المبادل الحراري الاسترجاعي الصفائحي وملاءمته للعمل في دارة تبريد تبخيري تجفيفي[1]

المهندس خالد القزح[2] الدكتور المهندس علي سلامي[3]

الملخص

خلال العقود الأخيرة ازداد الطلب على الطاقة الكهربائية لأغراض التكييف في سورية، يمكن استخدام دارات التبريد التبخيري التجفيفي DEC للتغلب على هذه المشكلة وذلك نظراً لما يأتي: 1- عدم حاجة هذه الدارات إلى الطاقة الكهربائية إلا في حدود ضيقة 2- إمكانية استخدام الطاقة الشمسية 3- عدم الحاجة إلى درجات حرارة مرتفعة للمصدر الحراري المحرك مما ينفي السلبيات السابقة في استخدام الطاقة الشمسية لأغراض التكييف باستخدام آلات التبريد الامتصاصية 4- التناسب الطردي بين توافر الطاقة الشمسية والحاجة إليها لأغراض تكييف الهواء صيفاً ، والبحث الحالي هو مساهمة في العمل على نشر هذه التقانات في سورية من خلال دراسة بعض عناصر دارة DEC وتصميمها واختبارها وملاءمتها للعمل بوصفها جزءاً من الدارة.

يتألف البحث من قسمين رئيسين ، القسم الأول يتضمن تقانات التبريد التبخيري التجفيفي أما القسم الثاني فيتضمن تصميم المبادل الحراري الاسترجاعي الصفائحي و نتائج الاختبارات ومناقشة النتائج و الاستنتاجات، تم تصنيع المبادل الحراري الاسترجاعي الصفائحي في مختبرات كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية بجامعة دمشق و أجريت تجارب لاختبار أداء المبادل ضمن دارة DEC كما تم اختبار أداء المبادل الحراري الاسترجاعي في حالة عمله ضمن دارة تكييف الهواء وحساب مقدار التوفير في الاستطاعة المطلوبة من وحدة التكييف.

[1] أعد هذا البحث في سياق رسالة الماجستير للمهندس خالد القزح بإشراف الدكتور المهندس علي سلامي.

[2] قسم الميكانيك العام– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق.

[3] قسم الميكانيك العام– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق.

النتائج: من أجل القيمة الفعلية لمردود المبادل الحراري $\varepsilon = 79\%$ فإن قيمة الإنتاجية التبريدية النوعية لدارة DEC تساوي $q_o = 9.63[kj/kg]$ و كمية الحرارة اللازمة لإعادة تنشيط المجفف $q_{reg} = 19.896\ [kj/kg]$ و معامل أداء دارة DEC يساوي $cop = 0.484$ ومن أجل القيمة النظرية لمردود المبادل الحراري $\varepsilon = 87\%$ فإن قيمة الإنتاجية التبريدية النوعية لدارة DEC تساوي $q_o = 12.979[kj/kg]$ و كمية الحرارة اللازمة لإعادة تنشيط المجفف تنخفض لتصبح $q_{reg} = 18.313\ [kj/kg]$ و معامل أداء دارة DEC يساوي $cop = 0.709$، إن استخدام المبادل الحراري الاسترجاعي مع وحدة تكييف الهواء يمكننا من توفير ما بين (52% ÷ 61%) من استطاعة وحدة التكييف.

المناقشة: إن مردود المبادل الحراري يؤثر بشكل كبير في كل من الإنتاجية التبريدية و كمية حرارة إعادة التنشيط و معامل الأداء لدارة DEC فازدياد مردود المبادل الحراري الاسترجاعي يؤدي إلى ازدياد ملحوظ لمعامل أداء دارة DEC، إن الاستطاعة التبريدية المطلوبة من وحدة تكييف الهواء مع استخدام مبادل حراري استرجاعي هي أصغر من نصف الاستطاعة المطلوبة من وحدة تكييف الهواء التي لا نستخدم معها مبادلاً حرارياً استرجاعياً.

الكلمات المفتاحية: التبريد التبخيري التجفيفي ، المبادلات الحرارية الاسترجاعية

مقدمة:

خلال العقود الأخيرة ازداد الطلب على الطاقة الكهربائية لأغراض التكييف في سورية: ففي القطاع السكني لم يعد التكييف من الأمور الكمالية بل أصبح حاجة أساسية، و خاصة مع تغييرات المناخ والارتفاع الملحوظ لدرجات الحرارة بالإضافة إلى تحسن المستوى المعاشي للمواطنين، وانتشار تقانات التبريد بأسعار أصبحت في متناول معظم المواطنين وفي القطاعات الإنتاجية. ونتيجة لتطور وسائل الإنتاج و طرائقه والتقانات وحساسيتها وحاجتها للتكييف بالإضافة إلى الحاجة لتأمين الراحة الحرارية للإنسان العامل؛ وذلك للحفاظ على إنتاجيته عند سوية جيدة ، يمكن استخدام دارات التبريد التبخيري التجفيفي للتغلب على مشكلة ازدياد الطلب على الطاقة الكهربائية لأغراض التكييف وذلك نظراً لما يأتي:

أ– عدم حاجة هذه الدارات للطاقة الكهربائية إلا في حدود ضيقة.

ب– إمكانية استخدام الطاقة الشمسية.

ج– عدم الحاجة إلى درجات حرارة مرتفعة للمصدر الحراري المحرك مما ينفي السلبيات السابقة في استخدام الطاقة الشمسية لأغراض التكييف باستخدام آلات التبريد الامتصاصية.

