

تصميم الأنبوب الحراري المعدني المستخدم في الأنابيب الحرارية المفرغة بالمجمع الشمسي وتقييم أدائه

* عياد المخزوم الواعر¹، أسامة السويح محمود²، خالد محمد الشيباني³، الطاهر محمد عون⁴

^{4,2,1} قسم تقنيات الطاقات الجديدة والمتجددة، المعهد العالي للعلوم والتقنية، تروهنة، ليبيا

³ قسم تقنيات الهندسة الكهربائية، المعهد العالي للعلوم والتقنية، تروهنة، ليبيا

Email: Ayss732001@gmail.com

ملخص البحث

يركز هذا البحث على دراسة تصميم أحد أنواع تقنيات تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية وهي تقنية الأنبوب الحراري المفرغ ذو الأنبوب الحراري المعدني، تم تصميم أنبوب حرارة نحاسي وأجريت التجارب في الهواء الطلق في منتصف شهر نوفمبر 2022 حققت التجارب التي تم إجراؤها على الأنبوب الحراري النحاسي المصمم نتائج مقبولة حيث بلغت كفاءة الأنبوب الحرارية 35% وهذه الكفاءة تتمثل في تحويل أشعة الشمس إلى حرارة والتي كانت متوسط شدتها خلال فترة الاختبار 970 W/m^2 مقاسة عمودياً على سطح جهاز الاختبار وتمثل هذه الكفاءة 52.2% - 61.4% عند مقارنتها مع كفاءة الأنبوب الحراري التجاري. وصل مستوى اكتساب الطاقة بالمياه داخل الخزان خلال ساعات الاختبار إلى 190.73 W أي ما يقدر بـ 686602.4 J تم استنتاج أن الأنبوب الحراري النحاسي المصمم يعمل على تحويل حرارة الشمس في نظام تسخين المياه بالطاقة الشمسية القائم على أساس تكنولوجيا الأنابيب الحرارية المفرغة يمكن أن يكون ذو موثوقية ويمكن إجراء التحسينات على التصميم للحصول على كفاءة أعلى في عمليات تحويل الطاقة الشمسية إلى حرارة والتي بدورها ستزيد من مستوى الطاقة المطلوبة داخل النظام.

