

Experimental study of a multi-stage evaporative cooler

دراسة عملية لمبردة الهواء التبخيرية متعددة المراحل

بيداء جابر نبهان
قسم الهندسة الميكانيكية
كلية الهندسة-الجامعة المستنصرية
E-mail: baydaa1971@yahoo.com

عقيل علي وناس
قسم هندسة المكنائ والمعدات
الجامعة التكنولوجية
E-mail: yi3aaw@yahoo.com

عامر عبدالله محمد
قسم الهندسة الميكانيكية
كلية الهندسة-الجامعة المستنصرية
E-mail: aamh567@yahoo.com

Abstract

In this study, the evaporative cooler is developed by adding multistage of heat exchangers (air – air and water – air) to cool indirectly and indirectly the input air and then cooling directly inside the classical evaporative cooler. The multistage evaporative cooler is assisted to reduce the energy consumption, environmental pollution, global warming phenomenon and manufacturing cost compared than compression refrigeration systems. The multistage evaporative cooler is suitable and done in houses and large buildings with relatively high temperatures and humidity. The experimental results of developed evaporative cooler showed that adding cooling stage to classical cooler reduces the out dry bulb temperature about (50%) and the specific humidity by (70%).

Key words: Evaporative cooling, multi-stage evaporative, air-air heat exchanger.

الخلاصة:

تم في هذه الدراسة تطوير مبردة الهواء التبخيرية وجعلها متعددة المراحل حيث استُخدمت المبادلات الحرارية المتنوعة هواء-هواء وماء-هواء لتبريد الهواء بشكل غير مباشر ومن ثم بشكل مباشر عن طريق وسائط التبخير الموجودة في المبردة التبخيرية، وذلك بسبب نقصان موارد الطاقة وتلوث البيئة وظاهرة الاحتباس الحراري حيث أصبحت الحاجة ملحة للبحث عن موارد بديلة لتقليل استهلاك الطاقة. إن أنظمة التبريد التي تعمل على مبدأ الانضغاط تستهلك كمية كبيرة من الطاقة بالإضافة إلى أن غازات التبريد تساعد على زيادة التلوث، من هنا جاءت فكرة تطوير مبردة الهواء التبخيرية وجعلها تعمل في أجواء ذات درجات حرارة ورطوبة عالية نسبياً واعطاء ظروف مريحة في المنازل والمباني الكبيرة، حيث أظهرت النتائج العملية فعالية هذه الطريقة من ناحية التبريد القياسية واستهلاك الطاقة وكلفة التصنيع مقارنة بأجهزة التبريد الانضغاطية. وبينت النتائج أن إضافة مرحلة تبريد إلى المبردة التقليدية يؤدي إلى انخفاض درجة الحرارة الجافة للهواء (dry bulb temperature) الخارج بنسبة (50%) وانخفاض المحتوى الرطوبي (specific humidity) بنسبة (70%).

١. المقدمة:

جزء كبير من الطاقة الكهربائية يستهلك في المناطق الحارة لأغراض تبريد الهواء في المنازل والمباني العامة ويعتبر التبريد بواسطة المبردات التبخيرية أحد أنجح الطرق من ناحية استهلاك الطاقة وكلفة التصنيع. يستخدم الماء في التبريد التبخيري لامتصاص الحرارة من الهواء أثناء عملية التبخير لخفض درجة حرارة الجو، فمبردة الهواء التبخيرية توفر ميزات التبريد والتهويه وممانعة الغبار وإزالة الروائح، وتعتمد على مبدأ تمرير الهواء الخارجي من خلال حشوات مشبعة بالماء وبسبب تبخير الماء يبرد الهواء وهذا يستوجب توفير مخرج للهواء لتأمين إزاحة الهواء الحار من المكان المطلوب تبريده [١].

تتركب المبردة التبخيرية من المحرك الكهربائي المركب في قمة صندوق ويدير المروحة المركزية بواسطة حزام مطاطي، هذه المروحة تسحب الهواء من خلال الحشوات المشبعة بالماء والموضوعة على جوانب الصندوق الثلاثة، وفي المناطق ذات الرطوبة المنخفضة فإن إضافة بخار ماء إلى الهواء يؤدي إلى زيادة

نسبة التبريد حيث ان هذا النوع من المبردات صالح للاستخدام في الاجواء الجافة ولا يصلح للاجواء الرطبة كونها ستزيد من نسبة الرطوبة في الجو.

