

استخدام الأنايبب الحرارية في أنظمة تكييف الهواء كمبادل حراري لاسترجاع الحرارة الضائعة

د. غسان مدلل*

الملخص

يسهم استرجاع الحرارة الضائعة إسهاماً كبيراً في تخفيض استهلاك الطاقة ويزيد من فعالية الأنظمة الحرارية، ولتحقيق ذلك استخدمت الأنايبب الحرارية في استرجاع الحرارة الضائعة، وهي من أكثر الأجهزة فعالية إذ لها قدرة كبيرة على نقل الحرارة فضلاً عن بساطتها في التصميم. في هذا البحث دُرِسَ وصُمِّمَ واختُبِرَ مبادل حراري (من الهواء إلى الهواء) ذو أنابيب حرارية عاملة على وسيط الميثانول عند شروط حرارية تشغيلية تراوح بين 15 - 55 م°؛ وذلك لاستخدامها في أنظمة التكييف التي تحتاج إلى كميات كبيرة من الهواء الجديد مثل المشافي والمخابر حيث تحتاج إلى معدل تبديل للهواء يصل إلى 40 مرة بالساعة من حجم المكان المكيف. فقد كانت الحرارة الممتصة في الجزء التبخيري من المبادل الحراري قريبة من معدلات انتقال الحرارة المقبولة

الكلمات المفتاحية: استرجاع الحرارة، الأنايبب الحرارية، مبادلات الأنايبب الحرارية، أنظمة التبريد وتكييف الهواء.

* قسم الميكانيك العام - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

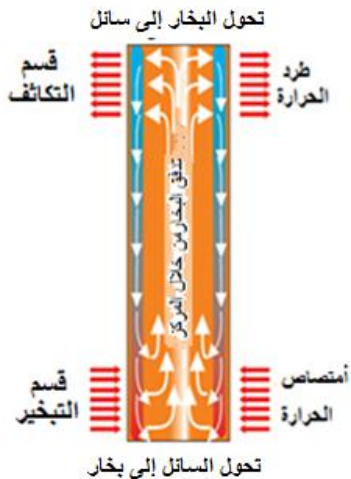
المقدمة:

إنَّ البناء والتصميم المناسبين للأنابيب الحرارية معقد إذ يجب التحكم في كثير من البارامترات. لذا فإن التحقق التجريبي مهم جداً.

اختيرت في هذا البحث وبشكل أولي مادة وأبعاد الأنابيب والسائل العامل المتوافق مع الأنابيب والفتيل داخل الأنابيب (خصائص التصميم للفتيل من الستانلس ستيل) وثلاثة أنواع من السوائل العاملة (الميثانول والماء والأسيتون) وأجريت المحاكاة لأنبوب وحيد من خلال برنامج حاسوبي وبمعدل تدفق حراري لمقطع التبخير يراوح بين ($20\text{ W} \leftarrow 40\text{ W}$) ثم استخدمت المعطيات المستخلصة من البرنامج في بناء الأنابيب الحرارية وفي بناء مبادل حراري ذي الأنابيب الحرارية كمسترجع للحرارة باستطاعة 800 W

محاكاة الأنبوب:

يمكن فهم عمل الأنبوب الحراري بسهولة باستخدام الشكل الأسطواني كما في الشكلين (1-أ و 1-ب) إذ عناصر الأنبوب الحراري هي وعاء محكم من نهايته (أنبوب مع نهايات محكمة) وفتيل مع قليل من السائل العامل بحالته السائلة ومتوازن مع بخاره.