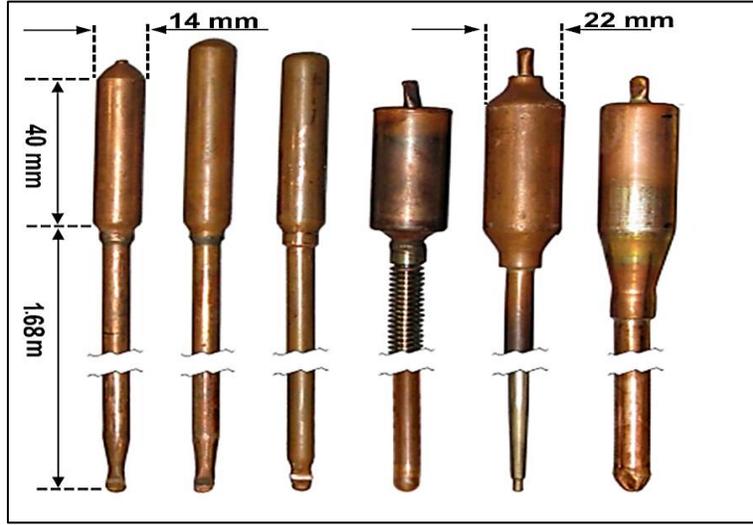
1. المقدمة

إن من أهم التطبيقات انتشاراً في أنظمة تسخين المياه باستخدام الطاقة الشمسية مجمع سخان الشمسي ذو الأنابيب المفرغة والتي تعتمد على الأنبوب الحراري المعدني لتحويل ونقل الطاقة الحرارية، تتكون أنابيب المجمع الشمسي لهذا النوع من أنابيب زجاجية مصنوعة من البوروسيليكيت محكمة الإغلاق ذات أسطح ماصة حيث أن كل أنبوب زجاجي فردي يتكون من طبقتين زجاجيتين داخلية وخارجية، الأنبوب الخارجي شفاف ويسمح لأشعة الشمس بالمرور من خلاله بانعكاس قليل جداً، أما الأنبوب الداخلي الماص للحرارة فيطلى بطبقة انتقائية سوداء تمتص أشعة الشمس الساقطة عليه بنسبة تصل إلى 95% يتم تثبيت نهايتي الأنبوبين مع بعضهما بطريقة الصهر بعد تفريغ الهواء الموجود بينهما تحت درجة حرارة عالية وينتج عن عملية التفريغ هذه وجود منطقة عزل بين الأنبوبين وهذا ما يجعل هذه الأنابيب مميزة حيث يمنع هذا الفراغ تسرب الطاقة الحرارية التي تم اكتسابها، يحتوي كل أنبوب زجاجي علي أنبوب معدني غالباً ما يكون من النحاس وداخل كل أنبوب معدني كمية صغيرة من سائل العمل هي التي تقوم بنقل الحرارة من المبخر إلي المكثف الذي يعمل في ظروف الفراغ الذي يتم إحداثه داخل الأنبوب المعدني [1, 2]. غالباً ما يتم تصنيع الأنبوب الحراري المعدني بأطوال وأقطار مختلفة، وسائل العمل داخله يتمتع بمستوى عالٍ من التوصيل الحراري والذي ينقل الطاقة الحرارية عندما يتبخر بتأثير حرارة أشعة الشمس في قسم التسخين لينتقل إلى قسم آخر يسمى قسم التبريد وهو المكثف ويطلق حرارة البخار الكامنة إلى الماء المراد تسخينه حيث يتكثف هذا البخار ومن ثم يتدفق على هيئة سائل راجعاً إلى قسم التسخين مرة أخرى بتأثير الجاذبية الأرضية [3, 4]. ازدادت استخدامات مجمعات الأنابيب المفرغة مع الأنابيب الحرارية (ETCs HP) في أنظمة تسخين المياه بالطاقة الشمسية المنزلية الحديثة في جميع أنحاء العالم بسبب

كفاءتها الحرارية العالية ودرجات حرارة التشغيل العالية التي توفرها هذه التقنية عند مقارنتها بنوع آخر يسمى بمجمعات الطاقة الشمسية المسطحة. [1, 5]. الشكل رقم (1) يوضح الأنبوب الحراري في شكله الكامل ويوضح الشكل رقم (2) مجموعة من الأشكال الهندسية المختلفة لأنابيب الحرارة المعدنية المستعملة داخل الأنابيب الزجاجية [1, 6, 7]. إن هذا الورقة تهتم بدراسة تصميم الأنابيب الحراري النحاسي المستخدم داخل الأنابيب الزجاجية المفرغة وهي إحدى التطبيقات المستخدمة في تحويل ونقل الحرارة في أنظمة المجمعات الشمسية الحرارية أو ما يعرف بالسخان الشمسي ويعتبر نظام نقل الحرارة باستخدام الأنابيب الحرارية في نظام تسخين المياه عن طريق الأنابيب الزجاجية المفرغة من أهم الأنظمة لتسخين المياه وتصميم هذه الأنابيب وتقييم أدائها بالمقارنة مع النماذج التجارية يوضح الخواص الفيزيائية والميكانيكية وفكرة عمل هذا النظام والتعرف على مميزاته وأهميته وفكرة عمله في نقل وتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية في منظومات السخانات الشمسية وكبديل لتحويل ونقل الطاقة بالطرق التقليدية كما تهدف إلى توفير البيانات المعلومات ذات الفائدة والتي تكون الحاجة إليها لمستخدمي تقنية الأنابيب الحرارية.