تكلفة المبردات التبخرية اقل من نصف كلفة مكيفات الهواء وتستهلك حوالي ربع قدرة الطاقة ولكنها تتطلب صيانة اكثر وعلى فترات متقاربة وتحتاج بين فترة واخرى الى تفريغها من الماء لمنع تركيز الاملاح فيها ، ولان المبردات التبخرية تتوقف على حدود درجة حرارة ورطوبة معينتين لذلك يلجئ المصممون الى الطرق الاخرى الاكثر كلفة واستهلاكاً للطاقة للتغلب على الظروف القاسية للمناخ من رطوبة ودرجة حرارة التي تتعدى امكانية المبردات التبخرية [٢،٣].

ونظرا لاهمية موضوع الحصول على كفاءة تبريد عالية بكلفة قليلة فقد اهتمت الدراسات و البحوث في محاولة رفع تلك الكفاءة , و ان ادخال التبريد التبخيري ذي المرحلتين ساهم الى حد بعيد في احداث تطور كبير في تقليل الطاقة المصروفة حيث أمكن تقليل الطاقة المصروفة بمقدار سبع مرات والحصول على نفس كفاءة التبريد باستخدام نظام التبريد بالتبخير ذي المرحلتين [٤]. اما الباحث David Perlmutter و اخرين [٥] فقد قدموا دراسة تضمنت عدة مراحل لبرج تبريد مع منظومة رش مياه و لكن المقطع المعقد و عملية اضافة مدخل الهواء قرب الوسط تطلبت منظومة رش متطورة و هذا يعني كلفة عالية و لكن ذلك اسهم في زيادة الكفاءة بنسبة (٥٤%) ، في حين ان الباحث Peng Xu و اخرين [٦] طوروا منظومة تبريد تبخيري و ذلك بتصميم مراحل متعددة من وحدة الهايدروليك و منظومة الاداء الحراري ، هذا التصميم تضمن تبريد الماء بواسطة تبريد المبادل الحراري وباستخدام هواء المحيط الخارجي و الذي تم تبريده مسبقا بواسطة تدفق المياه حيث يتم تبريد الهواء الخارجي في الممرات الجافة ثم تم ادخاله في الممرات الرطبة حيث تكون درجة الهواء الرطب اقل من الهواء الخارجي مما قد ينتج عنه انخفاض درجة حرارة مياه الحوض مقارنة مع تلك التي تنتجها مكثفات التبخير التقليدية و نتج عن ذلك تحسن كبير في الكفاءة و تحقيق انخفاض بنسبة ٦٠% في استخدام الطاقة في المناخات الجافة .

وتهدف الدراسة الحالية الى زيادة كفاءة المبردة التبخرية وذلك بجعلها متعددة المراحل بواسطة تمرير الهواء الداخل للمرحلة الثانية على هواء وماء المرحلة الاولى بواسطة انابيب تخترق المرحلة الاولى ليكون تبريد الهواء تبريداً غير مباشراً (أجراء ادبياتي) ، بعد ذلك يمر على المرحلة الثانية ليبرد بشكل مباشر .

٢. وصف المنظومة:

يتكون التصميم وكما موضح في الشكل (١) من ثلاث مراحل المرحلة الاولى ، مرحلة التبادل الحراري والمرحلة الثانية . المرحلة الاولى عبارة عن مبردة اعتيادية تقليدية وظيفتها تبريد الماء والهواء المتجه الى مرحلة التبادل الحراري بواسطة التبخير . اما مرحلة التبادل الحراري فوظيفتها نقل الحرارة من الهواء المتجه للمرحلة الثانية الى الهواء القادم من المرحلة الاولى بواسطة مبادل حراري هواء-هواء اولاً ثم الى الماء القادم من المرحلة الاولى بواسطة مبادل حراري ماء-هواء ثانياً . بعد ذلك يدخل الهواء للمرحلة الثانية بعد ان انخفضت درجة حرارته دون اكتساب أي رطوبة ، ثم تنخفض درجة حرارته في المرحلة الثانية نتيجة التبادل الحراري المباشر . يتكون الجهاز من:

١. **منفاخ الهواء:** تحتوي كل من المرحلة الاولى والثانية على منفاخ مشابه لما موجود في المبردات المتوفرة في الاسواق (القدرة المستهلكة 250 W وبمعدل 950 L/S).

