

دراسة نظرية وعملية لأداء برج تبريد باستخدام أنواع مختلفة من الحشوات

Experimental and Theoretical Study of Cooling Tower Performance Using Different Types of Packing

د. حسين حامد أحمد
كلية الهندسة
جامعة الموصل
العراق

رائد أحمد محمود
كلية الهندسة
جامعة الموصل
العراق

أحمد فؤاد محمود النعمة
كلية الهندسة
جامعة الموصل
العراق

الخلاصة

يهدف البحث إلى دراسة وتحليل الأداء الحراري في برج التبريد ذي الجريان المتعكس باستخدام ثلاث حشوات مختلفة الأولى كانت على شكل ألواح بلاستيكية متعرجة ذات قنوات مربعة الشكل والثانية مصنوعة على شكل ألواح من الألمنيوم متراصة واحدة فوق الأخرى ذات قنوات مربعة الشكل وأخيراً حشوة ثالثة مصنوعة من البلاستيك وعلى شكل كرة مرتبة بشكل مصفوفة مربعة. تم تحليل الأداء نظرياً وعملياً عن طريق دراسة تأثير درجة حرارة الماء الحار الداخل إلى برج التبريد. مع تغيير معدل الجريان الكتلي للماء، الهواء وللحشوات الثلاث. أظهرت الدراسة أن درجة حرارة الماء الداخل إلى برج التبريد تؤثر بشكل كبير على أداء البرج إذ لوحظ أنه كلما زادت درجة حرارة الماء الداخل قل معامل أداء برج التبريد، وعلى عكس ذلك فقد وجد بأنه كلما زاد معدل تدفق الهواء داخل البرج أدى ذلك بدوره إلى زيادة معامل أداء البرج عند حد معين. ولدراسة تأثير تغيير طول كل من الحشوات المختلفة تم اختيار ثلاثة أطوال وعليه تم الحصول على عدد من المعادلات الارتباطية (Correlation Equations) لتمثيل معامل أداء البرج من خلال أعداد برنامج حاسوبي لهذا الغرض باستخدام (EES) Engineering Equation Solver لمحاكاة طريقة الفرق المحدد المبني على نموذج رياضي. ومن نتائج البحث تبين أن معامل أداء برج التبريد باستخدام حشوة الألمنيوم هو الأعلى أما باستخدام الكرات فكانت الأدنى.

Abstract

This research aims to study and analyze the thermal performance of counter flow cooling tower with three different types of packing, Corrugated plastic sheets, perforated aluminum square channel sheets and finally plastic balls arranged in square matrix. The performance was analyzed theoretically and experimentally through studying the effect of temperature of the heat water entering the cooling tower with different mass flowrate of water and air for the three types of packing.

The results showed that the inlet water temperature to the cooling tower has a great effect on the tower performance. As the temperature increases the performance decreases. In contrast as the air flow rate increases the tower performance increases but to a certain limit.

To investigate the effect of the packing length, three lengths were chosen and a number of correlations equations representing the tower performance factor were derived a computer program was built using Engineering Equation Solver (EES) to simulate finite difference method based on a mathematical model.

The results showed that the highest tower performance was when aluminum packing was used and the lowest when plastic balls were used.

قائمة الرموز

الرمز	المعنى	الوحدات
a	المساحة الوسطية للاتصال لكل وحدة حجم حشوة	m^2 / m^3
Cp	الحرارة النوعية	$kJ / kg .K$
G	معدل تدفق الهواء	$kg / sec.m^2$
$h_G . a$	معامل انتقال الحرارة من جهة الهواء	$kW / m^3 . K$
$h_L . a$	معامل انتقال الحرارة من جهة الماء	$kW / m^3 . K$
i	المحتوى الحراري لمزيج بخار من الماء والهواء	$kJ / kg \text{ dry air}$
i_i	المحتوى الحراري المشبع لمزيج بخار من الماء والهواء عند درجة الحرارة الوسطية	$kJ / kg \text{ dry air}$
R	الرطوبة النسبية	-
$k_G.a$	معامل انتقال الكتلة الحجمي	$kg / sec.m^3$
L	معدل تدفق الماء	$kg / s.m^2$
N . T . U	عدد الوحدات المنتقلة	-
Q	الحمل الحراري (لكل m^2 من الحشوة)	kW
QL	الحرارة الكامنة	kW
QS	الحرارة المحسوسة	kW
t	درجة الحرارة	K
z	ارتفاع الحشوة	m
λ_o	الحرارة الكامنة للتبخير	kJ / kg

الرموز التحتية

الرموز	الدلالة
1	المقطع السفلي للبرج
2	المقطع العلوي للبرج
G	هواء
H	الحرارة المنتقلة
i	السطح البيئي للماء والهواء
L	ماء
M	الكتلة المنتقلة
v	بخار ماء
s	للحواء الرطب

١. المقدمة

في العديد من المنشآت الصناعية الضخمة مثل المحطات الكهربائية من الضروري أن تبعد الحرارة من بعض الأجزاء الحرارية؛ وأن بعضاً من هذه الحرارة يمكن نقلها مباشرة إلى الجو إما عن طريق الحمل الطبيعي أو عن طريق الحمل القسري (المراوح)، إلا أن بعض الأجزاء الميكانيكية والمنظومات الحرارية يكون تبريدها بواسطة الهواء غير كفوء، لذا يجب إيجاد وسيط بديل لتبريد هذه الحرارة؛ فقد فكر الباحثون سابقاً في إيجاد طريقة أكفأ لسحب الحرارة من أية منظومة حرارية فوجدوا أن استعمال الماء لنقل هذه الحرارة أكفأ ولكن تبرز هناك مشكلة وهي كيفية تبريد الماء الساخن الخارج من المبادل الحراري (Heat Exchanger)؛ ولحل هذه المعضلة استخدموا " أبراج التبريد " .