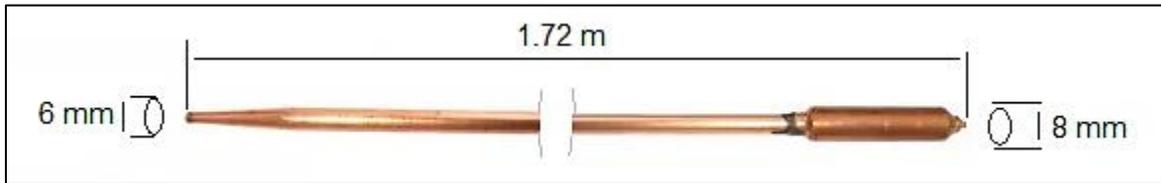
الشكل رقم (1): الأنبوب الحراري بشكله الكامل



الشكل رقم (2): أشكال هندسية مختلفة لأنابيب الحرارة [8]

2. الجانب العملي والمنهجية:

يشمل تصميم الأنابيب النحاسي كما في الشكل رقم (3) حسب الأبعاد المعيارية بناء نموذج اختبار متكامل وإن مقاييس الأنابيب النحاسي المصمم بقطريه الداخلي والخارجي (6 mm), (8 mm) على التوالي وبطول 1.72 m وتم تثبيت انتفاخ علوي في رأس الأنبوب (المكثف) وتم شحن الأنبوب بالماء النقي (المقطر) كسائل عمل بكمية مقدارها (10 ml) وتم إحداث تفرغ داخل الأنبوب النحاسي بواسطة مضخة تفرغ خاصة بمقدار 5×10^{-3} Pa تحت الضغط الجوي الاعتيادي وتم اقفال ولحم الأنبوب النحاسي من نهايته بعد عملية التفرغ باستعمال أدوات ومواد اللحام المناسبة وتم إدخال الأنبوب الحراري المعدني داخل الأنبوب الزجاجي المفرغ والشكل رقم (4) و الشكل رقم (5) يوضحان الأنبوب الحراري النحاسي المصمم خارج وداخل الأنبوب الزجاجي المفرغ.



الشكل رقم (3): الأنبوب الحراري النحاسي المصمم



الشكل رقم(4): الأنبوب الحراري النحاسي المصمم



الشكل رقم(5): الأنبوب الحراري النحاسي المصمم داخل الأنبوب الزجاجي المفرغ

تم بناء إطار خاص بزاوية 45 درجة لتثبيت وحمل الأنبوب الزجاجي والأنبوب الحراري النحاسي كما هو موضح بالشكل رقم (6) وثبت بأعلى هذا الإطار خزان مياه تم تصميمه أيضا يسع 4 لترات من الماء وتم عزل هذا الخزان بمادة عازلة للمحافظة على درجة الحرارة داخله وتم لحام أنبوبين من النحاس في الجزء العلوي من الخزان أحدهما يصل إلى عمق الخزان والآخر يلامس المستوى العلوي لسطح المياه وذلك لوضع مستشعرات المزدوجات الحرارية داخلهما لغرض قياس وتسجيل درجة حرارة مستويات السائل العلوية والسفلية في الخزان بحيث يتم قراءة درجات الحرارة عبر مسجل البيانات ومن ثم تسجيلها طيلة فترة سطوع الشمس خلال فترة الاختبار. تمت أيضا إجراء قياسات لدرجات الحرارة مباشرة من على المكثف (رأس الأنبوب الحراري) ومراقبة

أداء الأنبوب الحراري خارج خزان المياه وذلك بتثبيت المزدوجات الحرارية في نقطتين مختلفتين وتسجيل درجات الحرارة التي يتم الحصول عليها.



الشكل رقم (6): جهاز الأنبوب الحراري في شكله النهائي

1.2. تجميع البيانات وتحليلها والنتائج

تم تجميع البيانات الموضحة في الجدول رقم (1) من جهاز الاختبار ابتداء من الساعة 9 صباحاً حتى 4 مساءً وتتمثل البيانات في قياس درجة الحرارة داخل الخزان من على سطح المياه وقاعها وإيجاد متوسط درجة الحرارة وكذلك شدة الإشعاع الشمسي الساقطة على الأنبوب وتم أيضاً قياس درجة الحرارة المحيطة.

