

استخدام خصائص الأنبوب الحراري كمبادل حراري في عمليات التبريد والتسخين

د . بسام بدران*

المخلص

درس في هذا البحث الأداء الحراري للأنابيب الحرارية. (الأنبوب الحراري بوسائط تشغيل مختلفة) تجريبياً، وتبين أن هذه الأنابيب جيدة جداً في نقل الحرارة من منطقة إلى أخرى، وبشكل محفوظ. تبين أن كمية الحرارة المنقولة تختلف باختلاف وسيط التشغيل وضغطه، تبين أيضاً أنه يمكننا استعمال الأنبوب الحراري الذي يحتوي على وسيط التشغيل R134A في وحدات التدفئة والتكييف في التبادل الطاقوي بين خط التغذية وخط الرجوع، حيث تكون درجة حرارة الأنبوب بحدود (30°C) وكمية الحرارة المتبادلة (50 watts)، كما تبين أنه يمكن استعمال الأنبوب الحراري الذي يحتوي على الماء النقي في استرجاع الحرارة الضائعة من مداخن الأفران الصناعية، حيث تكون درجة حرارة الأنبوب بحدود (135°C)، وكمية الحرارة المتبادلة (170 watts)، تبين أيضاً من البحث التجريبي أن الأنبوب الحراري لا يختلف أداؤه باختلاف زاوية ميلانه على الأفق.

الكلمات المفتاحية: السيفون الحراري (الترموسايفن)، الأنبوب الحراري، وحدات التكييف والتدفئة، الأفران الصناعية.

Using Heat Pipe Properties as Heat Exchanger in Heating and Cooling Processes

Dr. Bassam Badran*

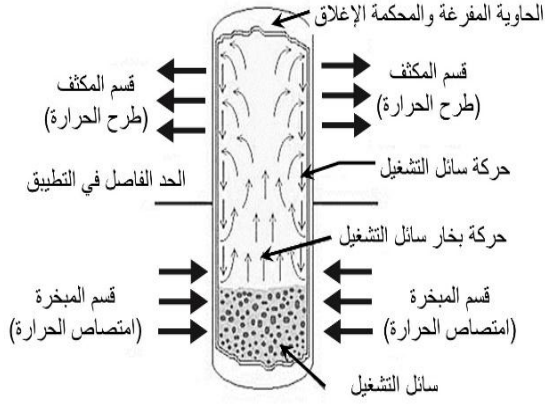
Abstract

In This research we have studied and compared the performance of heat pipe devices (with different working fluids) experimentally and we have found that these pipes are conserved in transporting the heat from one area to another. We have shown that the amount of heat transported changes with working fluid type and its pressure. We have proved that the heat pipe with R134A, as a working fluid, can be used in air handling units (AHUs) in exchanging heat between supply line and return line where the temperature of the pipe reached (30°C) and transported heat was (*50 watts*), and pure water can be used in recovering the wasted heat in industrial ovens where the temperature of the pipe was (135°C) and transported heat was (*170 watts*). We have proved experimentally that the heat pipe can perform regardless of its angle of inclination from the horizon.

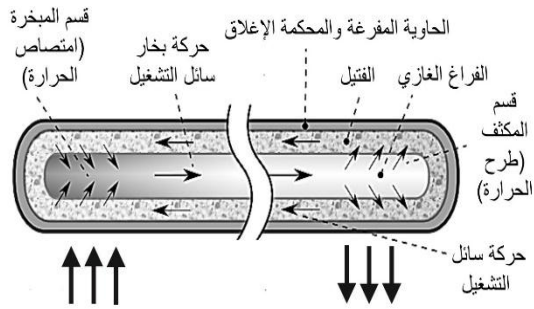
Keywords: Thermo-syphon, Heat pipe, Air Handling Units (AHUs), Industrial Ovens.

* Associate Prof, General Mechanical Engineering Depart – Faculty of Mechanical and Electrical Engineering.

1- المقدمة.