د– التناسب الطردي بين توافر الطاقة الشمسية والحاجة لها لأغراض تكييف الهواء صيفاً.

إن مكونات دارات التبريد التبخيري التجفيفي بسيطة ويمكن إنتاجها في سورية فهي لا تحتاج إلى تقانات عالية، ومن ثَمَّ يمكن توفير مبالغ كبيرة تصرف على استيراد آلات التبريد التقليدية، وتوفير تكاليف بناء محطات توليد الطاقة الكهربائية اللازمة و استثمارها لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية لأغراض التكييف.

والبحث الحالي هو مساهمة في العمل على نشر هذه التقانات في سورية من خلال دراسة بعض عناصر دارات التبريد التبخيري التجفيفي وتصميمها واختبارها

وملاءمتها للعمل بوصفها جزءاً من الدارة، وهو تمهيد لتصميم نظام مخبري متكامل لدارة تبريد تبخيري تجفيفي و تصنيعه و اختباره، يستخدم الطاقة الشمسية لأغراض التكييف ويسمح بإجراء دراسات متعددة في هذا المجال.

1- الأسس الفيزيائية والترموديناميكية لـ DEC:

ظهر نظام التبريد التجفيفي التبخيري (DEC) كنظام صديق للبيئة و للإنسان بديلاً لنظام آلات التبريد الميكانيكية في مجال تكييف الهواء، يمكن أن تكون المجففات المستخدمة في دارات الـ DEC صلبة أو سائلة إما كوحدات مستقلة أو مساعدة لدارات تكييف الهواء التقليدية.

إن اعتماد آلات التبريد الميكانيكية على مواد كيميائية مثل الفريونات والتي تطلق عند إنتاجها واستخدامها موادَّ تسهم في استنفاذ طبقة الأوزون وارتفاع درجة حرارة الجو المحيط بالأرض، بالإضافة إلى الحاجة للحفاظ على الطاقة الكهربائية أدى إلى البحث عن تقانات تبريد بديلة.

واحد من هذه التقانات هو التبريد التبخيري الذي يتم بشكل رئيسي نتيجة لتبخير الماء في الهواء، ومن ثَمَّ فإن درجة الحرارة الرطبة للهواء تحدد درجة حرارة الهواء المعالج الذي سيغذي المكان المكيف ومن ثَمَّ الاستطاعة التبريدية التي يمكن الحصول عليها. إن التبريد التبخيري هو بسيط جداً ومنخفض التكاليف وواسع الاستخدام في المناطق الجافة، وهو يمتاز بانخفاض تكاليف الصيانة لأنه يعمل عند الضغط الجوي.

طرحت عدة تعديلات على نظام التبريد التبخيري ليلائم مختلف المناخات ومنها التبريد التجفيفي التبخيري، إن أنظمة التبريد التبخيري لا يمكنها وحدها تأمين الراحة الحرارية في كل المناخات وخاصة في المناطق العالية الرطوبة، ولذلك يجب تعزيز عمل هذه الأنظمة بالمجففات والتي تمتص الرطوبة من الهواء ومن ثم تزال الرطوبة من المجفف باستخدام الطاقة الحرارية (طاقة مهدورة أو أي مصدر للطاقة المتجددة).

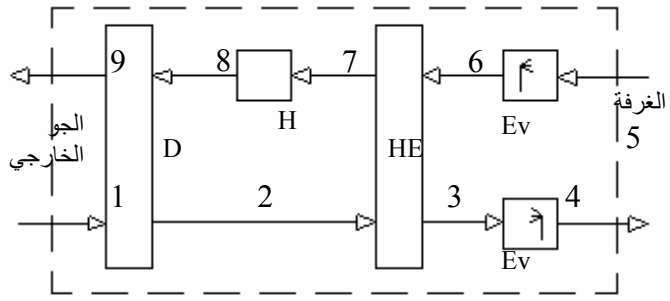
إن نظام التبريد التجفيفي التبخيري (DEC) هو نظام صديق للبيئة وهو فعال طاقياً، إن إزالة الرطوبة بالمجففات يمكن أن يقلل الطلب على الطاقة الكهربائية في المناطق الرطبة بنسبة (25%) ويؤمن بيئة داخلية أنظف وأجف وأكثر راحة – المرجع [2].

يسمح نظام DEC بتأمين هواء تغذية جديد للمكان المكيف دون الحاجة للهواء المعاد، ومن ثَمَّ تحسين نوعية الهواء الداخلي دون استخدام طاقة إضافية وهي مناسبة حيث تكون الأحمال الحرارية الكامنة كبيرة و الرطوبة المطلوبة منخفضة مثل السوبر ماركت والفنادق والمسابح.

إن لكل من أنظمة التبريد التجفيفي التبخيري ذات المجففات الصلبة و السائلة مميزاتٍ وعيوباً مقارنة مع الأخرى، تمتاز المجففات السائلة بانخفاض طاقة إعادة التنشيط ويكون انخفاض ضغط الهواء فيها أقل، وهذا يقلل من استهلاك الطاقة وهذه المجففات مفضّلة من أجل الاستطاعات الكبيرة ولفترات عمل كبيرة– المرجع [2]– ولكن من أجل وحدات باستطاعات أقل فإن الأنظمة ذات المجففات الصلبة تمتاز بحجم مضغوط و خلوها من مشاكل التآكل و انتقال الملوثات عبر المجففات لذلك يتم التركيز الآن على الأنظمة ذات المجففات الصلبة.

