل 9 معدل إنتقال الحرارة لخط السحب عند الدخول والخروج بالمبادل إلى 14 لتر

الشكل 10 يوضح العلاقة بين درجة حرارة الدخول لخط الطرد بالمبادل مع درجة حرارة الخروج من المبادل حيث يكون عند الدخول للمبادل لخط الطرد متأثر بالضاغط بدرجة حرارة 39 درجة مئوية عند العشرة دقائق الأولى ثم يبدأ الإنخفاض قليلا نتيجة لبرودة الضاغط. أما الخروج من المبادل لخط الطرد بالتجربة الثانية فيتضح التبادل الحراري داخل المبادل الذي يقوم بتبريد وسيط التبريد من درجة الدخول 39 درجة مئوية عند العشرة دقائق الأولى إلى 20 درجة مئوية أي بفارق 19 درجة مئوية. وهكذا عند بقية النقاط.



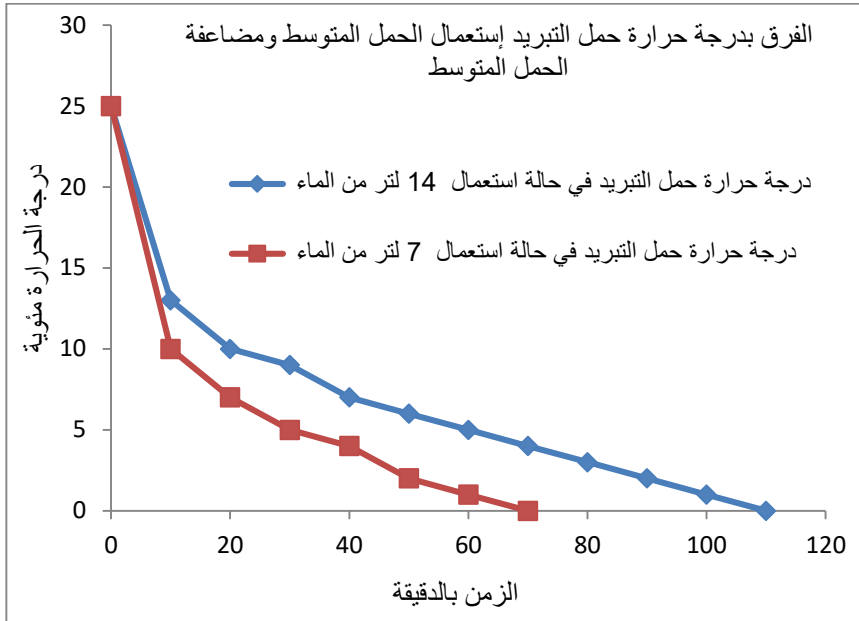
الشكل 10 درجة حرارة الدخول مع الخروج لخط الطرد بالمبادل إلى 14 لتر

يوضح الشكل 11 الفرق بين درجة حرارة خط السحب عند الدخول إلى المبادل الحراري ، ودرجة حرارة خط الطرد عند الخروج من المبادل الحراري في التجربة الثانية بمضاغفة الحمل المتوسط مع 14 لتر من الماء . من الشكل 11 يتبين أهمية المبادل الحراري حيث قام بتبريد خط الطرد الداخل إلى المبخر وتسخين خط السحب الراجع إلى الضاغط. حيث يبين الشكل 11 ان العلاقة طردية بين المنحنيين.



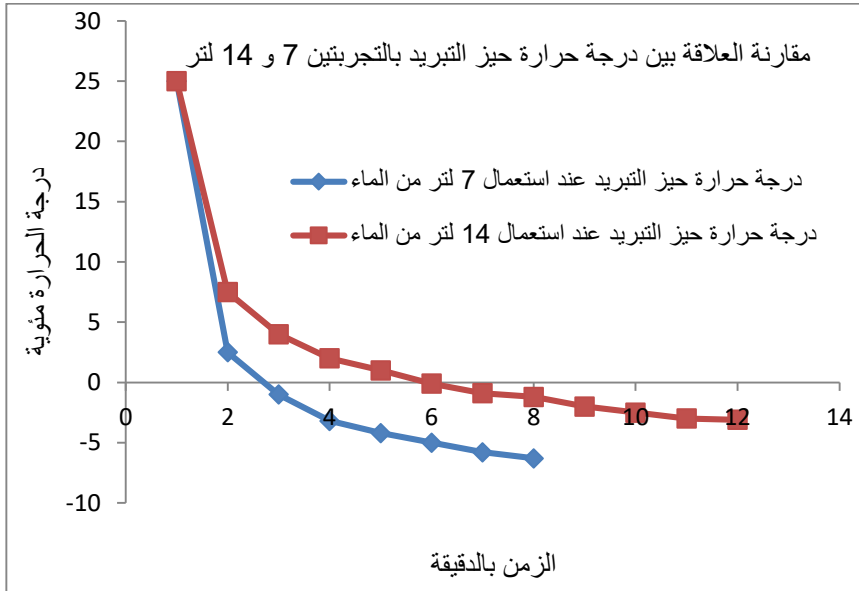
الشكل 11 درجة حرارة خط السحب عند الدخول وخط الطرد عند الخروج بالمبادل 14 لتر