الشكل (1) السيفون الحراري (الثرموسايفن).



الشكل (2) الأنبوب الحراري (HP).

1-1 مواصفات الأنابيب الحرارية.

طرح مفهوم الأنبوب الحراري (HP) في عام 1944 من قبل Gaugler [7]، ومُنح من خلالها على براءة اختراع لاختراعه جهاز نقل للحرارة. في عام 1966، قام Grover [8] وزملاؤه في مختبرات Los Alamos بوضع تفاصيل الأنبوب الحراري بشكل كامل واستخدم من قبل وكالة ناسا NASA في التطبيقات الفضائية.

تعتمد الأنابيب الحرارية كلها على التحول ثنائي الطور من شكل سائل إلى شكل بخار (غاز)، وبالعكس وتتألف من الأقسام الرئيسية الآتية:

أصبحت الحاجة إلى طرائق جديدة في استرجاع الحرارة الضائعة من المهام الضرورية والأساسية في بناء الدارات والأجهزة المتقدمة في يومنا هذا للمحافظة على الطاقة وترشيدها. هناك كثير من الطرائق التي تُستخدم في عملية استرجاع الطاقة، ومنها استخدام خصائص الأنبوب الحراري كمبادل حراري يقوم على نقل كمية من الحرارة من مصدر حراري Heat Source إلى مصرف حراري Heat Sink دون فقدان أي جزء من هذه الطاقة، وبشكل فعال واقتصادي [1,2]. من أهم تطبيقات الأنبوب الحراري:

- استخدامه كمبادل حراري في نقل أو استرجاع الحرارة في مجال الطاقات المتجددة [3] وخصوصاً الطاقة الشمسية.
- استخدامه في استرجاع الحرارة الضائعة ضمن أنظمة التدفئة والتكييف المركزية، وخصوصاً وحدات معالجة الهواء Air Handling Unit, AHUs [4] حيث تسترجع حرارة الخط الراجع إلى خط التغذية أو بالعكس.
- استخدامه في نقل الحرارة وطرحها (كمبادل حراري) في الحواسيب والأجهزة الإلكترونية لتبريد المعالجات الدقيقة وطرح حرارتها إلى الوسط الخارجي [5].

يمكن تعرّف أنواع الأنبوب الحراري المستخدمة في التطبيقات الهندسية خلال السنوات الخمس الماضية من خلال المرجع [6]، إذ ينقسم الأنبوب الحراري إلى نوعين رئيسيين من حيث العمل، يسمى النوع الأول السيفون الحراري (الثرموسايفن) Thermo-syphon، كما في الشكل (1)، ويسمى النوع الثاني الأنبوب الحراري (HP) Heat Pipe، كما في الشكل (2).

هو فرق ضغط سائل التشغيل المتكون بين القسمين، والثاني هو القوى السطحية التي يولدها الفتيل WICK الموجود في الأنبوب الحراري. نلاحظ أن الدورة اكتملت بين حركة سائل التشغيل، وبخاره من دون وجود فعل فيزيائي طاقي (عمل مضخة مثلاً).

في هذا البحث اختبرنا أنبوباً حرارياً بأبعاد ثابتة باستخدام وسيطين تشغيليين هما الماء النقي، ووسيط التشغيل R134A، وحددنا كمية الحرارة التي يمكن لهذا الأنبوب أن ينقلها، ودرجات الحرارة الموافقة لها.

2- الإجراء التجريبي.