الشكل (1 - أ) مخطط تفصيلي يبين مبدأ عمل الأنبوب الحراري

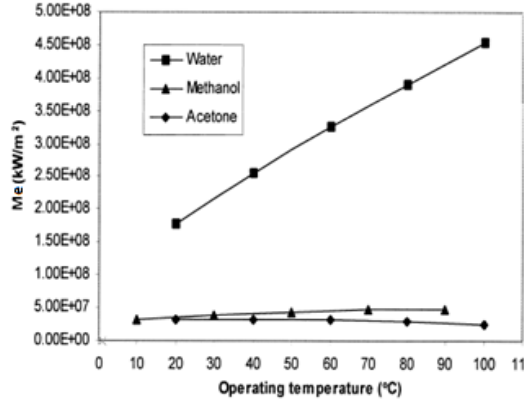
إن المبادلات الحرارية المصنعة من الأنابيب الحرارية هي واحدة من أكثر الأجهزة فعالية في استرجاع الحرارة الضائعة. ومن أهم ميزات الأنابيب الحرارية تفوقها على الطرائق التقليدية في عملية استرجاع الحرارة من حيث نقل كمية كبيرة من الحرارة عبر سطح تبادل صغير من دون زيادة في استهلاك الطاقة للنظام، فضلاً عن البساطة في التصميم والتصنيع، كما أن مجال عملها الحراري واسع ومعدلات انتقال الحرارة فيها عالية ضمن مستويات متنوعة في درجات الحرارة، وهذا يعدُّ ميزة فريد للأنابيب الحرارية [1,2,3]، كما يمكن عدُّ شروط التشغيل لهذه الأنابيب بسيطة.

منذ إدخال الأنابيب الحرارية عام 1964 وجد لها العديد من التطبيقات مثل التبريد في الطائرات [4,5] وفي التجهيزات الكهربائية والإلكترونية [6,7] وفي مجال الطب والتحكم بحرارة جسم الإنسان [8,9]. واستخدمت كمبادلات حرارية في استرجاع الحرارة في كثير من التطبيقات [10,11,12,13].

إن استخدم الأنابيب كمبادلات حرارية سوف يقلل ويشكل أساسي من الطاقة المستهلكة، ومن ثمَّ يُقلَّل من انبعاث أكسيد الكربون. فقد أُنتجت الأنابيب الحرارية في منتصف السبعينيات، ومنذ ذلك الحين وجد لها العديد من التطبيقات في المجالات الصناعية. ويمكن تقسيم المبادلات الحرارية ذات الأنابيب الحرارية إلى ثلاث فئات:

- 1- استرجاع الحرارة في أجهزة تكييف الهواء.
- 2- استرجاع الحرارة من غازات العادم لتسخين الهواء اللازم لتدفئة حجرة الطائرات داخلياً.
- 3- استرجاع الحرارة من العادم في العمليات الحرارية لإعادة استخدامها في العمليات ذاتها.

تظهر النتائج المبينة في الشكل-2 تفوق الماء ومن ثم الميثانول على الأسيتون، [2]، [17].

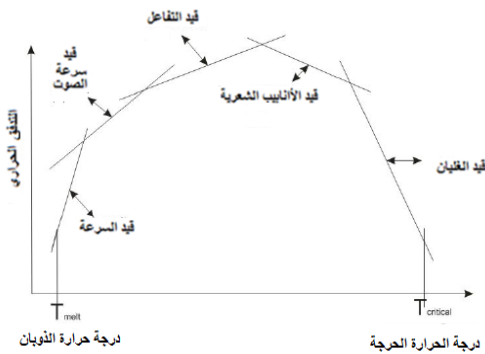


الشكل-2: العلاقة بين رقم الجدار ودرجة حرارة التشغيل للسوائل

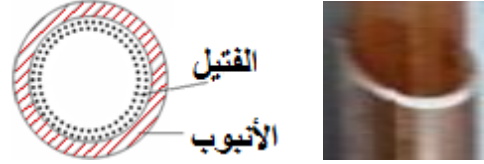
تقييم الأنابيب الحرارية

لتقييم أداء الأنابيب الحرارية يجب الأخذ بالحسبان بعض القيود [17] و[21] الموضحة في الشكل-3 ومنها:

- 1- درجة حرارة الذوبان: إذ لا يمكن استخدام وسيط التبريد تحت هذه الدرجة.
- 2- درجة حرارة الغليان ودرجة الحرارة الحرجة. لا يمكن تجاوز درجة الحرارة الحرجة.
- 3- اللزوجة: إذ يزداد تأثيرها في تدفق السائل المتكاثف كلما انخفضت درجات الحرارة.