يبين الشكل (1) مخططاً يمثل دارة DEC– المرجع **[1]**– حيث نلاحظ وجود تياري هواء، تيار الهواء المعالج (الهواء الجديد) وتيار الهواء المطرود (هواء إعادة تنشيط المجفف)، يتم سحب الهواء المعالج من الجو الخارجي و النقطة 1 تمثل حالة الهواء في الجو الخارجي ليمرر عبر قرص المجفف الدوار D حيث يقوم المجفف بانتزاع الرطوبة منه ويترافق ذلك بارتفاع درجة حرارته، والنقطة 2 تمثل حالة تيار الهواء المعالج بعد المجفف ومن ثم يتم تبريده في المبادل الحراري الاسترجاعي تبريداً محسوساً، و النقطة 3 تمثل حالة الهواء المعالج بعد المبادل الاسترجاعي ثم يبرد بالترطيب و النقطة 4 تمثل حالة الهواء بعد المرطبة وهي حالة هواء التغذية للمكان المكيف، يتم سحب الهواء المطرود من داخل المكان المكيف النقطة 5 ليبرد بالترطيب، والنقطة 6 تمثل حالته بعد المرطبة، ومن ثم يقوم الهواء المطرود بسحب الحرارة المحسوسة من تيار الهواء المعالج في المبادل الحراري الاسترجاعي لترتفع

درجة حرارته (الهواء المطرود)، و النقطة 7 تمثل حالته بعد المبادل، ومن ثم يسخن في وشيعة التسخين ليصبح قادراً على إعادة تنشيط المجفف الدوار

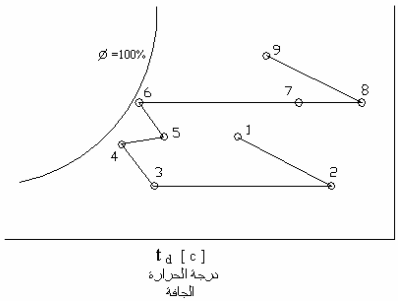


D : مجفف دوار
Ev : مرطبة
HE : مبادل حراري دوار
H : مسخن

الشكل (1)

دارة DEC

و النقطة 8 تمثل حالة الهواء المطرود بعد وشيعة التسخين، ومن ثم يقوم بانتزاع الرطوبة من المجفف الدوار ويترافق ذلك بانخفاض درجة حرارته و النقطة 9 تمثل حالة الهواء المطرود بعد المجفف، و الشكل (2) يبين تمثيل دورة نظام DEC على المخطط السايكرومتري:



محتوى الرطوبة $\overset{w}{}$ [g / kg dry air]

الشكل (2)

تمثيل دارة DEC على المخطط السايكرومتري

2- المجففات:

قبل الشروع في شرح مبدأ عمل المجففات لا بد لنا من الإشارة إلى بعض التعاريف المهمة (حسب المعهد الدولي للتبريد في باريس IIR : International Institute of Refrigeration):

أ – (Sorption): تعبير عام يشمل مفهومي الامتصاص (absorption) والامتزاز (adsorption).

ب – (Absorption) الامتصاص: هو نفوذ مادة داخل جسم مادة أخرى.

ج – (Adsorption) الامتزاز: هو إجراء يقوم فيه جسم صلب بالتقاط مائع يلامسه بالالتصاق السطحي.

د – (Sorbent) المادة الماصة أو المادة الممتزة: هي مادة تمتلك قابلية الامتصاص أو الامتزاز.

هـ – (Sorbate) المادة التي تُمتَص أو التي تُمتَز: هي تلك المادة التي تُمتص من قبل المادة الماصة أو تُمتز على المادة الممتزة.

إن المجففات هي مجموعة فرعية من المواد الماصة أو الممتزة تقوم بامتصاص أو امتزاز بخار الماء، يجذب المجفف الرطوبة حتى يصل إلى التوازن مع الهواء المحيط، تزال الرطوبة عادة من المجفف بتسخينه لدرجة حرارة بين($50 - 260\ ^{o}c$) و بتعريضه لتيار هواء لنزع الرطوبة منه، بعد أن يجفف المجفف يجب أن يكون بارداً لكي يكون قادراً على جذب الرطوبة من جديد ، ينتج عن عملية الامتصاص أو الامتزاز حرارة تساوي الحرارة الكامنة لبخار الماء المنزوع بواسطة المجفف زائد حرارة إضافية تتراوح بين ($5 - 25\ \%$) من الحرارة الكامنة لبخار الماء– المرجع[6].

– يمكننا التمييز بين عملية الامتصاص وعملية الامتزاز بحسب خضوع المجفف أو عدم خضوعه لتغيير كيميائي عند امتلاكه للرطوبة، عند الامتزاز لا يحصل تغيير للمجفف باستثناء الوزن الإضافي لبخار الماء وهذا يشبه بشكل من الأشكال إسفنجة

تشبع بالماء أما عند الامتصاص فإنه يحصل تغيير للمجفف، تكـون أغلـب المـواد الماصة سائلة، وتكون أغلب المواد الممتزة صلبة – المرجع [1]–

من أشهر أنواع المجففات الممتزة: جل سـيلكا (silica gels)– الزيوليـت (zeolites)– الزيوليت الـصناعي ويـدعى أيـضاً (molecular sieves) – البـولميرات الـصناعية (synthetic - polymers) ومن أشهر أنواع المجففات الماصة السائلة: محلـول كلوريـد الليثيوم($LiCl$) ومحلول (triethylene-glycol).