لمقارنة الأداء الحراري للأنبوب الحراري، بنينا تجربة تتألف من:

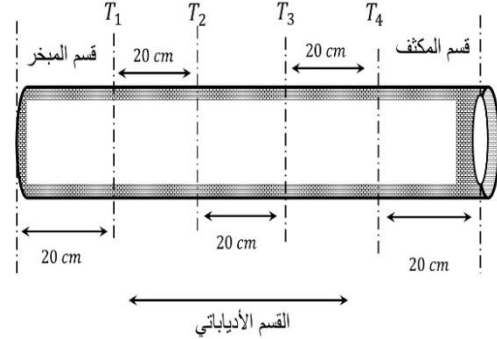
1. أنبوب نحاسي (عدد 2) بطول 1 متر مفرغ بقطر خارجي (0.018 m)، وداخلي (0.017 m) ويحتوي على فتيل من الستانلس ستيل.
2. ثُملاً الأنابيب بكمية معينة من سائل التشغيل، الأول بماء مقطر Distilled Water بكتلة (25 g)، والثاني بوسيط الفريون R134A بكتلة (200 g).
3. تُربط على قسم المبخر (المصدر الحراري)، في كلا الأنبوبين، مقاومة حرارية باستطاعة متغيرة، أمّا قسم المكثف (المصرف الحراري) فيربط بمروحة لطرح الحرارة القادمة من المبخر.
4. توضع مجموعة من الحساسات الحرارية طراز (PT100) لقياس درجات الحرارة على طول القسم الأدياباتي بأبعاد متساوية تساوي (20 cm)، يبيّن الشكل (3) توزع حساسات قراءة درجات الحرارة على طول الأنبوب الحراري، وأطوال كل من قسم المبخر والمكثف والأدياباتي في كل منهما.

1. قسم امتصاص الحرارة، ويسمى المبخر Evaporator.
2. قسم طرح الحرارة، ويسمى المكثف Condenser.
3. قسم يصل بين القسمين السابقين، ويسمى القسم الناقل Transport، أو القسم الأدياباتي Adiabatic. لا يجري في هذا القسم أي تبادل حراري مع الوسط الخارجي، وتكون درجات حرارة سطح الأنبوب متساوية على طوله.
4. قسم داخلي لنقل وسيط التشغيل بين المبخر والمكثف، ويسمى الفتيل Wick الذي يوجد في الأنبوب الحراري ولا يوجد في السيفون الحراري، (الثرموسايفن)، كما في الشكل (1) و(2).
5. وسيط التشغيل Working Fluid.
6. الأجسام الحاملة لسائل التشغيل، أو مايسمى الحاوية Container، أو الحاوية المفرغة والمحكمة الإغلاق [9]

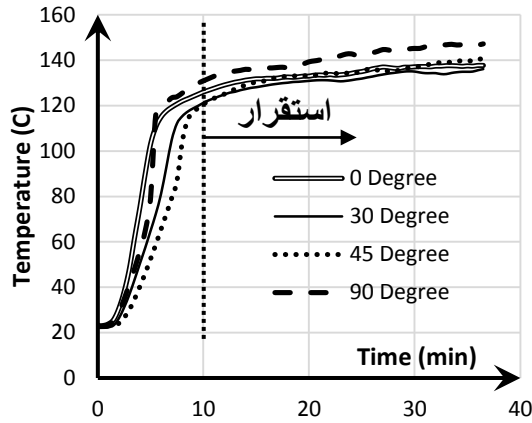
1-2 عمل الأنابيب الحرارية.

يقوم قسم المبخر على امتصاص كمية من الحرارة بواسطة فعل التوصيل الحراري عبر جدران الحاوية إلى سائل التشغيل الموجود بداخلها، مما يؤدي إلى غليانه، وتحوله إلى بخار فتتفقد كميته، وينقص ضغط السائل، ويرتفع ضغط البخار الموجود في هذا القسم. يبدأ البخار بالتحرك نحو قسم المكثف بسبب فرق الضغط المتشكل حاملاً معه الحرارة الممتصة (الحرارة الكامنة لسائل التشغيل). يصل البخار إلى قسم المكثف عبر القسم الأدياباتي، ويبدأ بالتكاثف بفعل طرح الحرارة إلى الوسط الخارجي، مما يؤدي إلى تناقص كمية البخار ومن ثمّ انخفاض ضغطه، وزيادة كمية سائل التشغيل ومن ثمّ ارتفاع ضغطه الستاتيكي. يبدأ سائل التشغيل بالتحرك إلى قسم المبخر بفعلين: الأول