وقبل أن نتطرق إلى آلية عمل هذه الأبراج لابد من معرفة الأجزاء الأساسية لأبراج التبريد، إذ يتكون برج التبريد بصورة عامة من ثلاثة أجزاء أساسية:- الأولى، المُنْفِثَات، حيث يكون موقع هذه المُنْفِثَات عادةً في أعلى البرج والتي تقوم برش الماء الحار القادم من المكثفات بشكل رذاذ. أما الجزء الثاني فهو الحشوات (Packings)، التي هي واسطة انتقال الحرارة الأساسية في برج التبريد، إذ يتم عن طريقها زيادة المساحة السطحية التي يتعرض لها الماء الساقط من المُنْفِث. أما الجزء الثالث والذي يعد الأهم هو المراوح وتكون الفائدة الأساسية للمروحة هي دفع كمية أكبر من الهواء لتزيد من عملية تبخر الماء وبالتالي تبديد أكبر كمية من الحرارة. كما ويمكن تصنيف أبراج التبريد إلى نوعين إما حسب اتجاه انسياب الهواء بالنسبة إلى اتجاه انسياب الماء وهذه بدورها تقسم إلى ثلاثة أنواع أساسية، برج التبريد ذو الانسياب المتوازي، برج التبريد ذو الانسياب المتعامد، وأخيراً، برج التبريد ذو الانسياب المتعكس أو حسب انتقال الحرارة وتقسّم إلى نوعين الأول بالحمل القسري حيث أن مراوح أبراج التبريد ذات السحب الميكانيكي يمكن أن تكون عند جهة دخول الهواء وتدعى (Forced Draft) أو عند جهة خروج الهواء وتدعى (Induced Draft)؛ والثاني بالحمل الطبيعي مثل أبراج القذف، أبراج الرش والأبراج التي تكون على شكل مدخنة. يدعى الفرق بين درجة حرارة الماء الخارج من البرج ودرجة حرارة الهواء الرطب بالاقتراب (Approach). وكقاعدة عامة كلما زادت كمية الماء الداخلة للبرج كلما كان الفرق في درجة حرارة الماء الداخل والخارج قليلاً. أما الفرق بين درجة حرارة الماء الداخل والخارج إلى برج التبريد فيعرف (بمدى التبريد) (Cooling Range) [1]، وكما موضح في الشكل (1).

من الناحية العملية؛ ليس من المستطاع تبريد الماء إلى درجة حرارة الهواء الرطب، ففي أغلب الحالات تكون درجة حرارة الماء الخارج أعلى من درجة حرارة الهواء الرطب الداخل للبرج بمعدل فرق يتراوح بين (4-7) oC، كما أن الهواء الخارج من البرج يكون أقل من التشبع في جميع الحالات.

أما من الناحية النظرية فإن أقل درجة حرارة يمكن تبريد الماء إليها هي عند درجة حرارة الهواء الرطب الداخل إلى البرج، وفي هذه الحالة يصبح الهواء الخارج من البرج مشبعاً ببخار الماء. إذ أن درجة حرارة الهواء الجاف الداخل إلى البرج والرطوبة النسبية لهما تأثير على الأداء الحراري، ولكنهما يؤثران بشكل أكبر على معدل تبخر الماء. ويمكن توضيح هذا الشيء من خلال التحليل السايكرومتر (Psychrometric Analysis) للهواء المار خلال برج التبريد وكما موضح في الشكل (2)؛ حيث أن الهواء يدخل إلى المنظومة عند ظروف جوية مختلفة والمتمثلة في النقطة (A)، يمتص الحرارة والكتلة (رطوبة) من الماء، ويخرج عند النقطة (B) عند ظروف مشبعة (عند الأحمال الواطئة، الهواء المدفوع إلى الأعلى ربما لا يكون مشبعاً). إن كمية الحرارة المنتقلة من الماء إلى الهواء هي منسوبة إلى الفرق في المحتوى الحراري (الانثاليبي) للهواء بين الظروف الداخلة والخارجة (iB - iA) ومادامت خطوط الانثاليبي الثابتة تكافئ تقريباً خطوط درجة حرارة الهواء الرطب فالتغير في أنثاليبي الهواء ممكن أن نعتبره هدفاً عملياً يمكن إيجاده عن طريق التغير في درجة حرارة الهواء الرطب.

أما الشكل (3) فهو مخطط التبريد ذو الانسياب المتعكس مع خط التشغيل (Operating Line) AB " له ميل يساوي $\frac{L.Cp_L}{G}$ ". أما المسافة العمودية بين منحنى الإشباع PQ وخط التشغيل AB فتمثل القوة الدافعة الكلية

للانثاليبي " ii - iG " [2].

يتم تبريد الماء في برج التبريد بواسطة عملية مركبة من عمليتي انتقال الكتلة والحرارة. وهناك العديد من النظريات التي طورت منذ أوائل القرن التاسع عشر والتي تصف ظاهرة انتقال الكتلة والحرارة اللتين تحدثان في أي جهاز تبريد ماء معرض للجو ومن أبرز هذه النظريات النظرية المقترحة من قبل الباحث (Merkel) [2]، الذي قام بوضع عدة فرضيات لغرض تسهيل طريقة الحل والتي تشكل إلى يومنا هذا العمود الفقري لتحليل أداء برج التبريد. إن تحليل (Merkel) ومعادلاته تعتمد مبدأ نقل الكتلة والحرارة الإجمالية والمبنية على الفرق في المحتوى الحراري الكامن (Potential Enthalpy) كقوة دافعة أساسية بدلاً من نقل الحرارة الكامنة والمحسوسة إذ أن كل جزئيه ماء في برج التبريد فرضت على أنها محاطة بسطح بيني (Interface) والتي من خلاله تنتقل الحرارة من الماء إلى الهواء.

حيث استخدم الباحث (Merkel) في البداية علاقة التقريب $(\frac{h_G}{k_G.Cp_s} = 1)$ والتي هي في الأصل مقترحة من

قبل الباحث (Lewis) [2]، ومن ثم ربط عمليتي انتقال الكتلة والحرارة بالمعادلة التفاضلية التالية:

$$L \cdot Cp_L \cdot dt_L = k_G \cdot a (i_i - i_G) dz = G \cdot di_G$$

كذلك ضُمِنَت في عمل الباحث (Sutherland) [3] خسائر التبخر ، إذ أن التحليل الدقيق المبني على الرطوبة النسبية كقوة دافعة مقارنة مع الطريقة التقريبية الشائعة والمبنية على قوة دفع الانتالبي المطورة من قبل الباحث (Merkel) والتي لم تأخذ بنظر الاعتبار الخسائر الناتجة عن التبخر. أظهرت النتائج أنه عندما نهمل تبخر الماء فإن نسبة الخطأ المتكونة محصورة بين (5 % و 15 %) في حل (Merkel) .