– يتبع عمل كل المجففات الآلية نفسها لانتقال الرطوبة وهي الاعتماد على الفرق بين ضغط بخار الماء عند سطح المجفف وضغطه في الهواء المحيط، عندما يكون ضغط بخار الماء عند سطح المجفف أقل من ضغط بخار الماء في الهـواء المحـيط فـإن المجفف يجذب الرطوبة، وعندما يكون ضغط بخار الماء عند سطح المجفف أعلى من ضغط البخار في الهواء المحيط فإن المجفف يطلق الرطوبة،عندما يـزداد محتـوى الرطوبة في المجفف فإن ضغط بخار الماء يزداد عند سطحه وعندما يكـون ضـغط البخار عند سطح المجفف مساوياً لضغط بخار الماء في الهواء المحيط يكون الاثنـان في حالة توازن، ولا تستطيع الرطوبة الانتقال في أي من الاتجاهين حتى تغير بعض القوى الخارجية ضغط بخار الماء في المجفف أو في الهواء المحيط، يزيد ارتفاع كل من درجة حرارة المجفف ومحتوى الرطوبة فيه من ضغط البخار عند سطحه، عندما يتجاوز ضغط بخار الماء السطحي قيمة ضغط بخار الماء في الهواء المحيط تتـرك الرطوبة المجفف هذه العملية تتعلق بإعادة التنشيط أو التجديد، بعد أن يجف المجفـف (يعاد تنشيطه) بالتسخين يبقى ضغط البخار فيه مرتفعاً لـذلك تكـون قدرتـه علـى امتصاص الرطوبة صغيرة، إن تبريد المجفف ينقص ضغط بخاره السطحي ليكـون قادراً على امتصاص الرطوبة من جديد.

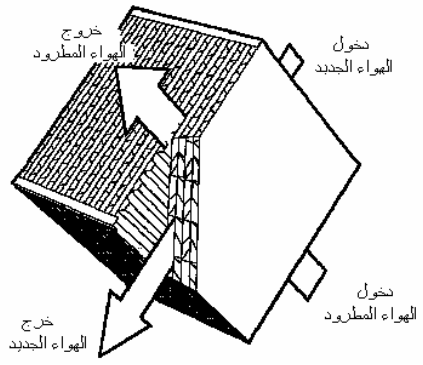
3- المبادلات الحرارية الاسترجاعية:

تقوم المبادلات الحرارية الاسترجاعية باسترجاع الطاقة الحرارية المهدورة للهواء المطرود حيث تؤمن عملية تبادل حراري بين الهواء المطرود و الهواء الجديد، وهذه المبادلات إما أن تؤمن انتقال الحرارة المحسوسة فقط أو أن تؤمن انتقال الحرارة المحسوسة والكامنة معاً وهي ما تسمى بمبادلات الانتالبي– المرجع [3]، إن استخدام أجهزة استرجاع الطاقة الحرارية في تطبيقات تكييف الهواء يؤدي إلى تقليل كبير لاستطاعة وحدة التكييف اللازمة لمعالجة الهواء ومن ثَمَّ يؤدي أيضاً إلى تقليل تكاليف التشغيل وتكاليف الصيانة.

من أكثر أنواع المبادلات الحرارية استخداماً لاسترجاع الطاقة الحرارية بين تياري الهواء المطرود والهواء الجديد المبادل الحراري الصفائحي.

3 - 1 - المبادل الحراري الاسترجاعي الصفائحي:

لا تحوي هذه المبادلات الحرارية على أجزاء متحركة ، يتألف المبادل الحراري الصفائحي من صفائح متوازية مفصولة عن بعضها، والتي تشكل ممرات تياري الهواء الجديد والهواء المطرود كما في الشكل الآتي: – المرجع [5] –

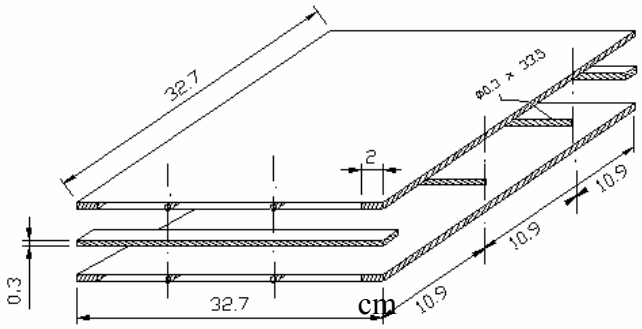


الشكل (3)