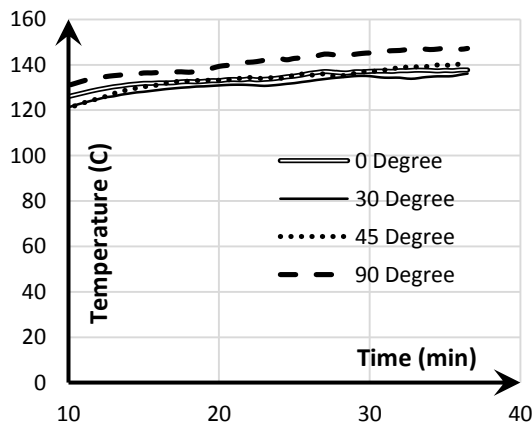
مستقر بين ($126^{\circ}\text{C} - 130^{\circ}\text{C}$) بعد 10 دقائق بصرف النظر عن زاوية ميلانه، وهذا يؤكد إمكانية عمل الأنبوب الحراري بأي وضعية كانت. فرق درجات الحرارة بين الحساس الأول (T_1) والحساس الأخير (T_4) تتراوح بين (0°C) و (4°C) فقط على طول (60 cm) من القسم الأديباتي، كما في الشكل (5).



الشكل (3) توزيع الحساسات على الأنبوب الحراري.



الشكل (4) توزيع درجات الحرارة على القسم الأديباتي في الأنبوب الحراري الذي يحتوي ماء نقياً مع الزمن.



الشكل (5) توزيع درجات الحرارة على القسم الأديباتي في الأنبوب الحراري بعد الاستقرار مع الزمن.

سجلت درجات الحرارة بواسطة جهاز تحصيل Data Acquisition System يقرأ درجات الحرارة الأربعة كل نصف دقيقة، وتظهر هذه القراءات على شاشة معينة مربوطة بجهاز التحصيل، وتخزن على الحاسب بشكل معطيات ضمن برنامج الإكسل لمعالجتها لاحقاً.

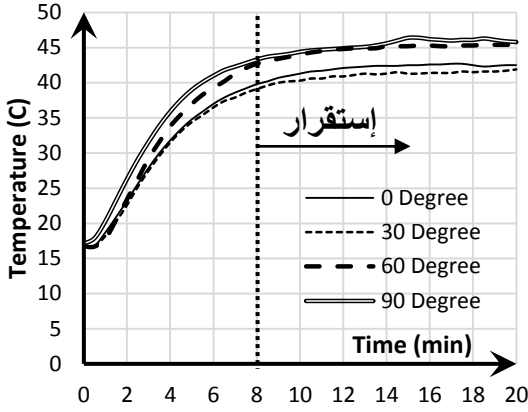
3- نتائج التجارب ومناقشتها.

شرحت النتائج للأنبوب الحراري بوضعية مختلفة لكلا الحالتين وحددت كمية الحرارة التي ينقلها ودرجات الحرارة الموافقة لها.

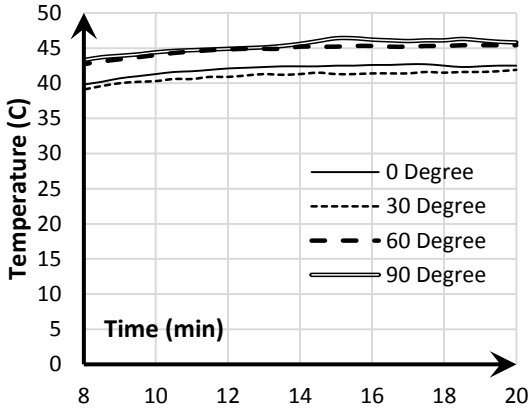
3-1 نتائج اختبار الأنبوب الحراري الذي يحتوي الماء النقي كوسيط تشغيل.