الباحث (Shaoul) [4] ، استخدم برج تبريد يعمل بقوة الدفع الميكانيكي ذي الجريان المتعكس بمساحة مقطع مربعة (303 * 303mm²) ، حيث قام بدراسة عمليتي انتقال الكتلة والحرارة لمنضدة ثابتة تحوي على كرات بقطر (38.1mm) مرتبة بشكل مصفوفة مربعة (Square Pitch Matrix) . حيث تم إيجاد معامل انتقال كل من الكتلة والحرارة . وقد رُسم معامل انتقال الكتلة الحجمي ($k_{G,a}$) على المحور اللوغاريتمي مقابل معدل تدفق الماء (L) عند قيم معدل تدفق الهواء (G) ، ورسم معامل انتقال الكتلة الحجمي ($k_{G,a}$) على المحور اللوغاريتمي مقابل معدل تدفق الهواء (G) عند قيم معدل تدفق الماء (L) ، فأظهرت النتائج بأنها علاقات خطية تقريباً .

أما الباحث (AI-Ni'ema) [5] ، فقد استخدم منشأ تجريبي لبرج تبريد نوع الجريان المتعكس ذا مساحة مقطع مربعة 600 * (450mm²) في عمله . وبارتفاع بلغ (2400mm) مصنوع من ألواح الحديد المغلوة ، ومن ثم عزله للتقليل من عملية انتقال الحرارة من وإلى الجو المحيط بالبرج . إذ استخدمت في هذه الدراسة ألواح بلاستيكية واسبستية كحشوة ذات أشكال هندسية مختلفة وبطول (600mm) ، وتم تحليل الأداء نظرياً وعملياً عن طريق دراسة تأثير درجة حرارة الماء الحار الداخل إلى برج التبريد لنوعي الحشوات المستخدمة. وقد اختبرت ثلاث قيم لدرجات حرارة الماء الداخل إلى البرج (36,40,44oC) ، وخمسة معدلات تدفق كتلي لجريان الماء بالاقتران مع ثلاثة معدلات لجريان الهواء ومن ثم قورن بين أداء نوعي الحشوتين المستخدمتين واللتين تعملان تحت نظام توزيع المياه بالرش . ولدراسة تأثير النهايات (End Effects) تم تغيير طول الحشوة البلاستيكية عند ثلاث قيم (150mm و 300 و 600) وجرى تصحيح معامل أداء البرج من هذه التأثيرات إذ تم الحصول على عدد من المعادلات الارتباطية (Correlation Equations) لتمثيل معامل أداء البرج بدلالة كل من معدل تدفق الماء والهواء . كما دُرست المعاملات الحجمية لانتقال الكتلة والحرارة ؛ وتأثير كل من نسبة معدل تدفق الماء إلى الهواء (L/G) ودرجة حرارة الماء الداخل إلى البرج عليها .

أما الباحث (Abdel-Ghaffar) [6] ، فقد قام بأجراء دراسة على دائرة اختبار تشمل 12 برجاً ذا جريان متعكس حيث استخدم ثلاثة أنواع من الحشوات أثناء إجراء التجارب والتي تم تصنيعها من ألواح البلاستيك المتعرجة (PVC) بارتفاعات تتراوح بين (800-1200mm) . وفي أثناء التجارب تم دراسة تأثير تغيير العوامل المختلفة على أداء برج التبريد ومنها سرعة الهواء المار خلال البرج من (10.5-17.5m/s) ومعدل تصريف الماء خلال البرج من (150-80m³/s) . تم قياس درجة حرارة كل من الهواء والماء عند الدخول والخروج من البرج باستخدام المزدوجات الحرارية ، ثم صياغة النتائج بصورة منحنيات تمثل العلاقة بين عوامل التشغيل المختلفة وأداء البرج . وقد أوضحت النتائج أن زيادة معدل الجريان النسبي بين الماء والهواء (L/G) يؤدي إلى نقص في عدد الوحدات المنتقلة كما يؤدي انخفاض درجة حرارة الهواء الرطبة إلى زيادة مدى البرج (Range) .

قدم الباحثون (Bougleux و فريقيه) [7] دراسة تحليلية لعملية التبخير المباشر في برج التبريد والمبردات التبخيرية باستخدام طريقة (NTU) عن طريق المقارنة بين النتائج العملية باستخدام برج تبريد ذو جريان المتعكس (counter flow) والنموذج عددي أحادي البعد ودراسة تأثير كل من معدل التدفق للماء ودرجة حرارة الماء الداخلة وسمك الحشوة المستخدمة في برج التبريد .

قدم الباحث (Naphon) [8] دراسة عملية لدراسة خصائص انتقال الحرارة خلال أبراج تبريد التبخيرية حيث استخدم الباحث معدل جريان متغير للهواء والماء من (0.01 - 0.07 kg/s) و من (0.04 - 0.08 kg/s) على التوالي وكانت درجة حرارة الماء الداخل إلى برج التبريد ضمن المدى (30 oC) إلى (40 oC) ودرجة حرارة الهواء الجافة كانت (23 oC) . وقد استخدم الباحث معادلات حفظ الطاقة والكتلة معتمداً على طريقة التكرار لحساب خصائص انتقال الحرارة من برج التبريد .

يهدف البحث الحالي إلى دراسة وتحليل الأداء الحراري في برج التبريد ذي الجريان المتعكس باستخدام ثلاث حشوات مختلفة من ألومنيوم ، بلاستيك وكرات لمعرفة الأفضل من حيث الأداء .

الجانب النظري :

نفرض في البداية أن هناك برج تبريد له مساحة مقطع عرضية تبلغ متر مربع واحد (m²) ، وحجم تبريد (V) ، يحتوي على متر مربع (m²) من سطح حشوة لكل متر مكعب (m³) ، وان (dz) هو ارتفاع تفاضلي ، عند قوة سحب أدبياتي ، لجريان متعكس بين الماء والهواء عند مساحة مقطع ثابتة على طول برج التبريد ، والتي فيها يكون الماء والهواء في اتصال مباشر وكما موضح في الشكل (4) .