الشكل - 3: القيود التي تحدد مجال عمل الوسائط



الشكل (1 - ب) - مقطع يبين الفتيل ضمن الأنبوب

فُسِّمَ الأنبوب إلى ثلاثة أقسام:

(قسم التبخير - القسم الاديياني - قسم التكاثف)

والمبادئ الأساسية لاختيار المقاطع الثلاثة مشروحة في المرجع [2]، كما أن المعادلات المستخدمة في البرمجة الحاسوبية واختيار الفتيل ومادة الأنابيب اعتمدت على معايير مشروحة في المرجع [2].

اختيرت أنابيب من النحاس بقطر 15 mm وقطر داخلي 9 mm وطول 600 mm وفتيل عبارة عن شبكة من الستانس ستيل، واستُخدمت ثلاثة أنواع من السوائل العاملة (الميثانول والماء والأسيتون) [1]، حيث درجات الحرارة العاملة (15-55°C).

من خلال محاكاة الحاسوب بُحِثَتْ خصائص التصميم للأنابيب وعدد الفتائل والحجم والضغط وشروط انتقال الحرارة والوسائط العاملة. ولتقييم النموذج المعتبر في مجال درجات حرارة التبخر استُخدمَ Merit-Number (رقم الجدارة) ويشار إليه اختصاراً بـ Me ويعطى بالعلاقة الآتية:

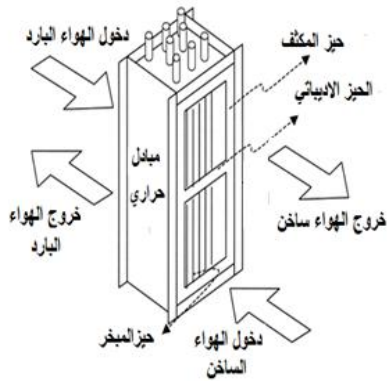
$$Me = \frac{\rho_1 \sigma_1 h_{fg}}{\mu_1} \quad [2]. \quad \text{إذ يُسمح رقم الجدارة هذا}$$

بمقارنة السوائل الثلاثة إذ إنّه يدرس ارتباط كل من اللزوجة والشد السطحي وحرارة التبخر فضلاً عن الكثافة الوسيط الناقل للحرارة، فكلما كانت قيمة أكبر دلّ ذلك على الأفضلية في اختيار الوسيط الناقل للحرارة ضمن الأنابيب الحرارية، كما في الشكل -2.

- طول كل من المبخر والمكثف 300 mm.
 - الفتيلة التي تعمل عمل الأنايبب الشعري هي عبارة عن شبكة من الستانلس ستيل.
 - عدد طبقات الفتيل واحدة.
 - الاستطاعة المطلوبة من الأنايبب 100 W.
- صُنعتْ ضمن الشروط السابقة 8 أنابيب وتشمل هذه العملية تنظيف الأنايبب وغسله وإدخال الشبكة (الفتيل) ثم عمل تخليه للأنايبب ثم حقن السائل العامل ثم اختبار كل من الأنايبب الثمانية، وكانت النتائج جيدة.

بناء التجربة:

بُنِيَ النموذج لاختبار فعالية هذه الأنايبب وصلاحياتها في نقل الحرارة من الهواء وإلى الهواء واختبار عمل هذه الأنايبب كمبادل حراري، والنموذج مبين بالشكلين 4 و5.



الشكل 4: مبادل حراري ذو أنابيب حرارية

يشتمل التصميم على 8 أنابيب ضمن الترتيب الآتي:

- ثلاثة صفوف من الأنايبب.
- الأنايبب متوضعة بشكل شطرنجي.
- الوسيط العامل ميثانول.
- الأنايبب نحاسية مسحوبة ويقطر خارجي 15 mm، وقطر داخلي 9 mm.

والجدول (1) يوضّح المجال التطبيقي لعمل مجموعة من الوسائط الناقلة للحرارة [21]

الجدول(1): المجال التطبيقي لبعض الوسائط الناقلة للحرارة

مجال العمل المناسب °C	درجة الغليان عند الضغط الجوي °C	درجة الذوبان °C	الوسيط العامل
-271 -269	261-	271-	هليوم
160 -203	196-	210-	نتروجين
100 -60	33-	78-	أمونيا
120 -0	57	95-	اسيتون
130 -10	64	98 -	ميثانول
130 -0	78	112 -	إيثانول
200 -30	100	0	ماء

شروط عمل الأنايبب الحرارية:

إنّ الأنايبب الحرارية عبارة عن أجهزة فعالة في انتقال الحرارة، وتختلف خصائصها بحسب وسيط التشغيل العامل فيها. إذ يجب تحديد شروط عملها، بحيث تعطي أقصى معدل انتقال حراري عند درجات الحرارة التشغيلية . عند شروط العمل وهي 80 °C كحد أقصى فإن ضغط البخار للميثانول هو 2.3 bar، لذا اعتمدت سماكة الأنايبب 3 mm للأمان.