جدول رقم (1) درجات الحرارة وشدة الاشعاع الشمسي التي تم الحصول عليها من جهاز الأنبوب الحراري المصمم

R شدة الاشعاع الشمسي	Ta درجة حرارة الجو المحيط	T متوسط درجة حرارة مياه الخزان	T2 درجة الحرارة عند قاع مياه الخزان	T1 درجة الحرارة عند سطح مياه الخزان	التاريخ والوقت	الساعات	ت
w/m ²	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)			
740	21.4	17.5	17	18	14/11/2022 09:00	1	1
760	25.6	18.5	18	19	14/11/2022 09:15		2
780	29.8	19.5	19	20	14/11/2022 09:30		3
790	30.8	20.5	20	21	14/11/2022 09:45		4
800	32.6	21.5	21	22	14/11/2022 10:00	2	5
810	31.4	22.5	22	23	14/11/2022 10:15		6
800	30.8	23.5	23	24	14/11/2022 10:30		7
831	31.6	24.5	24	25	14/11/2022 10:45		8
1135	31	25.5	25	26	14/11/2022 11:00	3	9
1075	33.6	26.5	26	27	14/11/2022 11:15		10
1050	33.6	27.5	27	28	14/11/2022 11:30		11
1025	31.3	28.5	28	29	14/11/2022 11:45		12
1000	30	29.5	29	30	14/11/2022 12:00	4	13
1120	29	31	30	32	14/11/2022 12:15		14
300	32.6	33	32	34	14/11/2022 12:30		15
950	30.3	35	34	36	14/11/2022 12:45		16
1250	32	37	36	38	14/11/2022 13:00	5	17
1026	34.9	39	38	40	14/11/2022 13:15		18
1000	32.7	41	40	42	14/11/2022 13:30		19
1000	34.1	43	42	44	14/11/2022 13:45		20
1070	33.2	45	44	46	14/11/2022 14:00	6	21
1230	34.4	46.5	46	47	14/11/2022 14:15		22
1263	32.4	48	47	49	14/11/2022 14:30		23
1170	33.1	50	49	51	14/11/2022 14:45		24
800	30.7	52	51	53	14/11/2022 15:00	7	25
1067	28.9	54	53	55	14/11/2022 15:15		26
900	32.1	56	55	57	14/11/2022 15:30		27
980	31.1	57	56	58	14/11/2022 15:45		28
920	31.8	58.5	58	59	14/11/2022 16:00		29

2.2. تحليل البيانات

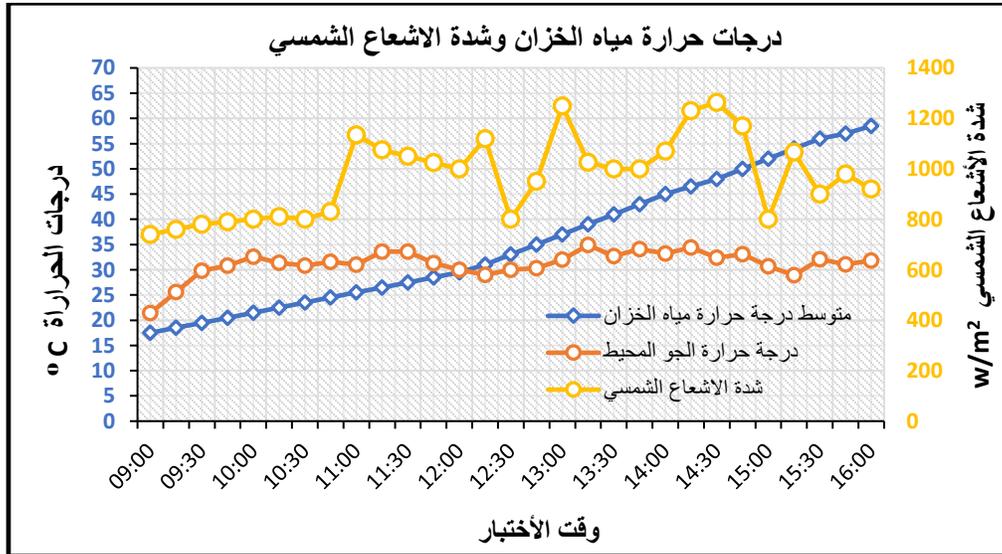
تم استخدام نتائج الاختبار بالأعتماد على أحد الأنابيب الحرارية المتاحة تجارياً كمعيار لمقارنته بأداء الأنبوب