ب. **مضخة مياه:** تحتوي المرحلة الاولى على مضخة مياه (100 W) تعمل على استمرار دورة المياه وتكون اكبر قدرة من تلك الموجودة في المرحلة الثانية (50 W, 2400 r.p.m) وذلك بسبب ارتباط المبادل الحراري ماء- هواء بها.

ج. **وسائط التبخير:** تحتوي كل من المرحلة الاولى والثانية على وسائط تبخير (مصنوع من نشارة الخشب)

د. **انابيب بلاستيكية:** تستعمل الانابيب البلاستيكية لغرض اكمال دورة المياه لكل من المرحلة الاولى والثانية قطر (0.5) انج ومصنوعة من مادة البوليمر نوع (PVC) وذلك حسب المخطط التوضيحي الشكل (١)

٥. مبادل حراري ماء-هواء: يوضح الشكل (٢) المبادل الحراري المستخدم لنقل الحرارة من الهواء الداخل للمرحلة الثانية الى دورة مياه المرحلة الاولى ، والمصنوع من الالمنيوم (50cm X35cm)، جاهز من الاسواق.

و. مبادل حراري هواء-هواء: لعدم وجود هذا الجزء في للاسواق المحلية تم تصنيعه من صفائح الالمنيوم واشرطة بلاستيكية والتي ربطت بواسطة السيليكون وكما مبين في الشكل (٣) حيث اصبح اجمالي مساحة التبادل الحراري لهذا المبادل ١٢ مترمربع ويقوم هذا الجزء بنقل الحرارة من الهواء الداخل للمرحلة الثانية الى الهواء الخارج من المرحلة الاولى .
وبذلك تم بناء نموذج لمبردة الهواء التبخرية متعددة المراحل من مبردتين اعتياديتين تقليديتين وقد تم تصنيع او تحويل الاجزاء الاخرى مثل المبادلات الحرارية وانابيب المياه والمضخات ، حيث تحاكي تماماً مخطط الشكل (١) وكما موضح في الشكل (٤) .

1.2 منظومة المياه:

يوجد دورة مياه واحدة لكل من المرحلة الاولى والثانية ، تبدأ دورة مياه المرحلة الاولى وكما في الشكل (١) عند الحوض ١٣ حيث يضخ الماء بواسطة المضخة ١٦ ليذهب الى المبادل الحراري ١٧ ليكتسب الحرارة من الهواء بعد ذلك يذهب الماء الخارج من المبادل ١٥ الى اعلى وسائط التبخير ليتوزع بواسطة الموزع ١٨ لتتخفض حرارته نتيجة التبخير الناتج عن الهواء الداخل للمرحلة الاولى لتنتهي دورة المياه عند الحوض ١٣ وهكذا تستمر الدورة . اما دورة مياه المرحلة الثانية فتكون مشابهة لتلك الموجودة في مبردات الهواء التبخرية التقليدية ، حيث تبدأ عند الحوض ٢٠ لتضخ الماء بواسطة المضخة ٢٢ ليذهب الماء بعد ذلك الى اعلى وسائط التبخير ليتوزع بواسطة الموزع ٢٤ لتتخفض درجة حرارته بالتبخير عن طريق الهواء القادم من المبادل الحراري ١٧ .