من الضروري اختيار أنابيب قادرة على نقل 100 W أدنى عند مجال عمل 15-55 °C

اختيرت من خلال محاكاة الحاسوب الأنايبب ضمن مجال 100-400 W واستناداً إلى معدل تدفق حراري مرغوب فيه 100 W.

صممت الأنايبب الحرارية بالمواصفات الآتية:

- مادة الأنايبب النحاس.
- القطر 15 mm والسماكة 3 mm.
- الطول 600 mm.

(قيست درجات الحرارة بواسطة ثيرموكابل) مع مقياس رقمي (1) كما في الشكل-5.

يبين الشكل-6: تغير درجات حرارة الهواء بين تيارتي الهواء الساخن والبارد؛ وذلك خلال مرورهما على المبادل الحراري. حُسِبَ معدل انتقال الحرارة في كل من المبخر والمكثف بالاعتماد على تدفق الهواء الساخن والبارد كما يأتي:

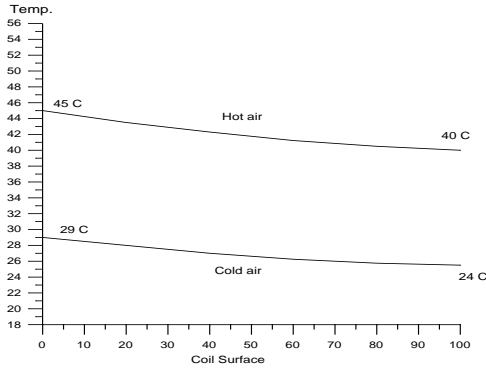
$$q_e = m_h \cdot C_p \cdot (T_{e,in} - T_{e,out}) = \rho \cdot V \cdot A \cdot C_p \cdot (T_{e,in} - T_{e,out})$$

$$q_e = 1000 \times 1.2 \times 2.5 \times (0.15 \times 0.3) (45 - 40) = 675 \text{ W}$$

$$q_c = m_c \cdot C_p \cdot (T_{c,in} - T_{c,out}) = \rho \cdot V \cdot A \cdot C_p \cdot (T_{c,in} - T_{c,out})$$

وبالتجربة وجد أن معدل انتقال الحرارة لكل أنبوب هو:

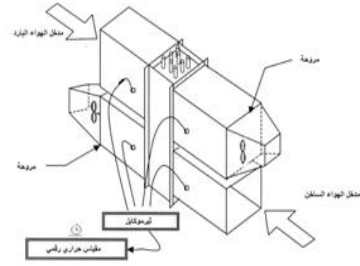
$$\frac{675}{8} \approx 84.4 \text{ W}$$



الشكل-6: تغير درجة حرارة الهواء ضمن المبادل الحراري

إن فعالية المبادل الحراري تعرف كنسبة المعدل الحقيقي لانتقال الحرارة إلى القيمة العظمى الممكنة انتقالها بين تيارتي الهواء [14-16]. تعطى الفعالية الحرارية بافتراض عدم تكاثف الماء وثبات الحرارة النوعية لتيار الهواء خلال المبادل كما يأتي:

$$\varepsilon = \frac{q_{act}}{q_{max}} = \frac{(T_{e,in} - T_{e,out})}{(T_{e,in} - T_{c,in})} = \frac{45 - 40}{45 - 24} = 0.238$$