الحراري الذي تم تصميمه حيث أجريت التجارب لغرض اكتشاف التأثير على الأداء الحراري وكفاءة الأنبوب

الحراري المصمم، والذي تم شحنه بسائل عمل من الماء النقي بمقدار (10ml)

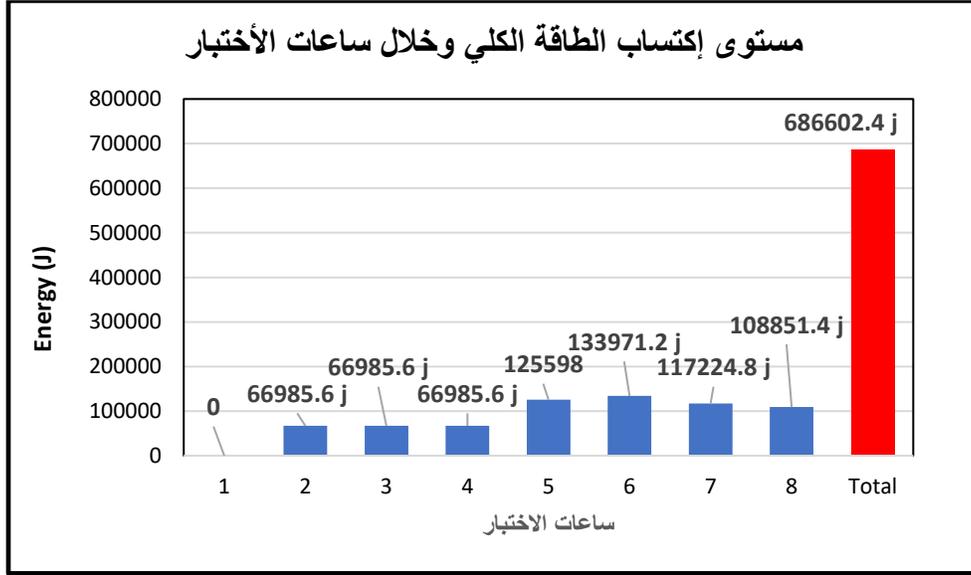
3.2. نتائج التجارب من جهاز الاختبار للأنبوب الحراري.

يوضح الرسم البياني بالشكل رقم (7) سلوك ارتفاع درجة حرارة الماء في الخزان عند اختبار الأنبوب الحراري الواقع تحت تأثير الإشعاع الشمسي الساقط والذي تم قياس متوسطه بقيمة 970 W/m^2 وبقياس درجة الحرارة المحيطة أثناء الاختبار لتعزيز الأداء والاسترشاد أكثر حول أداء الأنبوب الحراري حيث تلعب درجة الحرارة المحيطة دوراً رئيسياً في فقد حرارة مياه الخزان بجهاز الاختبار فعندما تكون منخفضة فسوف يكون لها تأثير على متوسط درجة حرارة الماء القصوى مما ينعكس ذلك في حساب كفاءة الأنبوب الحراري.