يتراوح تباعد الصفائح بين $(2.5 - 12.5\ mm)$ وذلك حسب تصميم المبادل و مجال الاستخدام، تنتقل الحرارة من تيار الهواء الساخن إلى تيار الهواء البارد عبر الصفائح الفاصلة بين التيارين، يمكن تصميم المبادل الحراري الصفائحي من حيث هندسته و ترتيب الجريان وأبعاده والمواد المؤلف منها ليلبي قيم التدفقات و المردود و انخفاض الضغط المطلوبة، تكون مقاومة انتقال الحرارة بالتوصيل خلال الصفيحة صغيرة مقارنة مع مقاومة انتقال الحرارة بالحمل لتياري الهواء على جانبي الصفيحة، ولذلك لا تتأثر فعالية انتقال الحرارة بشكل كبير بمعامل الإيصال الحراري للصفيحة، يعدُّ الألمنيوم المادة الأكثر استخداماً في هذا النوع من المبادلات الحرارية لمقاومته للتآكل وسهولة استخدامه في تصنيع المبادل و خصائص انتقال الحرارة وطول بقائه، في حين يستخدم الفولاذ في تطبيقات خاصة مثلاً من أجل درجات حرارة تتجاوز $(200\,^{o}c)$، نظراً لأنّه لا توجد أجزاء متحركة في هذا المبادل، وبناءً عليه لا يوجد تسرب أو يوجد تسرب صغير بين تياري هواء المطرود و الهواء الجديد، فمع ازدياد السرعة يزداد فرق الضغط أسياً وعند قيم كبيرة لفرق الضغط يمكن أن يتشوه شكل الصفائح بين التيارين مما يسيء لمردود المبادل الحراري و يسبب تسرباً للهواء ولكن هذه لا تشكل مشكلة عملية في هذا النوع من المبادلات إذْ إنَّ فرق الضغط لا يتجاوز (1kPa)– المرجع [4]– ولكن يجب الانتباه لهذه المسألة في التطبيقات الخاصة التي تتطلب قيماً كبيرة لسرعة الهواء أو للضغط الستاتيكي أو لكليهما.

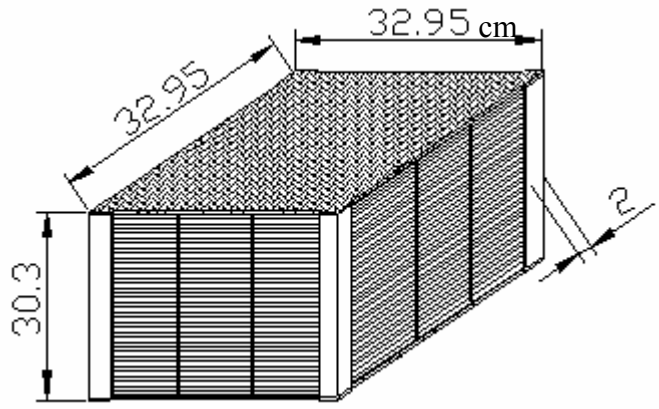
– بعد حساب النموذج النظري لدارة DEC قمنا بتصميم المبادل الحراري الاسترجاعي وفق شروط عمله في دارة DEC، المبادل مؤلف من ثلاث كتل متماثلة وكل كتلة مؤلفة من (79) صفيحة متوازية مربعة الشكل $(32.7\,cm \times 32.7\,cm)$ مصنعة من الألمنيوم سماكة الصفيحة $(0.4\,mm)$ التباعد بين الصفائح $(3\,mm)$ حيث يفصل بين الصفائح عوارض ذات مقطع مستطيل $(3\,mm \times 20\,mm)$ و قضيبان أسطوانية أفقية $(Ø3\,mm)$ قضيبين بين كل صفيحتين متوازيتين، القضبان الأفقية بين الصفائح مثبتة مع

قضبان شاقولية لها القطر نفسه، قضيبان من كل جانب للكتلة تظهر محاورهـــا فـــي الشكل (4):



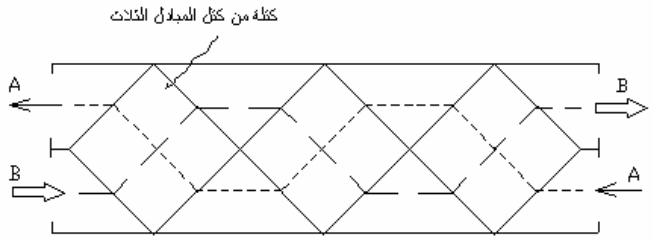
الشكل (4)

الصفائح ملتصقة مع العوارض بمادة السيليكون بشكل جيد يمنع تسرب الهـــواء، تـــم لصق صفيحة من الصاج المزيبق بسماكة$(1.25mm)$ من الجهة العلوية وصفيحة أخرى من الجهة السفلية للكتلة وثبتت مع أربع زوايا سماكة الزاوية $(1.25mm)$ ولصق جوان على الكتلة من الجهتين العلوية والسفلية ليصبح لدينا الكتلة الآتية:



الشكل (5)

ترتيب الجريان في الكتلة الواحدة هو جريان عرضي، ومحصلة الجريان في الكتل الثلاث في المبادل هو جريان متعاكس كما في الشكل (6):



الشكل (6)

4- الاختبارات والاستنتاجات:

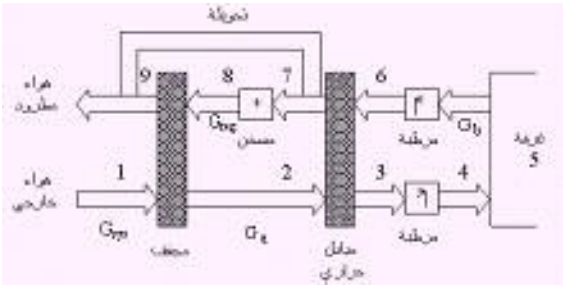
قمنا بتصنيع المبادل الحراري الصفائحي في مختبرات كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية بجامعة دمشق، وأجريت تجارب لاختبار أداء المبادل عند شروط عمل توافق:

1- عمل المبادل ضمن دارة DEC

2- عمل المبادل مع وحدة تكييف هواء تقليدية

4 -1- اختبار المبادل الحراري عند عمله ضمن دارة DEC:

أجريت تجارب لاختبار أداء المبادل الحراري عند شروط عمله ضمن دارة DEC، حيث اختُبرت عملية استرجاع الحرارة بين تياري هواء لهما معدل التدفق نفسه $(G_a = G_b = G)$ ودرجة حرارة دخول أحد التيارين للمبادل الحراري تساوي درجة حرارة الهواء المعالج بعد المجفف $t_{ai} = t_{2d} = 59^o\,[c]$ كما في الشكلين (7,8) ودرجة حرارة دخول تيار الهواء الآخر للمبادل الحراري تساوي درجة حرارة هواء إعادة التنشيط بعد المرطبة $t_{bi} = t_{6d} = 19^o\,[c]$



الشكل (7)

يعطى مردود المبادل الحراري بدلالة درجات حرارة دخول وخروج تياري الهواء من المبادل الحراري بالعلاقة: $\varepsilon\ \% = \frac{\Delta t}{\Delta t}$ – المرجع [5]–

$$\Delta t_b = t_{bi} - t_{bo} \ ،\ \Delta t_a = t_{ai} - t_{ao} \ ،\ \Delta t = \frac{\Delta t_a + \Delta t_b}{2}$$ حيث :

مع تغيير معدل التدفق الكتلي للهواء (G) يتغير مردود المبادل الحراري وتتغير قيمة درجة حرارة خروج كل من تياري هواء إعادة التنشيط والهواء المعالج من المبـــادل الحراري الاسترجاعي، وفيما يأتي نتائج اختبار عمل المبادل الحراري ضـــمن دارة DEC:

$\varepsilon\%$	ΔP_b $[Pa]$	ΔP_a $[Pa]$	t_{bo} $[c^o]$	t_{ao} $[c^o]$	t_{bi} $[c^o]$	t_{ai} $[c^o]$	$[kg/h]G$
80.52	**55**	**60**	**51.7**	**27.1**	**19.1**	**59.4**	**240**
79.60	**60**	**65**	**50.5**	**27.0**	**19.3**	**59.0**	**270**
79.04	**70**	**80**	**50.2**	**27.2**	**19.1**	**58.7**	**300**
78.86	**75**	**85**	**50.7**	**27.9**	**19.3**	**58.8**	**320**
76.94	**85**	**90**	**50.1**	**28.6**	**19.2**	**59.1**	**350**
76.64	**90**	**95**	**49.0**	**27.9**	**19.3**	**58.9**	**380**
76.00	**95**	**105**	**49.4**	**28.6**	**18.7**	**58.7**	**400**
75.06	**105**	**115**	**48.9**	**28.6**	**18.9**	**59.4**	**420**
73.98	**110**	**125**	**48.8**	**29.9**	**19.4**	**58.8**	**450**
73.12	**120**	**130**	**47.9**	**29.5**	**19.2**	**59.0**	**470**
71.68	**130**	**140**	**47.7**	**30.4**	**18.8**	**58.7**	**500**
70.23	**135**	**145**	**47.4**	**31.3**	**19.3**	**59.1**	**520**

4- 2 - الاستنتاجات المتعلقة باختبار المبادل الحراري عند عمله ضمن دارة DEC:

– نلاحظ أن مردود المبادل الحراري ينخفض مع ازدياد معدل تدفق الهواء لكل من تياري الهواء، وذلك مع بقاء معدلي التدفق متساويين $(G_a = G_b = G)$

– إن قيمة مردود المبادل الحراري الاسترجاعي الفعلي عند التدفق $(G = 300 kg/h)$ هي $(\varepsilon' = 79.04\%)$ في حين أن قيمة المردود النظري $(\varepsilon_{th} = 89\%)$ ، إن انخفاض قيمة مردود المبادل الحراري تؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة خروج الهواء المعالج من المبادل الحراري $(t_{ao} = t_{3'd} > t_{3d})$ ، يبيّن الشكل (8) تمثيلاً لنقاط دارة DEC على مخطط رامزين، يؤدي ارتفاع درجة حرارة خروج الهواء المعالج من المبادل الحراري إلى انخفاض الإنتاجية التبريدية النوعية لدارة DEC:

$$q_o' = i_5 - i_{4'} = 51.498 - 41.868 = 9.63\ [kj/kg]$$

في حين أن الإنتاجية التبريدية النوعية في حالة $(\varepsilon_{th} = 89\%)$ هي:

$$q_o = i_5 - i_4 = 51.498 - 38.519 = 12.979\ [kj/kg]$$

كما يؤدي انخفاض قيمة مردود المبادل الحراري إلى انخفاض درجة حرارة خروج هواء إعادة التنشيط من المبادل الحراري : $(t_{bo} = t_{7'd} < t_{7d})$ وهذا يؤدي إلى ارتفاع كمية الحرارة اللازمة لإعادة التنشيط المجفف:

$$q_{reg}' = \frac{G_{reg}}{G_{sys}}(i_8 - i_{7'}) = 0.54(120.58 - 83.736) = 19.896\ [kj/kg]$$

حيث : $G_{sys} = G_a$ معدل التدفق الكتلي للهواء المعالج المار في المجفف.

$G_{reg} \neq G_b$ معدل التدفق الكتلي لهواء إعادة االتنشيط المار في المجفف.

$\frac{G_{reg}}{G_{sys}} = 0.54$ وهي نسبة تتعلق بمحتوى رطوبة الهواء المعالج قبل المجفف.