يقارن الشكل 12 بين حمل التبريد بالتجربتين حيث يكون الفرق واضحا بين استعمال الحمل المتوسط ومضاعفة الحمل المتوسط حيث عند استعمال الحمل المتوسط تم الوصول إلى الصفر المئوي بزمان أقل بكثير عند 70 دقيقة من زمن الوصول إلى نفس الدرجة عند استعمال ضعف الحمل المتوسط ، وذلك عند 110 دقيقة. وبذلك يكون استهلاك الطاقة وعمر الضاغط الافتراضي أكثر في التجربة الثانية.



الشكل 12 الفرق بدرجة حرارة حمل التبريد بالتجربتين 7 و 14 لتر

يبين الشكل 13 مقارنة العلاقة بين درجة حرارة حيز التبريد بين التجربتين حيث تبدأ درجة حرارة حيز التبريد بالانخفاض من 25 مئوية إلى كلتا التجربتين ، ولكن نلاحظ أن بالتجربة الأولى تنخفض درجة حرارة حيز التبريد إلى -7 درجة مئوية بزم 70 دقيقة فقط لأن حمل التبريد متوسط الحجم بينما بالتجربة الثانية كان حجم حمل التبريد كبير مما أدى إلى زيادة الوقت إلى 110 دقيقة ، مع الوصول إلى درجة حرارة -3 مئوية فقط. ومن الشكل 13 يتضح أن معامل انتقال الحرارة بين حيز التبريد وحمل التبريد بالتجربة الأولى أكبر من منه بالتجربة الثانية.



الشكل 13 مقارنة العلاقة بين درجة حرارة حيز التبريد بالتجربتين 7 و 14 لتر

4. تحليل النتائج:

مقارنة استهلاك الطاقة بين الحالتين: أن استهلاك الطاقة بالتجربة الأولى 145.81 واط/ساعة وفي التجربة الثانية 231.288 واط/ساعة أي ما يعادل 160% من استهلاك التجربة الأولى مما يدل على توفير أفضل بالطاقة عند استعمال الحمل المتوسط. مقارنة سرعة الوصول إلى درجة الحرارة المطلوبة: زمن الوصول إلى درجة الصفر بالتجربة الأولى هو ساعة وعشرة دقائق أما زمن الوصول بالتجربة الثانية إلى الصفر المؤي هو ساعتان إلا عشر دقائق. مما يبين الفارق الزمني الكبير بين استعمال الحمل المتوسط عنه عند مضاعفة الحمل المتوسط .

تحليل تغيرات درجة الحرارة في نقاط مختلفة داخل الثلاجة: حيث عند تحليل التغير بدرجات الحرارة داخل حيز التبريد. من المهم إستعمال الثلاجة بوضع حمل التبريد بشكل يسمح لتوزيع البرودة الناتجة من المبخر على جميع مكونات حمل التبريد. إن زيادة حمل التبريد إلى الحد الأقصى يقلل من انتقال الحرارة داخل حيز التبريد مما يسبب بفقدان وتلف المواد المبردة.

دورة عمل الضاغط في كلتا الحالتين: عند مناقشة عمل الضاغط وحيث أن الضاغط هو قلب دورة التبريد فإن زيادة تشغيل الضاغط يعني استهلاك إلى عمر الضاغط الافتراضي وإجهاد أكبر إلى أجزائه الداخلية مما يدل على أنه عند استعمال نصف سعة الحمل المتوسط إلى جهاز التبريد له فارق كبير عنه عند استعمال ضعف الحمل المتوسط إلى جهاز التبريد.