٢,٢ منظومة الهواء:

تبدأ دورة هواء المرحلة الاولى عندما يقوم المنفاخ ١ بسحب الهواء من المحيط ليمر على وسائط التبخير فينتج عن ذلك انخفاض في درجة حرارته وبعد ذلك يمر خلال المبادل الحراري هواء- هواء لي طرح الى المحيط من جديد بعد ان زادت درجة حرارته نتيجة التبادل الحراري غير المباشر مع الهواء الداخل لمرحلة التبادل الحراري والذي تنخفض حرارته بعد خروجه من المبادل هواء-هواء ، ونتيجة المنفاخ ٢ يمر الهواء على المبادل الحراري ماء-هواء وبذلك تنخفض درجة حرارة الهواء اكثر قبل دخوله المرحلة الثانية ، بعد ذلك يمر على وسائط التبخير ليخرج اقل درجة حرارة واكثر رطوبة نتيجة التبادل الحراري المباشر ليذهب الى المكان المراد تبريده .

3. النتائج ومناقشتها :

تميزت هذه الدراسة بوجود المبادل الحراري هواء-هواء (المستخدم لأول مرة في هذا المجال) بشكل منفصل حيث ينقل الطاقة الحرارية من الهواء ا لداخل للمرحلة الثانية الى الهواء الخارج من المرحلة الاولى ومن ثم المبادل الحراري ماء-هواء ايضاً بشكل منفصل فتعمل على امتصاص الطاقة الموجودة في الهواء الداخل للمرحلة الثانية ونقلها الى ماء المرحلة الاولى حيث ان عدم وجود هذه الاجزاء داخل المرحلة الاولى اعطى مساحة كبيرة للتبخير داخل المرحلة الاولى ومساحة سطحية كبيرة ايضاً للمبادلات لغرض التبادل الحراري وتسلسل دورة المياه للمرحلة الاولى ، كل هذه العوامل أدت الى انخفاض في درجة الحرارة الجافة للهواء الخارج والمحتوى الرطوبي مما ادى الى زيادة كفاءة المبردة التبخرية متعددة المراحل وبشكل كبير. أجري الاختبار عند ضغط ١ جو (١٠١,٣٢٥kpa) ودرجة حرارة ٤٥°C ومحتوى رطوبي ٧g/kg وسرعة هواء 7m/s. ولقد استخدم مزدوج حراري نوع (k) في قياس درجة حرارة الهواء ومنها تم تحديد الرطوبة النسبية عن طريق جداول وبتسقيطهما على المخطط المبردي (Psychrometric chart) وفيه الاجراءات لكافة المراحل في المبردة التبخرية متعددة المراحل، والجدول رقم (١) يوضح نتائج القراءات من النقطة A الى النقطة E الواقعة على المخطط المبردي (Psychrometric chart) للمرحلة الاولى وكما مبين في الشكل (٧) .

جدول (١): نتائج القراءات من النقطة A ← E الواقعة على مخطط الشكل (٧).

رطوبة الهواء الخارج g/kg	درجة حرارة الهواء الخارج °C	رطوبة الهواء الداخل g/kg	درجة حرارة الهواء الداخل °C
13.29	31	7	45

الجدول رقم (٢) يوضح نتائج القراءات من النقطة A الى النقطة B الواقعة على المخطط المبردي والخاصة بالمبادل الحراري هواء-هواء وكما مبين في الشكل (٧).

جدول (٢): نتائج القراءات من النقطة A ← B الواقعة على مخطط الشكل (٧).

رطوبة الهواء الخارج g/kg	درجة حرارة الهواء الخارج °C	رطوبة الهواء الداخل g/kg	درجة حرارة الهواء الداخل °C
٧	٣٨	7	45

الجدول رقم (٣) يوضح نتائج القراءات من النقطة B الى النقطة C الواقعة على المخطط المبردي والخاصة بالمبادل الحراري هواء-ماء وكما مبين في الشكل (٧).

جدول (٣): نتائج القراءات من النقطة B ← C الواقعة على مخطط الشكل (٧).

رطوبة الهواء الخارج g/kg	درجة حرارة الهواء الخارج °C	رطوبة الهواء الداخل g/kg	درجة حرارة الهواء الداخل °C
٧	٣١	7	٣٨

الجدول رقم (٤) يوضح نتائج القراءات من النقطة C الى النقطة D الواقعة على المخطط المبردي للمرحلة الثانية والخاصة بالتبادل الحراري المباشر والنتائج من عملية التبخر في وسائط التبخر وكما مبين في الشكل (٧).

جدول (٤): نتائج القراءات من النقطة C ← D الواقعة على مخطط الشكل (٧).