يبين الشكل (4) توزيع درجات الحرارة على طول القسم الأديباتي في الأنبوب الحراري (HP) مع الزمن باختلاف زوايا الميل (0, 30, 45, 90) على الأفق. ويتطبيق حمل حراري بقيمة (170 W). نلاحظ من الشكل (4) أن درجة الحرارة استقرت على طول القسم الأديباتي بعد 10 دقائق من تطبيق الحمل الحراري على قسم المبخر. أصبح الأنبوب الحراري يعمل بشكل

الحراري أصبحت تتراوح بين ($42^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}$) بعد مدة زمنية قدرها 20 دقيقة، وهذا أيضاً سببه الضياع الحراري (بسبب فعل الحمل الحراري) في القسم الأديباتي غير المعزول عن الوسط المحيط في التجربة.



الشكل (6) توزع درجات الحرارة على القسم الأديباتي في الأنبوب الحراري الذي يحتوي R134A مع الزمن.



الشكل (7) توزع درجات الحرارة على القسم الأديباتي في الأنبوب الحراري بعد الاستقرار الذي يحتوي R134A مع الزمن.

نلاحظ أيضاً أن درجة حرارة الأنبوب الحراري أصبحت تتراوح بين ($137^{\circ}\text{C} - 147^{\circ}\text{C}$) بعد مدة زمنية قدرها 40 دقيقة وهذا يعود إلى الضياع الحراري (بسبب فعل الحمل الحراري Heat Convection) في القسم الأديباتي غير المعزول عن الوسط المحيط في التجربة.

نستنتج أن الأنبوب الحراري الذي يحتوي على ماء نقي يعمل على نقل حرارة بقيمة (170 W)، وبدرجة حرارة تصل إلى (135°C) وسيطياً ومن ثم يمكن استعماله في استرجاع الحرارة الضائعة من غازات الاحتراق الخارجة من الأفران التقليدية التي تبلغ درجة حرارتها (180°C). فمثلاً إذا وجدت حزمة من الأنابيب بعدد 50 أنبوباً يمكننا أن نحصل على بطارية لاسترجاع الحرارة بإستطاعة 8.5 كيلوواط حراري لتوليد الطاقة الكهربائية.

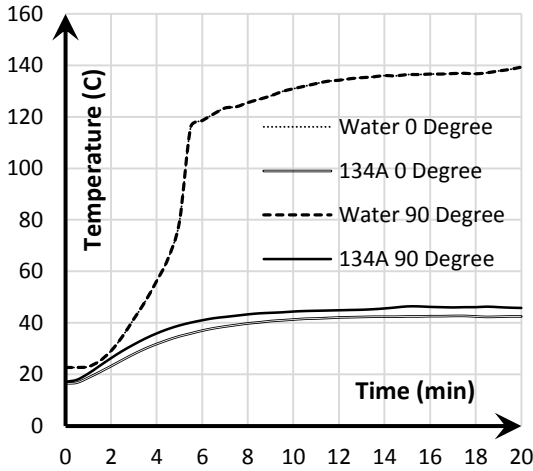
2-3 نتائج اختبار الأنبوب الحراري الذي يحتوي الفريون R134A كوسيط تشغيل.

يبين الشكل (6) توزع درجات الحرارة على طول القسم الأديباتي في الأنبوب الحراري (HP) مع الزمن باختلاف زوايا الميل ($0, 30, 45, 90$) على الأفق. بتطبيق حمل حراري بقيمة (150 W). نلاحظ من الشكل (6) أن درجة الحرارة استقرت بعد 8 دقائق من تطبيق الحمل الحراري على قسم المبخر، أصبح الأنبوب يعمل بشكل مستقر بين ($40^{\circ}\text{C} - 43^{\circ}\text{C}$) بعد 8 دقائق بصرف النظر عن زاوية ميلانه، وهذا يؤكد إمكانية عمل الأنبوب الحراري بأي وضعية كانت. فرق درجات الحرارة بين الحساس الأول (T_1) والحساس الأخير (T_4) تتراوح بين (0°C) و (2°C) فقط على طول (60 cm) من القسم الأديباتي، كما في الشكل (7). نلاحظ أيضاً أن درجة حرارة الأنبوب

3-3 المقارنة بين نتائج اختبار الأنبوب الحراري الذي يحتوي على الماء النقي، وعلى R134A بالوضع الأفقي والشاقولي فقط.