$t_{8d} = 85^o[c]$ ودرجة الحرارة اللازمة لإعادة تنشيط المجفف $w_1 = 10[g/kg_{\ dry\ air}]$

– المرجع [1]–

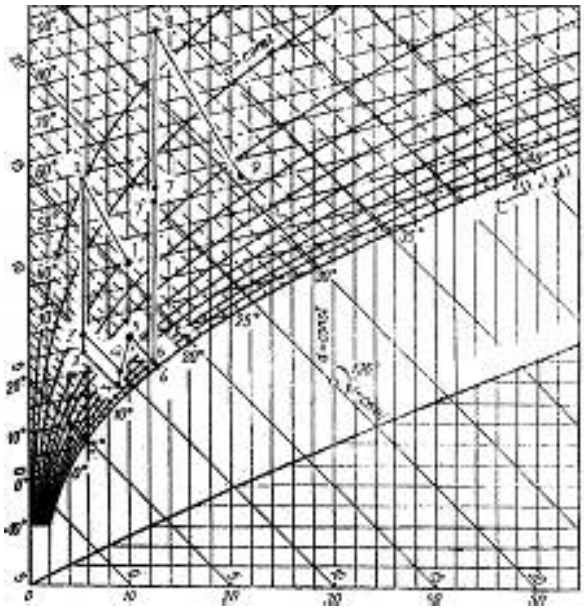
في حين أن كمية الحرارة اللازمة لإعادة التنشيط المجفف في حالة $(\varepsilon_{th} = 89\%)$ هي:

$$q_{reg} = \frac{G_{reg}}{G_{sys}}(i_8 - i_7) = 0.54(120.58 - 86.667) = 18.313\,[kj/kg]$$

ومن ثَمَّ قيمة معامل أداء دارة DEC: $cop' = \frac{q'_o}{q'_{reg}} = \frac{9.63}{19.896} = 0.484$

بينما في حالة $(\varepsilon_{th} = 89\%)$ هي: $cop = \frac{q_o}{q_{reg}} = \frac{12.979}{18.313} = 0.709$

وهكذا نجد أن مردود المبادل الحراري يؤثر بشكل كبير في معامل أداء دارة DEC فبازدياد مردود المبادل الحراري تزداد الإنتاجية التبريدية النوعية لدارة



الشكل (8)

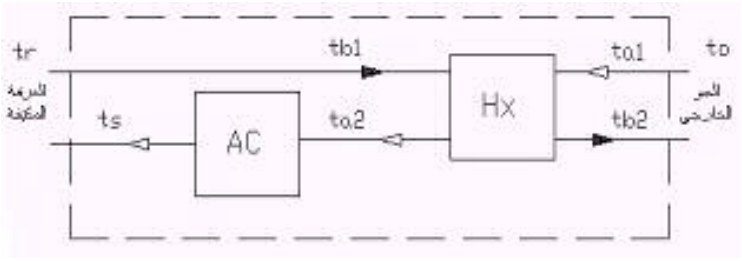
DEC كما تنخفض كمية الحرارة اللازمة لإعادة تنشيط المجفف ومن ثَمَّ يزداد معامل أداء دارة DEC.

4- 3 -اختبار المبادل الحراري الاسترجاعي عند عمله مع وحدة تكييف هواء تقليدية:

تم اختبار أداء المبادل الحراري عند شروط عمله بوصفه مبادلاً حرارياً استرجاعياً مع وحدة تكييف هواء تقليدية، فبفرض أن لدينا غرفة مكيّفة صيفاً و أن درجة الحرارة داخل الغرفة $t_r = 24^0\ [c]$ و أن درجة حرارة هواء التغذية الداخل للغرفة المكيفة $t_s = 18^\circ [c]$ و أن درجة حرارة الهواء الخارجي $t_o = 40^\circ [c]$ ومن ثَمَّ يتحتم على وحدة معالجة الهواء تأمين الاستطاعة التبريدية الآتية:

$$Q = G(t_o - t_s)c$$

إن استخدام المبادل الحراري الاسترجاعي يؤدي إلى تخفيض الاستطاعة التبريدية المطلوبة من وحدة تكييف الهواء، وذلك عند معدل التدفق الكتلي نفسه درجة حرارة هواء التغذية (t_s) نفسها:



الشكل (9)

عمل المبادل الحراري الاسترجاعي مع وحدة تكييف الهواء

Hx: المبادل الحراري الاسترجاعي، AC : وحدة تكييف الهواء

t_o : درجة حرارة الهواء الخارجي، t_r : درجة حرارة الهواء داخل الغرفة المكيفة

$t_{a1} = t_o$: درجة حرارة دخول هواء التغذية للمبادل الحراري

$t_{b1}=t_r$: درجة حرارة دخول الهواء المطرود إلى المبادل الحراري

t_{a2} : درجة حرارة خروج هواء التغذية من المبادل الحراري

t_{b2} : درجة حرارة خروج الهواء المطرود من المبادل الحراري

الاستطاعة التبريدية لوحدة التكييف في حال عدم استخدام المبادل الحراري الاسترجاعي

$$Q = Gc(t_o - t_s)$$

الاستطاعة التبريدية لوحدة التكييف في حال استخدام المبادل الحراري الاسترجاعي

$$Q' = Gc(t_{a2} - t_s)$$

ومن ثَمَّ نسبة التوفير في استطاعة وحدة التكييف :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{Q - Q'}{Q} = \frac{(t_o - t_{a2})}{t_a - t_s} = \frac{\Delta t_a}{t_o - t_s}$$