مقارنة النتائج مع الإطار النظري: عند ربط النتائج التي تم الحصول عليها بالمفاهيم والنظريات التي تم شرحها في الإطار النظري يظهر جليا أن استعمال الثلجة بالحمل المتوسط له الأفضلية الكبرى من الناحية الاقتصادية مما يسعد مستخدمي الثلجات على المحافظة على جهاز الثلجة و توفير أكثر من النصف من الأموال التي ستصرف عند استعمال ضعف الحمل المتوسط إلى جهاز التبريد بالإضافة إلى احتمال تلف المواد المخزنة عند استعمال ضعف الحمل المتوسط إلى جهاز التبريد حيث يسبب ضعف الحمل المتوسط إلى تكديس البضاعة وتقليل معامل إنتقال الحرارة بحيز التبريد.

تفسير الاختلافات: أن أسباب الاختلافات الملاحظة في الأداء بين حالتي التحميل هو معامل إنتقال الحرارة داخل حيز التبريد حيث أن كلما زاد معامل إنتقال الحرارة بين حمل التبريد و المبخر قل زمن الوصول إلى الدرجة المطلوبة وهذا ما يتضح جليا عند استعمال الحمل المتوسط إلى جهاز التبريد.

أما عند استعمال ضعف الحمل المتوسط إلى جهاز التبريد من الواضح أن معامل انتقال الحرارة يقل بين المبخر وحمل التبريد مما يزيد من وقت الوصول إلى الدرجة المطلوبة مع احتمالية فساد المادة المخزنة عند عدم وجود مساحة كافية لحركة الهواء داخل غرفة التبريد.

تحديد القيود: عند ذكر قيود التي واجهت البحث والعوامل التي أثرت على النتائج ، وهي عدم وجود أجهزة قياس حديثة مرتبطة بالكمبيوتر لتسجيل درجات الحرارة والضغط بجدول إكسل ومقاييس حديثة لقياس استهلاك الطاقة الكهربائية. مما اضطرنا لأخذ القياسات وتدوينها بشكل يدوي.

5. التوصيات:

تكمن أهمية هذه الدراسة حول تأثير استخدام حجم الحمل المتوسط إلى جهاز التبريد المساوي إلى 7 لتر من الماء مقابل استخدام ضعف الحمل المتوسط إلى جهاز التبريد المساوي إلى 14 لتر من الماء على أداء واستهلاك الثلاجة للطاقة. وذلك يكمن في كون هذه الدراسة تتناول جانبًا عمليًا وحيويًا في استخدام أحد أكثر الأجهزة المنزلية شيوعًا واستهلاكًا للطاقة. نتائج هذا البحث تحمل قيمة كبيرة لعدة أطراف:

تقديم توصيات استخدام أكثر دقة للمستهلكين: بناءً على نتائج البحث بالحمل المتوسط وضعف الحمل المتوسط لجهاز التبريد، يمكن للمصنعين تضمين إرشادات أكثر تفصيلاً وتحديدًا في أدلة المستخدم حول كيفية ملء الثلاجة لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة وأفضل حفظ للطعام. التحقق من صحة النماذج النظرية والمحاكاة حيث استخدام البيانات التجريبية من هذه الدراسة بالحمل المتوسط وضعف الحمل المتوسط للتحقق من صحة النماذج الرياضية والمحاكاة الحاسوبية المستخدمة لتقدير أداء الثلاجات. تعزيز التعاون بين الصناعة والأوساط الأكاديمية حيث تمثل هذه الأبحاث التطبيقية أن تشجع على مزيد من التعاون بين الجامعات ومراكز البحث والمصنعين بهدف تطوير حلول مبتكرة ومستدامة.

1.5 بالنسبة للمستهلكين:

التوفير الإقتصادي المباشر: توفر نتائج البحث للمستهلكين معلومات واضحة حول ما إذا كان نمط معين لملء الثلاجة بالحمل المتوسط وضعف الحمل المتوسط لجهاز التبريد يؤدي إلى استهلاك أقل للكهرباء. هذا يمكن أن يترجم مباشرة إلى خفض قيمة فواتير الطاقة الشهرية، خاصة مع تزايد أسعار الطاقة عالميًا. (مع الأخذ في الاعتبار تاريخ مايو 2025، حيث يستمر التركيز العالمي على كفاءة الطاقة).