رطوبة الهواء الخارج g/kg	درجة حرارة الهواء الخارج °C	رطوبة الهواء الداخل g/kg	درجة حرارة الهواء الداخل °C
٨,٩١	٢٤	7	٢٧

ففي المرحلة الاولى المتمثلة بالنقاط (A,E) لاحظنا انخفاض في درجة حرارة الهواء الخارج الى 31°C وارتفاع المحتوى الرطوبي الى 13.29g/kg بسبب وسائط التبخر الخاصة بهذه المرحلة. اما مرحلة التبادل الحراري لاحظنا في المبادل هواء-هواء المتمثل بالنقاط (A,B) تم ارتفاع درجة حرارة الهواء الخارج من هذا المبادل الى 38°C مع انخفاض المحتوى الرطوبي الى 7g/kg وذلك بسبب عملية انتقال الحرارة من الهواء الداخل للمرحلة الثانية الى الهواء الخارج من المرحلة الاولى ، وفي المبادل هواء-ماء المتمثل بالنقاط (B,C) فمع ثبوت المحتوى الرطوبي 7g/kg الا ان درجة حرارة الهواء الخارج انخفضت الى 31°C لحصول عملية التبريد الغير مباشر . وفي المرحلة الثانية المتمثلة بالنقاط (C,D) لاحظنا ارتفاع في المحتوى الرطوبي الى 8.91g/kg وانخفاض في درجة حرارة الهواء الخارج الى 24°C بسبب وسائط تبخير المرحلة الثانية ، وبذلك نلاحظ انخفاض في المحتوى الرطوبي ودرجة حرارة الهواء للمرحلة الثانية نسبةً للمرحلة الاولى وهذا هو المطلوب . وبذلك يمكن استخدام مبردة الهواء متعددة المراحل لتبريد

المنازل والمعامل والابنية التجارية والجملونات حيث يمكن وضع منظومة التبريد هذه على سقوف المباني ويتم توزيع الهواء بواسطة مجاري الهواء.
الشكل (٨) يوضح علاقة درجة حرارة الهواء الخارج من المنظومة (في الحالتين مرحلة واحدة ومرحلتين) مع الزمن ابتداءً من الساعة السادسة صباحاً وحتى الساعة مساءً. ويتضح من الشكل ان درجة الحرارة تنخفض اكثر في المنظومة ذات المرحتين عما عليه في المنظومة ذات المرحلة الواحدة وبنسبة (٥٠%).

4. الاستنتاج:

تم في هذه الدراسة مقارنة أداء مبردة تبخيرية ذات مرحلة واحدة مع اخرى ذات مرحلتين. ويمكن تلخيص اهم مميزات هذه المنظومة بالنقاط التالية :

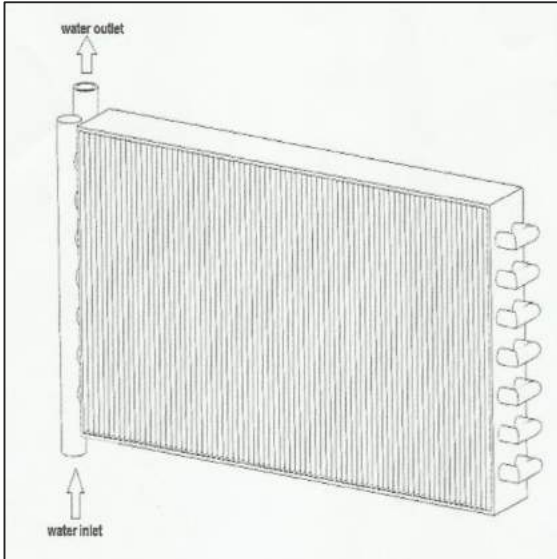
- * تعمل في أجواء حارة تصل الى 45°C بفعالية وكفاءة عالية وتزداد فعاليتها كلما قلت الرطوبة النسبية .
- * الاستهلاك المنخفض للطاقة مقارنةً بالمنظومات الاخرى التي تعمل في هكذا درجات حرارة . *
- صديقة للبيئة ولايسبب اي تلوث على عكس المنظومات الانضغاطية التي تسبب ضرر في البيئة بسبب تسرب غازات التبريد عند العطل او زيادة في استهلاك الطاقة والذي يؤدي زيادة في انتاج غاز ثاني أكسيد الكربون.
- * يمكن تصنيعها حسب حجم التطبيق .
- * سهولة التصنيع ، قلة الكلفة واغلب المواد الداخلة في التصنيع يمكن اعادة تدويرها بالكامل للحفاظ على البيئة .