الشكل 5: جهاز اختبار منظومة الأنابيب الحرارية

استخدم مبخر ومكثف بطول 300 mm لكل منهما، وأبعاد النظام (150×150×600 mm) مع صفائح من الفولاذ المغلفن، ويضم النموذج مروحتين واحدة لدفع الهواء عبر المبخر وأخرى لدفع الهواء عبر المكثف ومعدل تدفق الهواء 405 m³/h وسرعة تدفق 2.5m/s. قيسَت سرعة الهواء على مدخل الهواء الساخن والبارد بواسطة جهاز قياس السرعة وهو مقياس توربيني مزود بشاشة عرض رقمية لقياس السرعة، ومن أجل قياس درجات الحرارة استخدمنا ثيرموكابل مرتبط بجهاز عرض رقمي. فقد سُخِّنَ الهواء المار من خلال المبخر بواسطة ثلاث وشائع تسخين باستطاعة إجمالية 1500 W. بعد إعطاء قسم من هذه الحرارة الهواء يطرد إلى الجو الخارجي.

النتائج والمناقشة:

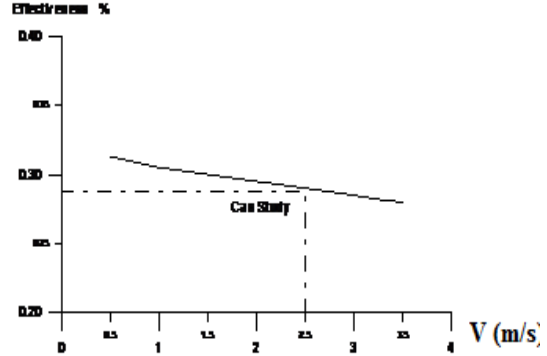
أجريت سلسلة من التجارب لفحص خصائص هذه الأنابيب وعملها كمبادل حراري؛ وذلك بدفع الهواء عبر الأنابيب الحرارية ويتدفق ثابت ونظراً إلى أن التصميم مخصص للاستخدام في تكييف الأماكن التي تحتاج إلى كميات كبيرة من الهواء الجديد، مثل غرف العمليات فإن مجال الاختبار لدرجات حرارة الهواء الخارجي كان (40°-50°C) والهواء الداخلي (22°-26°C).

إن متوسط درجات حرارة تيار الهواء الساخن 45°C للدخول و40°C للخروج والتيار البارد 4°C للدخول و29°C للخروج.

حيث يبرد الهواء الخارجي الساخن من النقطة A إلى النقطة B في أثناء مروره في حيز المبخر معطياً حرارته للوسيط الناقل للحرارة (ميثانول)، أما هواء الغرفة البارد قبل أن يطرد خارجاً فيستفاد منه في تكثيف الوسيط الناقل للحرارة ضمن الأنابيب الحرارية حيث يمرر في حيز المكثف للمبادل الحراري فيسخن من النقطة C إلى النقطة D.

يمكن وضع الأنابيب الحرارية كما في الشكل-9 بشكل ملفت حول وشيعة التبريد، إذ يقع الجزء التبخيري من الأنبوب قبل الوشيعة وجزء التكاثف بعد الوشيعة في وحدات المعالجة (عند مرور الهواء في الجزء التبخيري يعطي حرارته للوسيط داخل الأنابيب فيبرد الهواء دون أن نخسر عليه طاقة، "الإجراء AB" ثم يمر الهواء على وشيعة التبريد لتستمر عملية تبريده، بعد خروج الهواء من وشيعة التبريد يمر الهواء مجدداً على جزء التكاثف من الأنبوب الحراري مما يسبب تكاثف بخار وسيط التبريد داخل الأنبوب وارتفاع حرارة الهواء الخارج من وشيعة التبريد "الإجراء CD" أما "الإجراء DC" فيكون (في وشيعة التبريد) مما يسمح بالحصول على تبريد أولي للهواء قبل مروره على وشيعة التبريد، ومن ثم يُعاد تسخين الهواء بعد مروره عبر وشيعة التبريد كما هو موضح بالشكل-10، وهذا الترتيب يؤدي إلى تخفيض استطاعة وشيعة التبريد، وومن ثمَّ إلى توفير في الطاقة المستهلكة كما هو موضح على المخطط السايكومتري.

دُرِسَتْ فعالية المبادل الحراري ذي الأنابيب عند سرعات هواء مختلفة، والنتائج موضحة كما بالشكل-7.