تم اختبار المبادل الحراري عند شروط عمله بوصفه مبادلاً حرارياً استرجاعياً مع وحدة تكييف هواء من أجل $t_s = 18^o\ [c]$ حيث اختبرت عملية استرجاع الحرارة بين تياري هواء، أحدهما يمثل تيار الهواء المطرود والذي درجة حرارة دخوله للمبادل تساوي درجة حرارة الغرفة $t_{b1}=t_r=24^o\ [c]$ ، و الآخر يمثل تيار هواء التغذية والذي درجة حرارة دخوله للمبادل الحراري تساوي درجة حرارة الهواء الخارجي $t_{a1}=t_o=40^o\ [c]$، يبين الجدول نتائج اختبار المبادل الحراري عند شروط عمله مع وحدة تكييف هواء وحساب نسبة التوفير في الاستطاعة اللازمة لوحدة التكييف نتيجة لاستخدام المبادل الحراري الاسترجاعي:

$\frac{\Delta Q}{Q}\%$	t_{b2} $[c^o]$	t_{a2} $[c^o]$	t_{b1} $[c^o]$	t_{a1} $[c^o]$	G $[kg/h]$
61.01	**36.9**	**26.5**	**23.8**	**39.8**	**200**
60.54	**37.2**	**26.8**	**23.9**	**40.3**	**220**
58.37	**37.0**	**27.2**	**23.7**	**40.1**	**250**
58.72	**36.4**	**27.0**	**24.0**	**39.8**	**270**
59.36	**36.3**	**26.9**	**23.7**	**39.9**	**300**
57.40	**36.6**	**27.5**	**24.1**	**40.3**	**320**
55.20	**36.8**	**27.9**	**24.0**	**40.1**	**350**
55.05	**36.4**	**27.8**	**24.0**	**39.8**	**370**
57.21	**36.1**	**27.5**	**23.8**	**40.2**	**400**
55.71	**35.8**	**27.7**	**24.1**	**39.9**	**430**
55.76	**35.4**	**27.6**	**24.3**	**39.7**	**450**
53.64	**36.0**	**28.2**	**24.0**	**40.0**	**470**
50.93	**35.7**	**28.6**	**24.2**	**39.6**	**500**
52.70	**35.6**	**28.5**	**24.3**	**40.2**	**520**
52.47	**35.3**	**28.6**	**24.1**	**40.3**	**550**

4 - 4 - الاستنتاجات المتعلقة باختبار المبادل الحراري الاسترجاعي عند عمله مع وحدة تكييف هواء تقليدية :

نلاحظ أن استخدام المبادل الحراري الاسترجاعي يمكننا من توفير ما بين (61% ÷ 52%) من استطاعة وحدة تكييف الهواء، أي أن وحدة التكييف اللازمة مع استخدام مبادل حراري استرجاعي هي أصغر من نصف وحدة تكييف الهواء التي لا نستخدم معها مبادلاً حرارياً استرجاعياً، وهذا يعني انخفاض ثمن وحدة التكييف بالإضافة إلى انخفاض تكاليف الصيانة وتكاليف التشغيل، مع ملاحظة أننا عند استخدام المبادل الحراري الاسترجاعي فإن هواء التغذية هو هواء جديد (100%)، أي لا حاجة هنا لمزج هواء معاد من المكان المكيف مع الهواء الجديد لتقليل استطاعة وحدة التكييف اللازمة، إن استخدام هواء جديد (100%) يحسن من نوعية الهواء في

المكان المكيف ومن ثَمَّ يمكن استخدام المبادل الحراري الصفائحي الاسترجاعي مع وحدات تكييف الهواء الخاصة بالمستشفيات، حيث إنّه في هذا النوع من المبادلات الحرارية لا يحدث فيه تسرب للهواء المطرود إلى الهواء الجديد، ومن هنا نرى فائدة استخدام المبادلات الحرارية الاسترجاعية مع وحدات تكييف الهواء.

5- الخلاصة:

مما سبق يتبين لنا أن:

- مردود المبادل الحراري يؤثر بشكل كبير في كل من الإنتاجية التبريدية و كمية حرارة إعادة التنشيط و معامل الأداء لدارة DEC، فازدياد مردود المبادل الحراري الاسترجاعي يؤدي إلى ازدياد ملحوظ لمعامل أداء دارة DEC.
- الاستطاعة التبريدية المطلوبة من وحدة تكييف الهواء مع استخدام مبادل حراري استرجاعي هي أصغر من نصف الاستطاعة المطلوبة من وحدة تكييف الهواء التي لا نستخدم معها مبادلاً حرارياً استرجاعياً.

المراجع

1 - Desiccant cooling And Dehumidification , By Lew Hariman Mason – grant company Porsmouth , ISBN 0–910110–90–5
2- Desiccant Augmented Evaporative Cooling: An Emerging Air-Conditioning Alternative, By Sanjeev, Indian Institiute Of Technology Delhi,Hauz Khas, New Delhi-110016, India.
3 - Simulation of Air-to-Air Energy Recovery Systems for HVAC Energy Conservation in an Animal Housing Facility By Sebastian W. Freund - Solar Energy Laboratory ,University of Wisconsin – Madison 2002
4 – ASHRAE Handbook 1996
5 – The CRC Handbook Of Thermal Enginering , Ediotor in chief : Frank Kreith ISBN 0-8493-9581-x
6- Performance Of Rotary Enthalpy Exchangers by Gunnar Stiesch – University Of Wisconsin-Madison 1994

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق2004/9/28.