وبينت النتائج ان اضافة مرحلة تبخيرية الى المبردة التقليدية يؤدي الى :

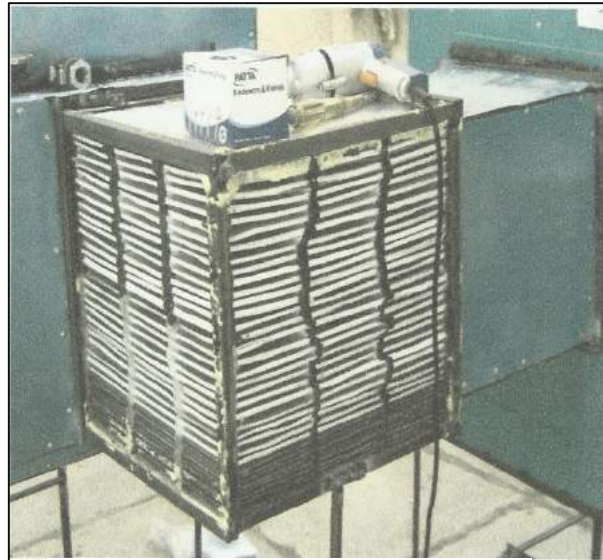
١. انخفاض درجة الحرارة الجافة للهواء (Dry bulb temperature) الخارج بنسبة (٥٠%) .
 ٢. انخفاض المحتوى الرطوبي (Specific humidity) بنسبة (٧٠%).
- ولكن ذلك تطلب وضع مبادل حراري هواء-هواء واخر ماء-هواء بين المرحتين لغرض رفع درجة حرارة الهواء الجافة بينهما لكي يتسنى حدوث عملية التبريد التبخيري في المرحلة الثانية وبذلك نلاحظ فعالية المبردة ذات المراحل المتعددة ، ومن جانب اخر من حيث استهلاك الطاقة فأن المنظومة مجتمعة تستهلك مايقرب 700W باستخدام محركات كهربائية اقتصادية ذات سرع متغيرة مقابل قدرة تبريد عالية تصل الى اكثر من ١٠٠٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية Btu مقارنةً بما يستهلكه مكيف من الطاقة يصل الى 5280W.

٥. التوصيات:

- بعد اثبات مبدأ العمل مما تقدم ، فمن غير المعقول من الناحية التجارية بيع منتج يتكون من ثلاث وحدات كبيرة للمستهلك ،حيث يمكن جعل المنتج يتكون من وحدة واحدة وبحجم اصغر وقطع ميكانيكية اقل. ان ميزات هذا التصميم تكمن في :
١. عدم وجود بكرات او احزمة ناقلة للحركة من المحرك الكهربائي الى المنفاخ ،هذا يقلل من خسائر الطاقة نتيجة الاحتكاك .
 ٢. استخدام محرك كهربائي واحد (1/2 قدرة حصانية) ذو محورين لادارة منفاخ المرحتين معاً لأستغلال المساحات (المنفاخ المزدوج) وكما موضح في الشكل (٥).
 ٣. انخفاض كلفة التصنيع ، سهولة الصيانة ، قلة الاعطال الحاصلة وصغر الحجم العام مقارنة بالحجم السابق.وبذلك اصبحت المرحلة الواحدة تمتلك جهة واحدة لوسائط التبخير وقد تم معالجة ذلك بجعل سمك وسائط التبخير اكبر، مما عوض عن المساحة السطحية المفقودة ليعطي نفس النتائج. الشكل (٦) يوضح مجسم ثلاثي الابعاد للتصميم النهائي والمرسوم بواسطة برنامج (Solid Works).