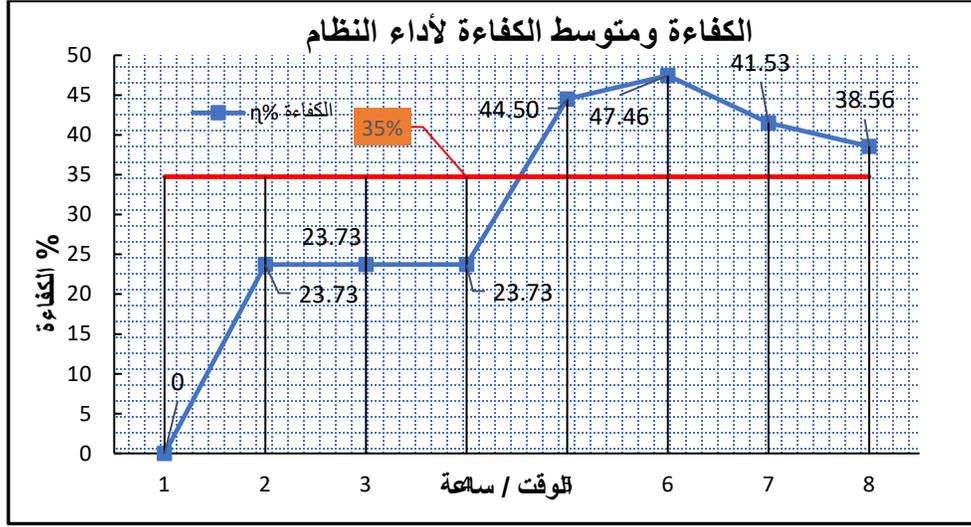
شكل رقم (7): الرسم البياني لدرجات الحرارة وشدة الإشعاع الشمسي من جهاز الأنبوب الحراري المصمم

أظهرت نتائج التجارب على الأنبوب الحراري المفرغ أنه ومع سائل العمل (الماء النقي) المستخدم في هذه الدراسة كان الأداء مقبولاً مقارنة (بالنموذج التجاري الذي كفاءته من 57% - 67% في نفس الظروف). إجمالي كمية الطاقة المنتقلة والتي اكتسبتها مياه الخزان عبر الأنبوب الحراري تتجاوز 686602.4 J خلال ساعات الاختبار السبع كما هو موضح بالشكل رقم (8).



شكل رقم (8): الرسم البياني لأداء النظام ومستوى اكتساب الطاقة الكلي وخلال ساعات الاختبار

وكما هو موضح بالشكل رقم (9) أظهرت النتائج الحسابية أن الكفاءة الحرارية التي استطاع الأنبوب الحراري الوصول إليها في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية ونقلها إلى مياه الخزان حيث بلغت كقيمة متوسطة 35% وبالمقارنة مع كفاءة الأنبوب الحراري التجاري في نفس ظروف التشغيل والتي مقدارها 57% إلى 76% من حيث نقل الحرارة إلى مياه الخزان فإن كفاءة الأنبوب الحراري المصمم بالمقارنة مع الأنبوب الحراري التجاري تكون (52.2% - 61.4%). إن متوسط درجات الحرارة المحيطة أثناء الاختبارات (31°C) كانت معتدلة مع وجود سرعة نسبية لتيار الهواء ليس من المتوقع أن مثل هذا التغيير الطفيف في درجة الحرارة المحيطة المسجلة كان سيؤثر بشكل كبير على النتائج لأن جهاز اختبار الأنبوب الحراري يحتوي على خزان معزول جيداً عن أي تأثيرات بيئية خارجية وسيكون فقدان الحرارة للبيئة ضئيلاً ولن يؤدي إلى تقليل كفاءة أداء الأنبوب الحراري بشكل عام.



شكل رقم (9) الرسم البياني لكفاءة النظام في الساعة من حيث تسخين المياه أثناء الاختبار

4.2. حساب كفاءة الانبوب الحراري

حساب كفاءة أنبوب الحرارة من حيث تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية إلى مياه الخزان باستخدام

الصيغة التالية، والتي تتضمن تغيير الطاقة الداخلية للمياه الموجودة في خزان النظام [9].