نلاحظ من الشكل (9) النتائج الآتية:

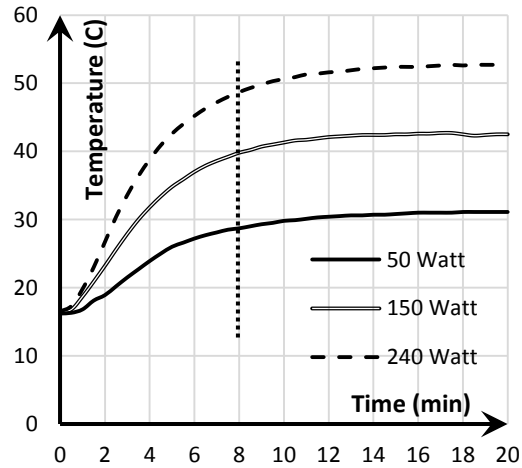
1. يوجد تطابق بين خطوط الماء النقي وخطوط الفريون لكلا الوضعين، وهذا يؤكد عمل الأنبوب الحراري وفعاليتيه بأي وضعية كانت.
2. تقارب زمن الاستقرار حيث الأنبوب ذات وسيط الماء النقي 10 دقائق في حين الأنبوب ذات وسيط التشغيل R134A هو 8 دقائق.
3. انخفاض درجة حرارة الأنبوب الحراري نتيجة تغير وسيط التشغيل، وهذا يتناسب ودرجة حرارة غليان وسيط التشغيل.



الشكل (9) مقارنة بين الأنبوب الحراري ذي وسائط مختلفة في الوضع الأفقي والشاقولي.

4. عمل الأنبوب في منطقة مزيج بخار - ماء أي هناك تحول طوري سائل - بخار والعكس على طول الأنبوب، فمثلاً كان الضغط المقيس في أنبوب وسيط الفريون عند (150 W)، وعند

يبين الشكل (8) توزيع درجات الحرارة على القسم الأديباتي في الأنبوب الحراري الذي يحتوي R134A لمجموعة من الطاقات (50 W)، و(150 W)، و(240 W) في الوضع الأفقي فقط، نلاحظ أن الأنبوب الحراري يعمل بشكل مستقر بعد 8 دقائق من تطبيق الحمل الحراري على قسم المبخر. الأنبوب يعمل على نقل كمية من الحرارة وقدرها (W) بدرجة حرارة (31°C)، كما يعمل على نقل كمية من الحرارة قدرها (150 W) بدرجة حرارة (43°C) كما يعمل على نقل كمية من الحرارة قدرها (240 W)، بدرجة حرارة (53°C).



الشكل (8) توزيع درجات الحرارة على القسم الأديباتي في الأنبوب الحراري الذي يحتوي على R134A مع الزمن. نستنتج أن الأنبوب الحراري الذي يحتوي على R134A يعمل بشكل مستقر على نقل كمية من الحرارة قدرها (50 W)، بدرجة حرارة (31°C) ومن ثم يمكن استعماله في وحدات معالجة الهواء في أنظمة التدفئة والتكييف في تبادل الطاقة بين خط تغذية الهواء وخط الراجع. فمثلاً إذا وجدت حزمة من الأنابيب بعدد 50 أنبوباً نحصل على بطارية لاسترجاع الطاقة الحرارية إلى خط التغذية باستطاعة 2.5 كيلوواط.