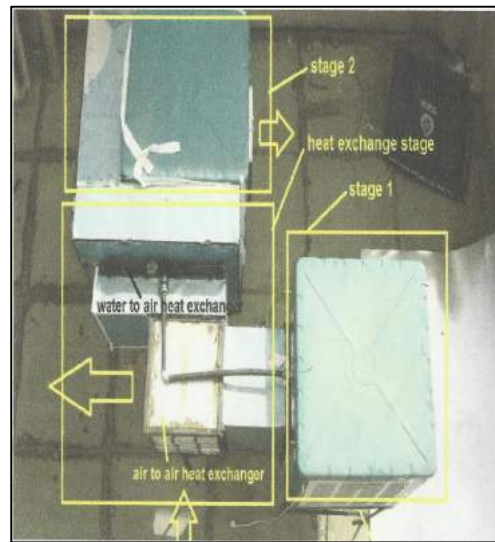
الشكل (٢)
مبادل حراري هواء- ماء



الشكل (٣)
مبادل حراري هواء- هواء

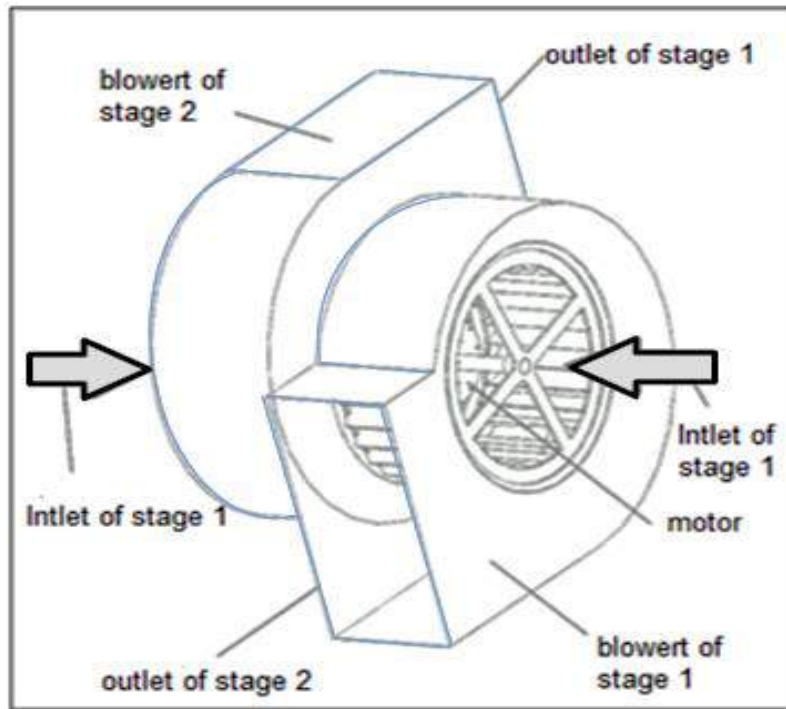


(a)