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \times 100\%$$

$$\eta_{hp} = \frac{(\Delta Q_u)}{I \times t} m \times 100\%$$

حيث η_{hp} هي كفاءة أنبوب الحرارة (%)، ΔQ_u هو التغير في الطاقة الداخلية للماء بـ kJ/kg الذي يعتمد

على درجة الحرارة T والضغط P للنظام. t هو زمن الإشعاع الشمسي بالساعات، m هو كتلة الماء في

الخزان بـ kg ، I هو إجمالي الإشعاع الشمسي الفعلي على سطح أنبوب المفرغ بـ kW/m^2

1. Output

$$\Delta E (kJ) = \Delta Q_u \times m$$

$$\Delta E (kJ) = (Q_2 - Q_1)(kJ/kg) \times m(kg)$$

درجات الحرارة الأولية والنهائية من خزان المياه 17.5 و 58.5 درجة مئوية على التوالي.

$$\Delta E = (Q_{58.5} - Q_{17.5}) \times m$$

تم استخدام (Linear interpolation) لإيجاد الطاقة الداخلية Q المنقولة للخزان من درجات الحرارة التي تم

قياسها باستخدام الجدول القياسي للماء المشبع.

$$\Delta E (J) = (244.9 - 73.5) \times 1000 \times 4 = 685600 J$$

2. Input

$$\text{Input} = I \times t \quad \because I = R \times A$$

$$R = 970 W/m^2$$

مساحة السطح المفترضة للأنبوب الحراري المفرغ يمكن حسابها كالتالي:

$$A = 1.72m \text{ (length of pipe)} \times 0.047m \text{ (dia of pipe)} = 0.08084 m^2$$

$$\therefore I = 970 W/m^2 \times 0.08084 m^2 = 78.4148 W$$

$$t(s) = 7h \times 3600s = 25200 s$$

$$I \times t = 78.4148 w \times 25200 s = 1976053 J$$

$$\eta\% = 685600 J / 1976053 J \times 100 = 35\%$$

وبالتالي

5.2. تحديد أو معرفة كمية الطاقة المطلوبة لتسخين ماء الخزان خلال فترة الاختبار

يمكن حسابها باستخدام المعادلة التالية

$$Q = m C_p \Delta T$$

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = (58.5 - 17.5)$$

$$Q = m C_p (T_2 - T_1)$$

فإن كمية الحرارة Q تكون على النحو التالي:

$$Q = 4 \times 4186.6 \times (58.5 - 17.5) = 686602.4 J$$

3. الاستنتاجات

إن أهمية البيانات المقدمة في هذه الدراسة والمعلومات ستكون مطلوبة كمؤشرات استرشادية للمهتمين بدراسة تكنولوجيا الأنابيب الحرارية. تم إنجاز المهام المذكورة أعلاه من خلال تنفيذ إجراءات هندسية سليمة إلى حد ما في جميع جوانب البحث من المفهوم الأولي لتصميم وبناء النموذج أيضاً تم استخدام جهاز منفصل تماماً ومصمم لاختبار أداء الأنبوب الحراري النحاسي وتقييم أدائه وكفاءته الحرارية وتمت مقارنة نتائج هذه التجارب من حيث الكفاءة الحرارية للأنبوب الحراري على النحو التالي:

• الأنبوب الحراري "التجاري" كفاءته الحرارية %57-67%

• الأنبوب الحراري "المصمم" كفاءته الحرارية %35

• نستنتج أن كفاءة الأنبوب الحرارية المصمم بالمقارنة مع كفاءة الأنبوب الحراري التجاري هي %52.2 - %61.4 وتبين من هذه التجارب أن الكفاءة الحرارية للأنبوب الحراري المصمم قد تعكس أنه بالإمكان الوصول إلى كفاءة واداء أفضل مما تم الحصول عليه عند توفر الامكانيات والمعدات الجيدة وفي ظروف تشغيل تليبي عمليات التحسين والتطوير في التصميم المستهدف والنتائج التي تم الحصول عليها من الأنبوب الحراري المصمم من المتوقع أن تؤدي لتقديم دراسات آخري أكثر كفاءة وأداء حراري (مقارنة بالوحدات المتاحة تجارياً).