تحسين جودة حفظ الأطعمة وتقليل الفاقد منها وذلك من خلال فهم كيفية تأثير الحمل المتوسط وضعف الحمل المتوسط على استقرار وتجانس درجة الحرارة داخل الثلاجة. سيتمكن المستهلكون من تخزين أطعمتهم بشكل أفضل ولفترات أطول. هذا يساهم في تقليل هدر الطعام، الذي يمثل خسارة اقتصادية وبيئية.

زيادة الوعي بممارسات الاستخدام الأمثل حيث تساهم الدراسة في تثقيف المستخدمين حول أفضل الطرق لاستغلال ثلاجاتهم بكفاءة، وتصحيح المفاهيم الخاطئة الشائعة حول كيفية استعمالها بالحمل المتوسط وضعف الحمل المتوسط للثلاجة.

إطالة العمر الافتراضي للجهاز حيث أن الاستخدام الأمثل بالحمل المتوسط ، الذي يقلل من إجهاد مكونات الثلاجة مثل الضاغط يساهم في زيادة عمرها الافتراضي وتقليل الحاجة إلى الصيانة المكلفة.

2.5 بالنسبة للمصنعين وشركات الأجهزة:

تطوير تصميمات أكثر كفاءة: يمكن لنتائج الدراسة أن تزود المصنعين ببيانات قيمة حول أداء الثلاجات تحت ظروف تحميل بالحمل المتوسط وضعف الحمل المتوسط. هذه المعلومات يمكن استخدامها في تحسين تصميمات الدوائر الهوائية الداخلية، وأنظمة التحكم في درجة الحرارة، وكفاءة الضواغط لتوفير أداء مثالي عبر نطاقات تحميل مختلفة. تعزيز الميزة التنافسية بين الشركات التي تتبنى هذه النتائج بالحمل المتوسط وضعف الحمل المتوسط للثلاجة في تصميماتها وتوصياتها يمكن أن تكتسب ميزة تنافسية من خلال تقديم منتجات تلبي إحتياجات المستهلكين بشكل أفضل فيما يتعلق بتوفير الطاقة والأداء الفعال.

المساهمة في تطوير معايير اختبار أكثر واقعية حيث تساهم النتائج في النقاشات حول تطوير وتعديل بروتوكولات اختبار كفاءة الطاقة للأجهزة لتصبح أكثر تمثيلاً لظروف الاستخدام الفعلية بالحمل المتوسط وضعف الحمل المتوسط للثلاجة.

3.5 بالنسبة للباحثين والأوساط الأكاديمية:

إضافة معرفية لسد فجوة بحثية حيث توفر الدراسة بيانات تجريبية وتحليلات تساهم في سد فجوة في الأبحاث العلمية المتعلقة بتأثير أنماط التحميل المتغيرة على أداء الثلاجات المنزلية واستهلاكها للطاقة بالحمل المتوسط وضعف الحمل المتوسط، وهو مجال قد لا يحظى دائماً بالدراسة التفصيلية التي يستحقها مقارنة بالجوانب التقنية البحتة. توفير أساس لدراسات مستقبلية أكثر تعمقاً حيث تفتح نتائج هذا البحث آفاقاً لأبحاث مستقبلية تتناول متغيرات أخرى مثل تأثير أنواع معينة من الأطعمة، وتصميمات محددة للثلاجات، وتأثير سلوكيات المستخدمين المختلفة مثل عدد مرات فتح الباب بشكل أكثر تفصيلاً.

6. الخلاصة

تكمن أهمية هذه الدراسة لاستعمال الثلاجة بالحمل المتوسط وضعف الحمل المتوسط للثلاجة ونتائجها للمستهلكين والمصنعين والباحثين. حيث يقدم هذا البحث حقائق عن

استعمال الحمل المتوسط وضعف الحمل المتوسط وذلك بمقارنة النتائج لتوضيح وتسهيل اختيار الحجم المناسب للثلاجة من قبل المستخدمين. حيث ننصح المستخدمين بشراء وأستعمال الثلاجة بما يناسب من 50 إلى 70 بالمئة من سعة حجم الثلاجة الكلي وذلك لان هذا الحمل الذي نوصي به يعطي المستخدم اتخاذ القرار الصحيح للمحافظة على المواد المخزنة واستهلاك أقل للطاقة مما يعني توفير أكبر من انفاق الاموال المصروفة بشكل يومي والمحافظة على الامن الغذائي العالمي. يمكن القول أنه، تساهم هذه الدراسة في تعزيز ثقافة ترشيد استهلاك الطاقة، وتحسين سلامة وجودة الغذاء، ودفع عجلة الابتكار في قطاع الأجهزة المنزلية، مما يعود بالنفع على الفرد والمجتمع والبيئة على حد سواء.