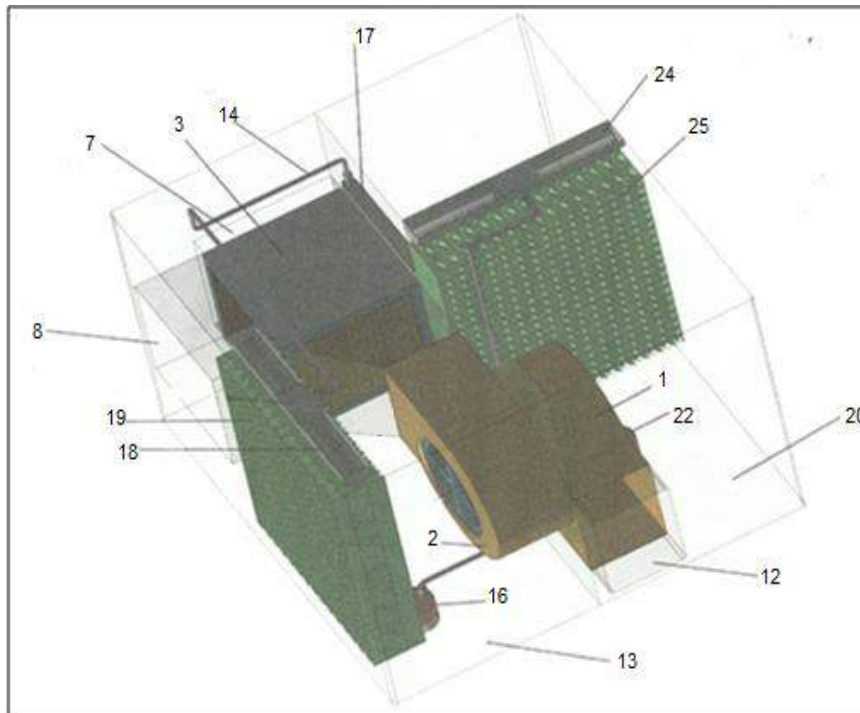


(b)

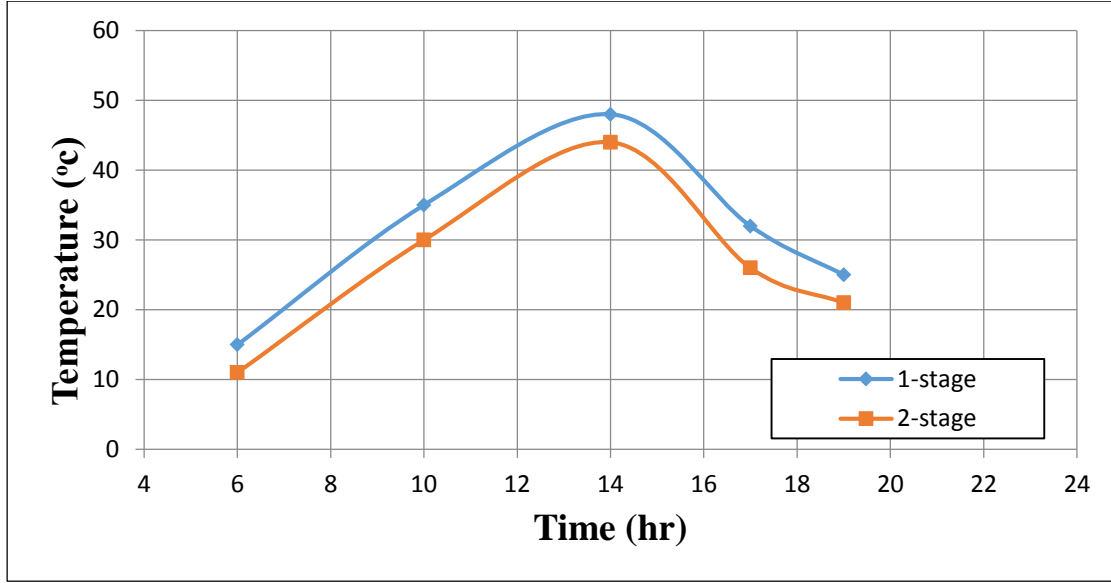
الشكل (٤)
صور للمبردة متعددة المراحل من عدة مساقط



الشكل (٥)
المنفاخ المزدوج



الشكل (٦)
المجسم للتصميم النهائي (مقترح)



شكل (٨)
يوضح علاقة درجة حرارة الهواء الخارج مع الزمن

Reference:

1. Gert Jan Bom, Robert Foster, Ebel Dijkstra, Amiaija Tumme, "Evaporative air-conditioning application for environmentally friendly cooling.", Energy Series Recent, World Bank Technical papers. No.421 (1999).
2. Rex Miller and Mark Miller, "Air conditioning and refrigeration.", second edition amazon.com paper back –October (14-2011).
3. Carrier air conditioning company. "Handbook of air conditioning system design" amazon.com, hardcover –June (1966).
4. Oikos, This article appeared in Energy Source Builder, August (1997).
5. David pearlmutter, Evyatar Erell, Yair Etzion, "A multi-stage down-draft evaporation cool tower for semi-enclosed spaces: Experiments with a water spraying system.", Soler Energy vol.82, May (2008).
6. Peng Xu^a, Tengfang Xu^b, Peng Yuan Shen, "Advancing evaporative rooftop packaged air conditioning: A new design and performance model development.", Applied Thermal Engineering vol.40, July (2012)