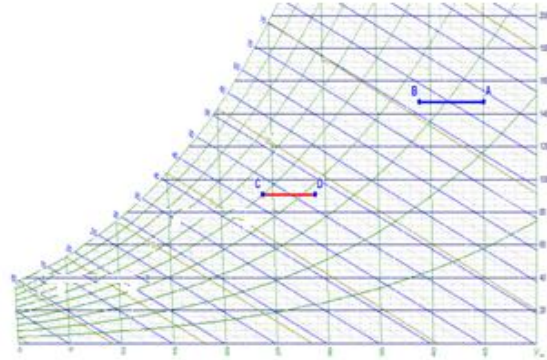
الشكل-7: الفعالية الحرارية للمبادل الحراري مع سرعة الهواء

يعزى انخفاض الفعالية في حالتنا هذه لعدة أسباب:

- عدم وجد ريش على الأنابيب.
 - المسافة بين الأنابيب بالنسبة إلى قطر الأنبوب كبيرة.
- تجدر الملاحظة إلى أن الفعالية تزداد مع انخفاض سرعة الهواء المار عبر المبادل الحراري.

تمثيل الإجراء في المخطط السايكومتري:

يوضح الشكل-8 العمليات السايكومترية على الهواء في أثناء مروره على المبادل الحراري (ذي الأنابيب الحرارية) صيفاً.



الشكل - 8: تمثيل العملية السايكومترية للهواء في أثناء مروره على الأنابيب الحرارية صيفاً

- إحكام الأنابيب بحيث تحافظ على الوسيط الناقل للحرارة والضغط المناسب بداخلها.
- إن استخدام الأنابيب الحرارية في وحدات معالجة الهواء يسمح بتخفيض الاستطاعة المطلوبة من هذه الوحدات.

Nomenclature

A - مساحة مجرى الهواء (m^2)

C_p - الحرارة النوعية للهواء ($kJ/kg K$)

hfg (kJ/kg) الحرارة الكامنة لتبخير وسيط التبريد

m- تدفق كتلي للهواء (kg/s)

Me - قم الجدار (kW/m^2)

q_{act} - معدل انتقال الحرارة الفعلي (kW)

q_c - معدل انتقال الحرارة من المكثف (kW)

q_e - معدل انتقال الحرارة من المبخر (kW)

q_{max} - معدل انتقال الحرارة الأعظمي (kW)

T_c - درجة حرارة الهواء في حيز التكثف ($^{\circ}C$)

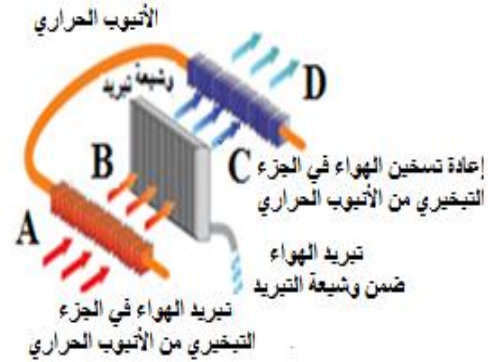
T_e - درجة حرارة الهواء في حيز التبخير ($^{\circ}C$)

μ_l - لزوجة السائل ($kg/m s$)

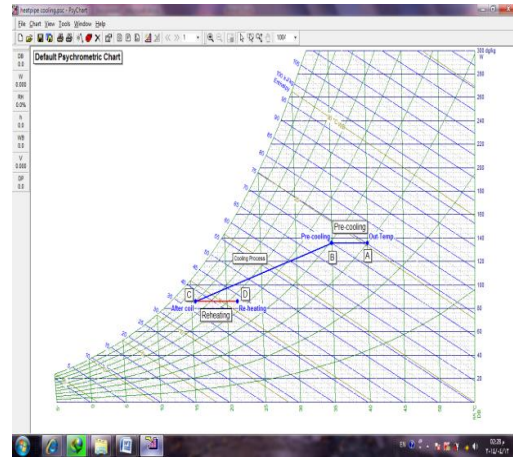
ρ_l - كثافة السائل (kg/m^3)

ρ_v - كثافة البخار (kg/m^3)

σ_l - الشد السطحي (N/m)