7. المراجع

- [1] EZE, Val Hyginus Udoka, et al. Advancements in energy efficiency technologies for thermal systems: A comprehensive review. INOSR Applied Sciences, 2024, 12.1: 1-20.
- [2] SILVA-ROMERO, Juan Carlos; BELMAN-FLORES, Juan Manuel; ACEVES, Salvador M. A review of small-scale vapor compression refrigeration technologies. Applied Sciences, 2024, 14.7: 3069.
- [3] WANG, Lisong; HE, Lijuan; HE, Yijian. Review on absorption refrigeration technology and its potential in energy-saving and carbon emission reduction in natural gas and hydrogen liquefaction. Energies, 2024, 17.14: 3427.
- [4] PETER, Efosa Ohenhen, et al. Sustainable cooling solutions for electronics: A comprehensive review: Investigating the latest techniques and materials, their effectiveness in mechanical applications, and associated environmental benefits. 2024.
- [5] ISLAM, Muhammad Mohiul; SHOFIULLAH, Shaikh. Optimizing HVAC Efficiency and Reliability: A Review of Management Strategies for Commercial and Industrial Buildings. Available at SSRN 5049288, 2024.
- [6] GUO, Yali, et al. A Review on Phase-Change Materials (PCMs) in Solar-Powered Refrigeration Systems. Energies, 2025, 18.6: 1547.

- [7] CHANG, Qiankun, et al. Optimization control strategies and evaluation metrics of cooling systems in data centers: a review. Sustainability, 2024, 16.16: 7222.
- [8] WAN, Hanlong, et al. Machine-learning-based compressor models: A case study for variable refrigerant flow systems. International Journal of Refrigeration, 2021, 123: 23-33.
- [9] PÉREZ-GOMARIZ, Mario; LÓPEZ-GÓMEZ, Antonio; CERDÁN-CARTAGENA, Fernando. Artificial neural networks as artificial intelligence technique for energy saving in refrigeration systems—A review. Clean Technologies, 2023, 5.1: 116-136.
- [10] FONSECA, Vinícius David, et al. Mass flow prediction in a refrigeration machine using artificial neural networks. Applied Thermal Engineering, 2022, 214: 118893.
- [11] CHAERUN NISA, Elsa; KUAN, Yean-Der. Comparative assessment to predict and forecast water-cooled chiller power consumption using machine learning and deep learning algorithms. Sustainability, 2021, 13.2: 744.
- [12] AMASYALI, Kadir; EL-GOHARY, Nora. Machine learning for occupant-behavior-sensitive cooling energy consumption prediction in office buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 142: 110714.
- [13] FENG, Yanxiao, et al. Space cooling energy usage prediction based on utility data for residential buildings using machine learning methods. Applied energy, 2021, 291: 116814.
- [14] LIU, Jiarui; YU, Jianlin; YAN, Gang. Experimental study on performance characteristics of a- 70° C ultra-low temperature medical freezer with mixed hydrocarbon refrigerant. Energy, 2024, 307: 132596.
- [15] HOU, Zhaoning, et al. Experimental study on improving the thermal performance of isobutane refrigeration system by parameter optimization. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 232: 125941.
- [16] LI, Xueshi, et al. High-frequency bending-actuated elastocaloric cooler with enhanced cooling performance. Cell Reports Physical Science, 2025.

- [17] LI, Bin, et al. Performance study of portable semiconductor refrigeration device based on CFD simulation. *Micromachines*, 2023, 14.2: 296.
- [18] WANG, Yang, et al. Preparation and Characterization of Microencapsulated Phase Change Materials with Enhanced Thermal Performance for Cold Storage. *Materials*, 2025, 18.9: 2074.
- [19] M'BAYE, Abaubakry. A case study of heat recovery: a heat pump in an industrial site. *Renewable Energy and Sustainable Development*, 2022, 8.