- VII. إن زمن الاستقرار صغير جداً بالمقارنة بعمليات نقل الحرارة (توصيل، حمل وإشعاع) ومن ثم يعتبر تجاوب الأنبوب لنقل الحرارة فعالاً جداً.
- الاستقرار (9.6 bar) اذ كانت درجة حرارة الأنبوب المقيسة في التجربة (40°C)، بإستعمال جداول الإشباع لوسيط التشغيل R134A [10]، نجد أن درجة حرارة الإشباع بدلالة الضغط هي (38°C)، وهذا يؤكد عمل الأنبوب في منطقة مزيج بخار - ماء. الفرق في درجات الحرارة بين الجداول والقياس يعود إلى الضياعات الموجودة في جدارن الأنبوب وفعل الحمل الحراري على طول القسم الأدياباتي.
5. يمكن نقل استطاعات مختلفة وبدرجات حرارة مختلفة لأنبوب واحد بحسب نوع وسيط التشغيل المستخدم ضمن الأنبوب.

4- النتائج والتوصيات.

- من خلال التجارب البسيطة التي أجريت في هذا البحث تبين لنا أن:
- I. يعتبر الأنبوب الحراري عنصراً فعالاً في نقل الحرارة من مكان إلى آخر بفعل التحول الطوري سائل - بخار، وليس بفعل التوصيل الحراري.
 - II. لا علاقة لزاوية ميلان الأنبوب بعمله.
 - III. تختلف درجة حرارة الأنبوب، تبعاً لوسيط التشغيل العامل ضمن الأنبوب وتتقارب مع درجة حرارة إشباعه.
 - IV. لا علاقة لطول الأنبوب بنقل الحرارة.
 - V. يمكن تبديل بين قسم المبخر والمكثف، وهذا لا يؤثر في عمل الأنبوب وفعالتيته.
 - VI. تنقل الحرارة بفعل فرق الضغوط، ولا توجد حاجة إلى صرف أي طاقة كهربائية على الأنبوب.

REFERENCES المراجع

- [1] Vasiliev, L. L., Grakovich, L. P., Kiselev, V. G., Matveev, Yu., Khrustalev, D. K., 1984, "Heat Pipes and Heat Pipe Exchangers for Heat Recovery," Journal of Heat Recovery, Vol. 4, Issue 4, Pages 227-233.
- [2] Chaudhry, H. N., Hughes, B. R., Ghani, S. A., 2012, "A Review of Heat Pipe Systems for Heat Recovery and Renewable Energy applications," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, Issue 4, Pages 2249-2259.
- [3] Fairuz, M., Date, A., Singh, B., Tan, L. Akbarzadeh, A., 2014, "Power Generation and Heat Recovery Using Heat Pipe Thermoelectric Generator (HPTEG)," Proceedings of the 52nd Annual Conference, Australian Solar Energy Society (Australian Solar Council) Melbourne, ISBN: 948-0-646-92219-5.
- [4] Berbari, G. J., Shakkour, S., Hashem, F., 2006, "Fresh Air Handling Units, Comparison and Design Guide," ASHRAE Journal, Vol. 49.
- [5] Singh, R., 2007, "Miniature Loop Heat Pipe with Flat Evaporator for Cooling Computer CPU," IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol 30, Issue 1, Pages 42-45.
- [6] Saffa, R., Ma, X, 2016, "Recent Developments in Heat Pipe Technology and Applications: a Review," International Journal of Low Carbon Technologies.
- [7] Gaugler, Richard, 1944, "Heat Transfer Devices". Dayton, Ohio: U.S. Patent Office. p. 4. 2350348.
- [8] Grover, George, 1966, "Evaporation – condensation Heat Transfer Device", US Patent, 3229759 A
- [9] Chen, T., Kim, J., 2010, "Heat Pipes and Thermosyphons," John Wiley.
- [10] Moran, J., Shapiro, N., 1992, "Fundamental of Engineering Thermodynamics," 2nd Edition, John Wiley.

| | | |
|--------------------|------------|------------------|
| Received | 2016/08/02 | إيداع البحث |
| Accepted for Publ. | 2017/04/27 | قبول البحث للنشر |