الشكل - 9: توضع الأنابيب الحرارية حول وشيعة التبريد



الشكل - 10: العملية التبريدية بوجود أنابيب حرارية

قبل وشيعة التبريد وبعدها

حيث يبرد الهواء من الحالة A إلى الحالة B في أثناء مروره على الأنابيب الحرارية، ويعاد تسخينه من الحالة C إلى الحالة D، من دون استهلاك أي نوع من الطاقة

الخلاصة:

- يمكن زيادة فعالية المبادل الحراري كما يأتي:
- بإضافة أنابيب مريشه وتقليل الخطوة فيما بينها.
- تقليل سرعة تدفق الهواء فوق الأنابيب.
- زيادة عدد الصفوف.
- عزل النظام عزلاً جيداً.

- [14] J.O. Tan, C.Y. Liu, Predicting the performance of a heat pipe heat exchanger using the NTU method, *Intl. J. Heat Fluid Flow* 11 (4) (1990) 376±379.
- [15] W.M. Kays, A.L. London, *Compact Heat Exchanger Design*, third ed., McGraw-Hill, New York, 1984.
- [16] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, third ed., John Wiley and Sons, Toronto, 1996.
- [17] S.H. Noie-Baghban, G.R. Majideian Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospitals. *Applied Thermal Engineering* 20 (2000) 1271±1282
- [18] A Meyer, R T Dobson. A heat pipe heat recovery heat exchanger for a mini-drier *Journal of Energy in Southern Africa* • Vol 17 No 1 • February 2006
- [19] F. Song, D. Ewing, C.Y. Ching . Heat transfer in the evaporator section of moderate-speed rotating heat pipes *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51 (2008) 1542–1550
- [20] M. Shafahi, V. Bianco, K. Vafai ,O. Manca. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010) 1438–1445
- [21] Fabian Korn " Heat pipes and its applications" 2008 MVK160 Heat and Mass Transport May 07, 2008, Lund, Sweden. Report

References*

- [1] A. Faghri, *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor & Francis, USA, 1995.
- [2] P.D. Dunn, D.A. Reay, *Heat Pipes*, third ed., Pergamon Press, 1994.
- [3] J.G. Marten Terpstra, Van Vean, *Heat Pipes Construction and Application*, Elsevier Applied Science, London, New York, 1987.
- [4] R. Brown et al., Performance evaluation of the grumman prototype space erectable radiator system, AIAA Paper No. 90-1766 (1990).
- [5] R. Brown et al., Design of the SHARE II Monogroove Heat Pipe, Proc. AIAA 26th Thermophysics Conference, Paper No. AIAA 91-1359 (1991).
- [6] L.L. Vasilier, et al., Heat pipes for electronic equipment cooling systems, in: Proc. 7th Int. Heat Pipe Conference, Minsk, USSR, 1990.
- [7] A. Basiulis, et al., Heat pipes for cooling of high density printed wiring board, in: Proc. 6th Int. Heat Pipe Conf., Grenoble, France, 1987, pp. 685±691.
- [8] A. Faghri, et al., Heat pipes for hands, *Mech. Eng.* 111 (6) (1989) 72±75.
- [9] A. Faghri, Temperature Regulation System for the Human Body Using Heat Pipes, US Patent 5,269,369 Issued Des. 14 (1993).
- [10] G. Liu, et al., The application of heat pipe heat exchanger in exhaust gas heat recovery system and its thermodynamic analysis, in: 8th Int. Heat Pipe Conference, Beijing, China, 1992, pp. 582±585.
- [11] J.Y. Sun, R.J. Shyu, Waste Heat Recovery Using Heat Pipe Heat Exchanger for Industrial Practices, in: Proc. 5th Int. Heat Pipe Symposium, Melbourne, Australia, 1996.
- [12] V. Dube, I. Sauciuc, A. Akbarzadeh, Design Construction and Testing of a Thermosyphon Heat Exchanger for Medium Temperature Heat Recovery, in: Proc. 5th Int. Heat Pipe Symposium, Melbourne, Australia, 1996.
- [13] W.U. Xiau Ping, P. Johnson, A. Akbarzadeh, A study of heat pipe heat exchanger electiveness in an air conditioning application, in: Proc. 5th Int. Heat Pipe Symposium, Melbourne, Australia, 1996.