إن الماء يدخل إلى مقطع البرج بمعدل تدفق كتلي " (L + dL) kg/s.m² من مساحة مقطع البرج وبدرجة حرارة (t_L + dt_L) .
 إن عملية انتقال الكتلة والحرارة ممكن توضيحها تخطيطيا كما في الشكل (5) . إذ أن الهواء يدخل إلى مقطع برج التبريد بمعدل تدفق كتلي (G) في كيلو غرام واحد من الهواء الجاف لكل ثانية ولكل مساحة مقطع من برج التبريد (kg/s.m²) . و أن درجة حرارة الماء (t_L) تكون محاطة بهذا الهواء الداخل إلى برج التبريد عند درجة حرارة هواء جافة (t_G) ، ورطوبة نسبية (R_G) ، وعند محتوى حراري (i_G) .
 إن السطح البيني فرض على أنه طبقة من الهواء المشبع عند درجة حرارة وسطية (t_i) ومحتوى حراري (ii) ورطوبة نسبية (R_i) . ويفرض أن قيمة الحرارة النوعية للماء (C_{pL}) تساوي (4.19 kJ/kg . °C) . وعند موازنة كتلة الماء تحت ظروف تشغيلية مستقرة (Steady State Conditions) فإن معدل الكتلة المنتقلة من الماء بواسطة التبخر على الشريحة (dz) تساوي معدل الزيادة بالرطوبة النسبية للهواء ، إذا ، ومن هذا المنطلق ممكن الحصول على العلاقة التالية [9] :

$$dL = G \cdot dR_G \quad \text{-----} \quad (1)$$

الحرارة الكلية المنتقلة من الماء عند درجة حرارة (t_L) خلال طبقة السائل (الماء) إلى السطح البيني للسائل والهواء عند درجة حرارة (t_i) ولكل m² من الحشوة ، ممكن أن تعرف من المعادلة التالية :

$$Q_{\text{Total}} = L \cdot C_{pL} \cdot dt_L = h_L \cdot a_H (t_L - t_i) dz \cong G \cdot di_G \quad \text{----} \quad (2)$$

ومن معرفة قيمة درجة حرارة السطح البيني (t_i) ، يمكن الحصول على معامل انتقال الحرارة الحجمي من جانب الماء (h_L . a_H) عند تطبيق المعادلة (2) .
 أما معدل انتقال الحرارة المحسوسة من السطح البيني خلال طبقة الهواء إلى مجرى الهواء عند درجة حرارة (t_G) (هي) :

$$QS = G \cdot C_{ps} \cdot dt_G = h_G \cdot a_H (t_i - t_G) dz \quad \text{-----} \quad (3)$$

من المعادلة (3) ممكن إيجاد معامل انتقال الحرارة الحجمي من جانب الهواء (h_G . a_H) ، وذلك عند معرفة قيمة درجة حرارة السطح البيني (t_i) .
 أما معدل كتلة الماء المنتقلة نتيجة التبخر من السطح البيني إلى الهواء في الشريحة (dz) ممكن التعبير عنه بالعلاقة التالية :

$$G \cdot dH_G = dL = k_G \cdot a_M \cdot (R_i - R_G) dz \quad \text{-----} \quad (4)$$

إن المعادلة (4) هي علاقة تربط بين التغير في رطوبة الهواء إلى معامل انتقال الكتلة الحجمي (k_G . a_M) ، فإذا كانت العلاقة بين الرطوبة النسبية للهواء الداخل ، R_G ، والرطوبة النسبية للهواء المشبع عند درجة حرارة السطح البيني للماء والهواء ، R_i معلومة ، إذا من الممكن مكاملة المعادلة (4) مباشرة وإيجاد معامل انتقال الكتلة الحجمي .

إن عملية التبادل الحراري يمكن أن تصل إلى حالة التوازن عندما (t_G = t_L) والهواء يصبح عندئذ مشبع بالرطوبة عند نفس الدرجة . تحت ظروف أديباتية ، إذ أن عملية الموازنة تصل عند درجة حرارة التشبع الأديباتي ، أو عند الخواص الترموديناميكية لدرجة حرارة الهواء الرطب . إذ تعتبر هذه أقل درجة حرارة ممكن أن نحصل عليها في برج التبريد .

استعمل الباحث (Merkel) [2] ، في البداية طريقة التقريب والتي هي في الأصل مقترحة من قبل الباحث (Lewis) [2] ، لكي نربط كل من عمليتي انتقال الكتلة والحرارة المحسوسة معا والمتمثلة بالمعادلة الآتية:

$$\frac{h_G}{k_G \cdot C_{p_s}} \cong 1 \quad \text{-----} \quad (5)$$

وعند تعويض المعادلة (5) في المعادلة (3) وبفرض أن مساحة انتقال الحرارة a_H مساوية لمساحة انتقال الكتلة a_M أي $(a_H = a_M = a)$ ، ومن ثم ضرب طرفي كل من المعادلة (4) بـ (λ_0) والجمع ، سوف نحصل على العلاقة التالية :

$$\frac{di_G}{i_i - i_G} = \frac{k_G \cdot a}{G} \cdot dz \quad \text{-----} \quad (6)$$

هذه المعادلة تربط المحتوى الحراري للهواء مع معامل انتقال الكتلة الحجمي . ومن تساوي المعادلتين (2) و (6) نحصل على :

$$L \cdot Cp_L \cdot dt_L = k_G \cdot a \cdot (i_i - i_G) dz \approx G \cdot di_G \quad \text{-----} \quad (7)$$

وعند التكامل تصبح :

$$\frac{k_G \cdot a \cdot z}{L} = \int_{t_{L1}}^{t_{L2}} \frac{Cp_L \cdot dt_L}{i_i - i_G} \quad \text{-----} \quad (7a)$$

أو :

$$\frac{k_G \cdot a \cdot z}{G} = \int_{i_{G1}}^{i_{G2}} \frac{di_G}{i_i - i_G} \quad \text{-----} \quad (7b)$$

(7 b & 7 a) معادلتان أساسيتان تستخدمان لحساب أداء برج التبريد ، إذ نلاحظ بان كلا من طرفي المعادلتين أعلاه هي قيم لابعدية (Dimensionless) . الجهة اليمنى لكلا المعادلتين تحتوي فقط على خواص ثرموديناميكية للهواء المار خلال البرج ، أما الطرف الأيسر فإنه لا يعتمد على الخواص الثرموديناميكية في البرج بل تعتمد على معدل تدفق الماء (L) والهواء (G) .
في تطبيقات برج التبريد ، المصطلح $(k_G \cdot a \cdot z / L)$ كثيرا ما يشير إلى خواص البرج . إذ إن المعنى الأساس لهذا المصطلح هو مشابه تماما لـ (N. T. U.) والذي يعرف بـ (عدد الوحدات المنتقلة) في تصميم المبادلات الحرارية (Heat Exchanger) [10] .