4. التوصيات

1. توفير أجهزة ومعمل متكامل للاختبارات حيث أجريت جميع التجارب خارج المختبر نظراً لعدم توفر الأجهزة المناسبة للقيام بها داخل المعمل كالمحاكي الشمسي وأجهزة ضبط شدة الاشعة المسلطة على الأنبوب الحراري موضوع الدراسة، وذلك لأن مميزات إجراء التجارب داخل المعمل يوفر الاستقرار البيئي واستمرار

العمل تجنباً للتقلبات المناخية غير المتوقعة كغياب الشمس وظهور السحب والتيارات الباردة والتعرض

للتغيرات المناخية قد تؤثر على النتائج عندما يكون الهدف اختبار تصميم من هذا النوع وتقييم أدائه.

2. يحتاج النظام إلى مواد عزل عالية الجودة أو ربما طريقة عملية مبتكرة لتقليل فقد الحرارة في حالة الاستمرار

في إجراء اختبارات لأكثر من يوم وسيتم بعد ذلك تقييم عزل الخزان.

3. تتطلب التجارب باستخدام تقنية الأنابيب الحرارية للأنابيب المفرغة إجراءات أمان محددة وصارمة لضمان

الحفاظ على الأنابيب الزجاجية من الكسر نتيجة السقوط العرضي لجسم ثقيل عليها أثناء التجارب.

4. أخيراً، يمكن أيضاً تجربة مجموعة متنوعة من السوائل "العاملة" من غير الماء المقطر الذي تم استخدامه

وتقييم أدائها مقارنةً بالسوائل "العاملة" الخاصة بالأنابيب التسخين المتاحة حالياً.

المراجع

- [1] L. M. Ayompe and a. Duffy, "Thermal performance analysis of a solar water heating system with heat pipe evacuated tube collector using data from a field trial," *Solar Energy*, vol. 90, pp. 17–28, 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.01.001.
- [2] G. L. Morrison, N. H. Tran, I. C. McKenzie, D.R.Onley, G. L. Harding, and R. E. Collins, "Long term performance of evacuated tubular solar water heaters in Sydney, Australia," *Elsevier, Solar Energy*, 1984.
- [3] P. D. Dunn and D. A. Reay, *Heat Pipe*. New York, 1982.
- [4] Amir Faghri, *Heat Pipe Science and Technology*, 1st ed. Washington, 1995.
- [5] T.-T. Chow, Z. Dong, L.-S. Chan, K.-F. Fong, and Y. Bai, "Performance evaluation of evacuated tube solar domestic hot water systems in Hong Kong," *Energy Build*, vol. 43, no. 12, pp. 3467–3474, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.09.009.
- [6] F. Mahjouri, "Vacuum tube liquid-vapor (heat-pipe) collectors," *Proceedings of the solar conference*, pp. 1–6, 2004.
- [7] T. S. Vinubhai, "A Review : Solar Water Heating Systems," no. April, 2014, doi: 10.13140/2.1.1910.5281.

- [8] S. Jack and G. Rockendorf, “Wärmerohre in Sonnenkollektoren – Wärmetechnische Grundlagen und Optimierung sowie neue Ansätze für die Integration,” no. November 2013, pp. 1–190, 2013.
- [9] A. Alwaer and J. Gryzagoridis, “IMPROVING THE PRODUCTIVITY OF A RE WATER DESALINATION PROTOTYPE,” in *AIUE Proceedings of the Energy and Human Habitat Conference 2020*, 2020, pp. 1–7. doi: 10.5281/zenodo.4289780.