2. الجانب العملي :

تم إجراء التجارب العملية على مقطع طولي قائم مربع الشكل بطول (1700mm) وبمساحة مقطع عرضي (300 * 300mm) والذي يمكن توضيحه في الشكل التخطيطي (6) .
وهناك أربعة متغيرات أساسية تم أخذها في العمل وهي :

- 1 - معدل تدفق الماء .
 - 2 - معدل تدفق الهواء .
 - 3 - درجة حرارة الماء الداخل إلى برج التبريد .
 - 4 - نوع الحشوة المستخدمة مع تغير ارتفاع كل حشوة .
- تم دراسة معامل أداء برج التبريد نظريا وعمليا وذلك عن طريق دراسة تأثير درجة حرارة الماء الحار الداخل إلى البرج ، إذ تم اختيار قيمتين لدرجة حرارة الماء الداخل إلى البرج والتي بلغت (45 °C و 48 °C) عند خمس معدلات جريان ماء (400,360,300,240,200 l/h) بالاقتران مع ثلاث معدلات جريان هواء (290,250,220 m³/s) ولدراسة تأثير نوع وطول الحشوة على معامل أداء برج التبريد تم استخدام ثلاثة أطوال مختلفة لكل من حشوة بلاستيكية وألمنيوم وكرات وهي (600 , 400 , 200 mm) إذ كانت الأولى على شكل ألواح بلاستيكية متراسة واحدة بجانب الأخرى ذات قنوات مربعة الشكل مائلة بزوايا مقدارها (45°C) ، أما الثانية فكانت على شكل ألواح من الألمنيوم متراسة واحدة فوق الأخرى ذات قنوات مربعة الشكل والثالثة حشوة كروية الشكل بقطر (80mm) مرتبة بشكل مصفوفة مربعة وبارتفاع (600mm) حيث أن كل الحشوات الثلاث أعلاه كانت تعمل تحت نظام توزيع ماء نوع الرش.

3. النتائج العملية والمناقشة :

تم الحصول على مجموعة من البيانات العملية من خلال تشغيل برج التبريد ولتوضيح هذه البيانات وتسهيل عملية المقارنة بين النتائج المستحصلة لابد من عرضها بشكل تخطيطي . إذ أن النتائج التي تم الحصول عليها كانت عند هواء غير مشبع خارج من البرج .

الشكل (7) هو مقارنة بين منحنيات معامل الأداء لبرج التبريد ($k_G . a . z / L$) لكل من حشوة بلاستيكية وألمنيوم وكرة عند ارتفاع (600mm) ، إذ أن كل واحدة من هذه الحشوات تم حسابها عند ثلاث معدلات تدفق هواء (G) وعند درجة حرارة ماء داخلة إلى برج التبريد تبلغ ($45^\circ C$) .

حيث يوضح الشكل بأن معامل الأداء لبرج التبريد سوف يقل مع زيادة النسبة (L/G) بشرط ثبوت معدل تدفق الهواء (G) لكل من الحشوات الثلاث المذكورة أعلاه . والعوامل التي يمكن اعتبارها سبباً في زيادة معامل أداء البرج هي ؛ زيادة المساحة السطحية وطبيعة جريان الهواء خلال الحشوة إضافة إلى مدى قابلية كل من الحشوات الثلاث على الترطيب (Degree of wetability) وهذا ماتم ملاحظته عملياً من خلال منحنيات النتائج.

ولتوضيح تأثير درجة حرارة الماء الداخل إلى البرج على معامل أداء برج التبريد ($k_G . a . z / L$) ، نلاحظ بان الشكل (8) يعبر باختصار عن ذلك إذ انه عند تثبيت النسبة بين معدل تدفق الماء إلى الهواء (L/G) وأثناء زيادة درجة حرارة الماء الداخل من ($45^\circ C$ إلى $48^\circ C$) فان معامل أداء البرج سوف يقل . هذه الحالة تؤكد بأنه عند زيادة الحمل الحراري سوف يؤدي ذلك إلى التقليل من معامل أداء البرج . والنتائج العملية قد بينت هذا النقصان الحاصل في كمية ($k_G . a . z / L$) وبمعدل (11.7 %) تقريبا عندما كان هناك فرق في درجة حرارة الماء الداخل إلى البرج بمقدار ($3^\circ C$) .

أما في الشكل (9) نلاحظ انه عند زيادة ارتفاع الحشوة فان معامل الأداء لبرج التبريد سوف يزداد أيضاً ، و بنفس الميل تقريبا ويعزى ذلك إلى طول فترة تعرض الماء إلى الهواء على سطح الحشوة . وهذا يتطابق مع اغلب بحوث وتقارير الباحثين المختصين في مجال أبرج التبريد [4] . تم تشكيل معادلة ارتباطية تربط بين معامل أداء البرج ($k_G . a . z / L$) والنسبة بين معدل تدفق الماء إلى الهواء (L/G) وكما يلي :

$$k_G . a . z / L = f (L/G)^{-m} \quad \text{-----} \quad (8)$$

حيث أن (f & m) ثابت . ومن هذه المعادلة تم الحصول على النتائج المبينة في جدول رقم (١) . إن صيغة المعادلة (8) لها استعمال واسع في تخمين معامل أداء برج التبريد ، إذ إن هذه المعادلة تعتمد بالأساس على النسبة بين معدل تدفق الماء إلى الهواء (L/G) ، لذا فان كل منحنى في الشكل (9) ممكن أن نعبر عنه بصيغة المعادلة الارتباطية أعلاه . لذلك فان تسعة معادلات ارتباطية تم الحصول عليها لمعامل أداء البرج لحشوة ألمنيوم . فعلى سبيل المثال ، لو أخذنا حشوة ألمنيوم عند طول (600mm) ، ومعدل تدفق هواء ($G=220m^3/hr$) فان المعادلة الارتباطية تكون على النحو التالي :

$$k_G . a . z / L = 0.738 (L/G)^{-0.07347} \pm 0.18 \% \quad \text{-----} \quad (9)$$

أما الشكل (10) فيمثل المقارنة بين منحنيات معامل انتقال الكتلة الحجمي ($k_G . a$) عند ارتفاع (600mm) لحشوة بلاستيكية وألمنيوم وكرة وكمية تدفق هواء متغيرة مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل عند ($45^\circ C$) ، إذ نلاحظ من الشكل انه كلما زاد معدل تدفق الهواء (G) أو معدل تدفق الماء إلى الهواء (L/G) عند كل حشوة أدى ذلك إلى زيادة معامل انتقال الكتلة الحجمي . فقد تم تشكيل معادلة ارتباطية تربط بين معدل تدفق الماء (L) ومعدل تدفق الهواء (G) حيث أن هذه المعادلة هي معتمدة بالأساس على المعادلة الارتباطية لمعامل أداء البرج ($k_G . a . z / L$) وذلك بضرب المعادلة الارتباطية لمعامل أداء البرج في (L/z) المحسوبة عمليا ، ومنه نحصل على :

$$k_G . a = 0.728 * L^{0.404} * G^{0.599} \quad \text{-----} \quad (10)$$

ومن خلال الشكل (10) نستنتج أن معامل الكتلة الحجمي ($k_G . a$) لحشوة الألمنيوم هو الأعلى وبنسبة 26% مقارنة مع حشوة البلاستيك وحسب ما موضح بالشكل.

ولتوضيح تأثير درجة حرارة الماء الداخل إلى البرج على معامل انتقال الكتلة الحجمي ($k_G . a$) نلاحظ بان الشكل (11) يعبر باختصار عن ذلك إذ انه عند تثبيت النسبة بين معدل تدفق الماء إلى الهواء (L/G) وأثناء زيادة درجة حرارة الماء الداخل من ($45^\circ C$ إلى $48^\circ C$) فان معامل انتقال الكتلة الحجمي سوف يقل . هذه الحالة تؤكد بأنه عند زيادة الحمل الحراري سوف يؤدي إلى التقليل من قيمة ($k_G . a$) .

الشكل (12) يمثل المقارنة بين منحنيات معامل انتقال الحرارة الحجمي من جانب الهواء ($h_G . a$) عند ارتفاع حشوة بلاستيكية وألمنيوم وكرة عند ثلاث كميات تدفق هواء متغيرة مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل عند ($45^\circ C$) ، إذ نلاحظ من الشكل انه كلما زاد معدل تدفق الهواء وطول الحشوة أدى ذلك إلى زيادة معامل انتقال الحرارة الحجمي . كذلك نلاحظ انه كلما زادت نسبة معدل تدفق الماء إلى الهواء (L/G) أدى ذلك إلى زيادة معامل انتقال الحرارة الحجمي . أما الشكل (13) فيمثل المقارنة بين منحنيات معامل انتقال الحرارة الحجمي من جانب الهواء ($h_G . a$) ثلاث حشوات ولكن عند درجة حرارة ($48^\circ C$) حيث يوضح الشكل انه كلما زادت درجة حرارة الماء الداخل من ($45^\circ C$ إلى $48^\circ C$) أدى ذلك إلى نقصان معامل انتقال الحرارة الحجمي ($h_G . a$) .

الشكل (14) يمثل المقارنة بين منحنيات معامل انتقال الحرارة الحجمي من جانب الماء ($h_L . a$) عند ارتفاع حشوة بلاستيكية وألمنيوم وكرة عند ثلاث كميات تدفق هواء متغيرة مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل عند ($45^\circ C$) ، إذ نلاحظ من الشكل انه كلما زاد معدل تدفق الهواء (G) أو معدل تدفق الماء إلى الهواء (L/G) وطول الحشوة أدى ذلك إلى زيادة معامل انتقال الحرارة الحجمي .

الشكل (15) يمثل المقارنة بين منحنيات معامل انتقال الحرارة الحجمي من جانب الماء ($h_L . a$) عند ارتفاع حشوة بلاستيكية وألمنيوم وكرة عند ثلاث كميات تدفق هواء متغيرة مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل عند ($48^\circ C$) ، إذ نلاحظ من الشكل انه كلما زاد معدل تدفق الهواء وطول الحشوة أدى ذلك إلى زيادة معامل انتقال الحرارة الحجمي . كذلك نلاحظ انه كلما زادت نسبة معدل تدفق الماء إلى الهواء (L/G) أدى ذلك إلى زيادة معامل انتقال الحرارة الحجمي .

4. الاستنتاجات :

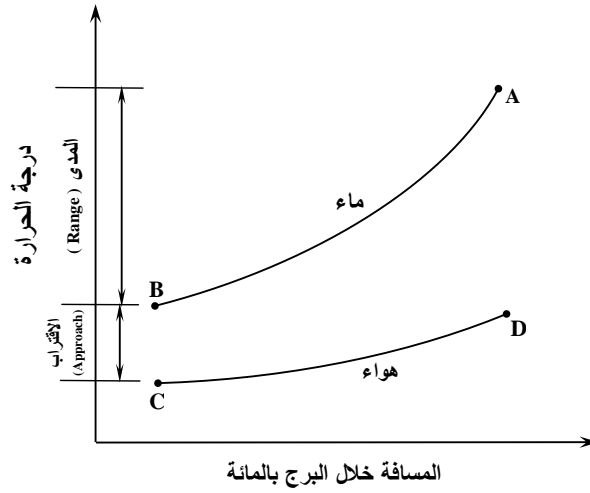
- من هذه الدراسة يمكن أستنتاج مايلي :
- 1 - كلما زادت درجة حرارة الماء الداخل إلى برج التبريد أدى ذلك إلى حدوث نقصان في معامل أداء برج التبريد وبمعدل (11.7%) تقريبا عند كل ($3^\circ C$) زيادة في درجة حرارة الماء الداخل إلى البرج ، ويعزى هذا النقصان إلى الزيادة في الحمل الحراري .
 - 2 - عند زيادة درجة حرارة الماء الداخل إلى البرج حدث نقصان في معامل انتقال الحرارة الحجمي ($k_G . a$) والسبب يعود إلى النقصان الحاصل في قيمة معامل أداء البرج ($k_G . a . z / L$) ، أي بمعنى آخر عندما تزداد قيمة معدل تدفق الهواء تزداد من (0.608 إلى 1.141 $kg/s.m^2$) سوف يؤدي ذلك إلى زيادة في قيمة معامل انتقال الكتلة الحجمي بمقدار (40.6%) . أما تأثير درجة حرارة الماء الداخل ومعدل تدفق الهواء على معامل انتقال الحرارة الحجمي ($h_G . a$) فهو مشابه لتأثيره على ($k_G . a$) ، وهذا يعود إلى علاقة لويس .
 - 3 - إن معامل انتقال الحرارة الحجمي من جانب السائل ($h_L . a$) يزداد بزيادة درجة حرارة الماء وكذلك يزداد مع زيادة معدل تدفق الماء والهواء .
 - 4 - تم الحصول على تسعة معادلات ارتباطيه لحشوة ألمنيوم عند درجة حرارة الماء الداخل ($45^\circ C$) ، ولثلاث أطوال وكما موضح في الجدول رقم (1) .
 - 5 - إن معامل انتقال الكتلة الحجمي ($k_G . a$) لحشوة الألمنيوم هو أعلى من حشوة البلاستيك بمقدار 26% وعلى الرغم من هذه الزيادة فإنه لا يوصى باستخدام حشوة الألمنيوم وذلك لارتفاع كلفته مقارنة مع الحشوات الأخرى .

5 . المصادر

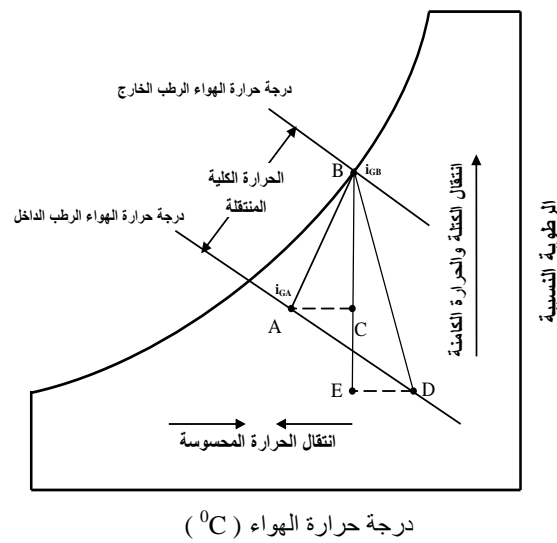
1. Rosaler, Robert C., "*The Standard Handbook of Plant Engineering*", 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, 1995.
2. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Handbook and Product Dictionary HVAC Systems and Equipments, 1992.
3. Sutherland, J. W., "*Analysis of Mechanical – Draft Counter Flow Air / Water Cooling Towers* ", J. of Heat Transfer, Trans. ASME, Vol. 105, PP. 576 – 583, August 1983.
4. Shaoul, S. S., "*Performance of Cooling Tower* ", M. Sc. Thesis, University of Baghdad, 1975.
5. AL-Ni'ema, A. F., "*A Theoretical and Practical Study of The Cooling Tower Performance with Counter flow* ", M. Sc. Thesis, University of Tikrit, January, 2003 .
6. Abdel-Ghaffar, Y. E. , "*Effect of operating parameters on the Performance of counter flow type Cooling Towers* ", Industry Education, Dep, Mansoura Univ. 2003.
7. [Bougleux, P A F, Saboya, F E M, Marques, R Pitanga, Parised, J A R](#) "*Numerical studied for direct evaporation in cooling towers*" [International Journal of Mechanical Engineering Education, July 2007](#) .
8. Naphon, P. "*Cooling tower* " J. of Heat Transfer, Trans. ASME, Vol. 120, PP. 233 – 245, August 2005.
9. Mickley, H. S., "*Design of Forced – Draft Air – Conditioning Equipment* ", Chemical Eng. Prog. , Vol. 45, No. 12, PP. 739 – 745, 1949.
10. Li, K. W., and Priddy, A. P., "*Power Plant System Design* ", John Wiley and Sons Book Co., Inc., PP. 282 – 333, 1985.

جدول (1) يبين قيم معامل أداء برج التبريد لحشوة ألمنيوم

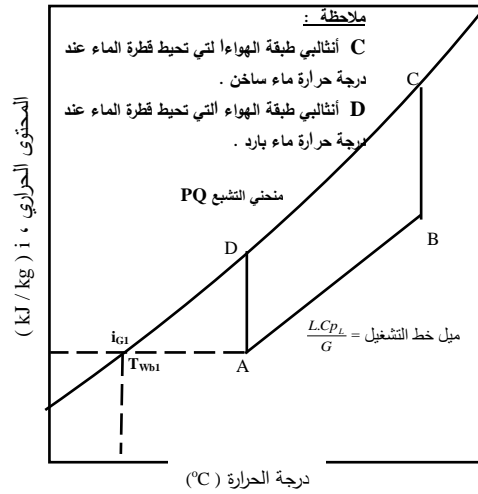
ارتفاع الحشوة (MM)	قيم معامل أداء برج التبريد (k _G . a. z / L)		
	G = 220 m ³ /hr	G = 250 m ³ /hr	G = 290 m ³ /hr
600	0.7380 * (L/G) ^{-0.07347}	0.7637 * (L/G) ^{-0.08945}	0.7904 * (L/G) ^{-0.077944}
400	0.6774 * (L/G) ^{-0.10723}	0.7017 * (L/G) ^{-0.08369}	0.7245 * (L/G) ^{-0.090053}
200	0.6117 * (L/G) ^{-0.096880}	0.6340 * (L/G) ^{-0.082481}	0.6565 * (L/G) ^{-0.080480}



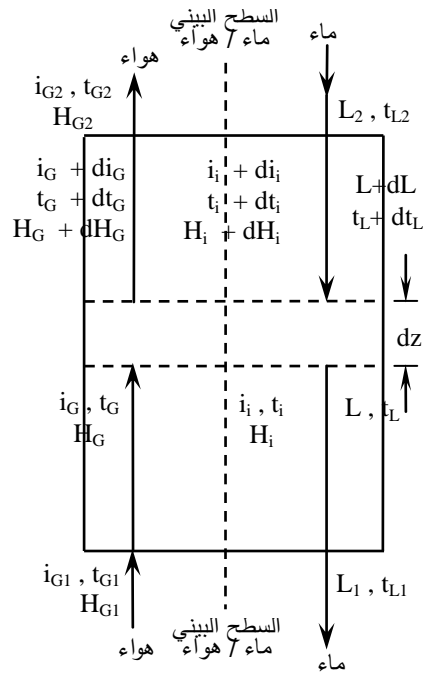
الشكل (1) علاقة درجة الحرارة بين الماء والهواء في برج تبريد ذي الجريان المتعاكس



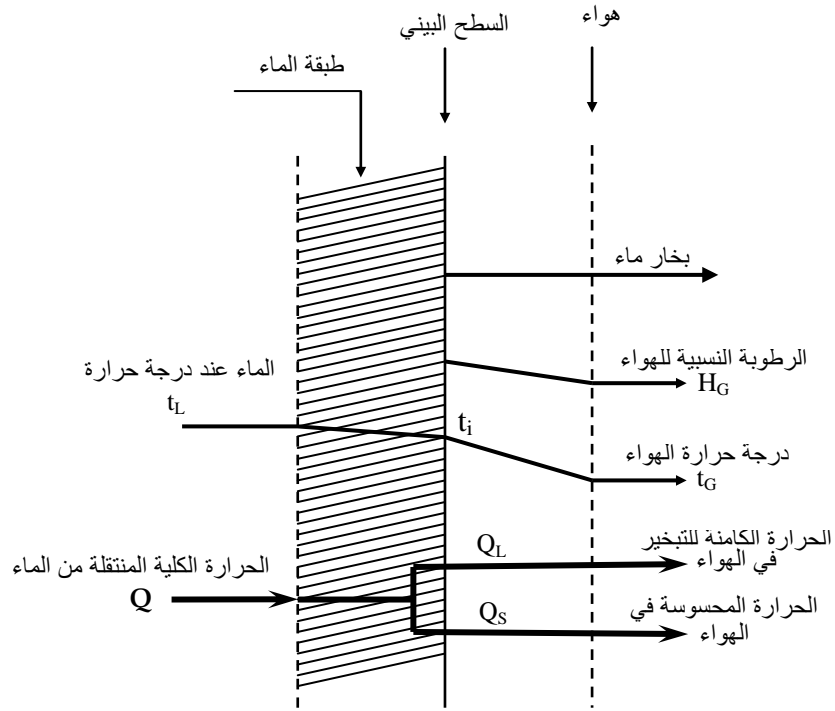
الشكل (2) التحليل السايكروميتري للهواء المار خلال برج التبريد



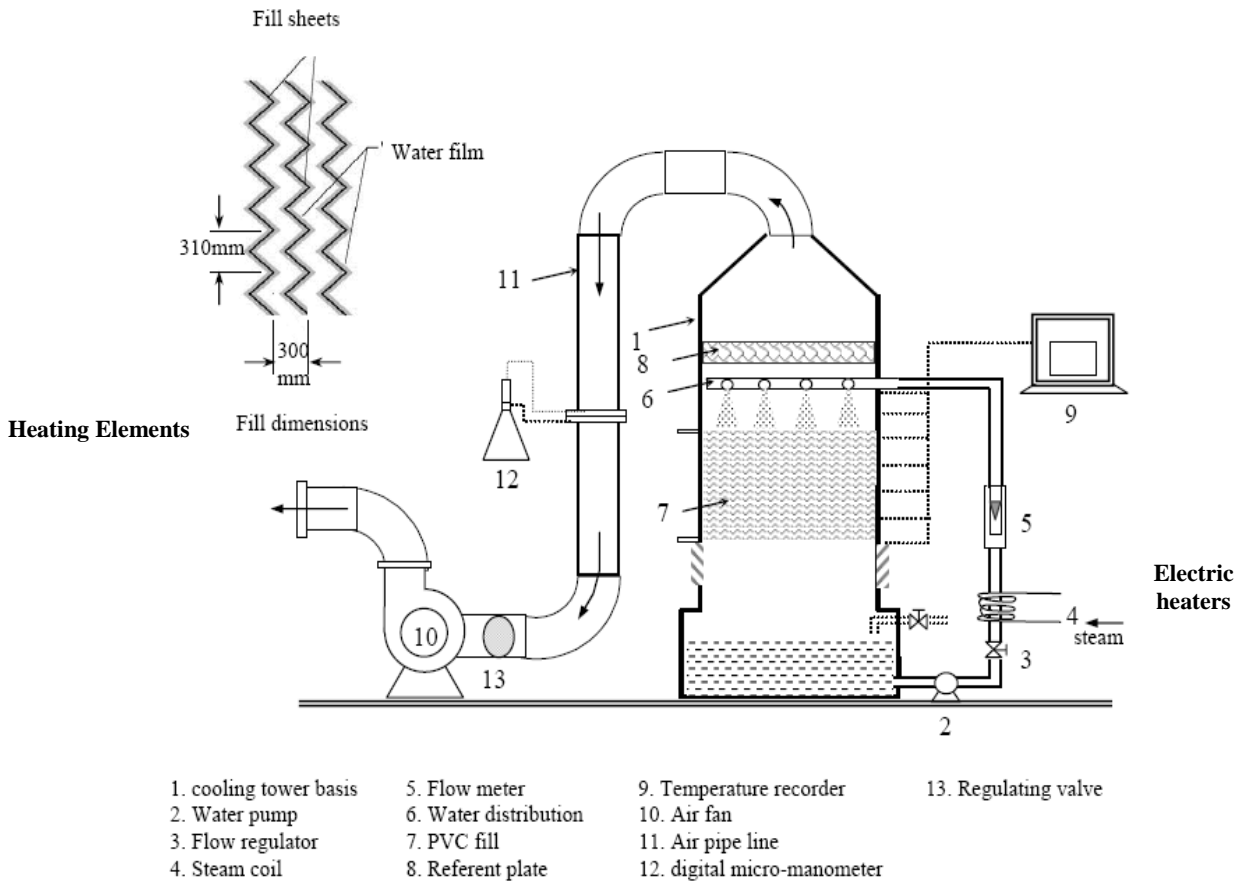
شكل (3) رسم تخطيطي لعملية تبريد الماء في برج تبريد ذي جريان متعاكس



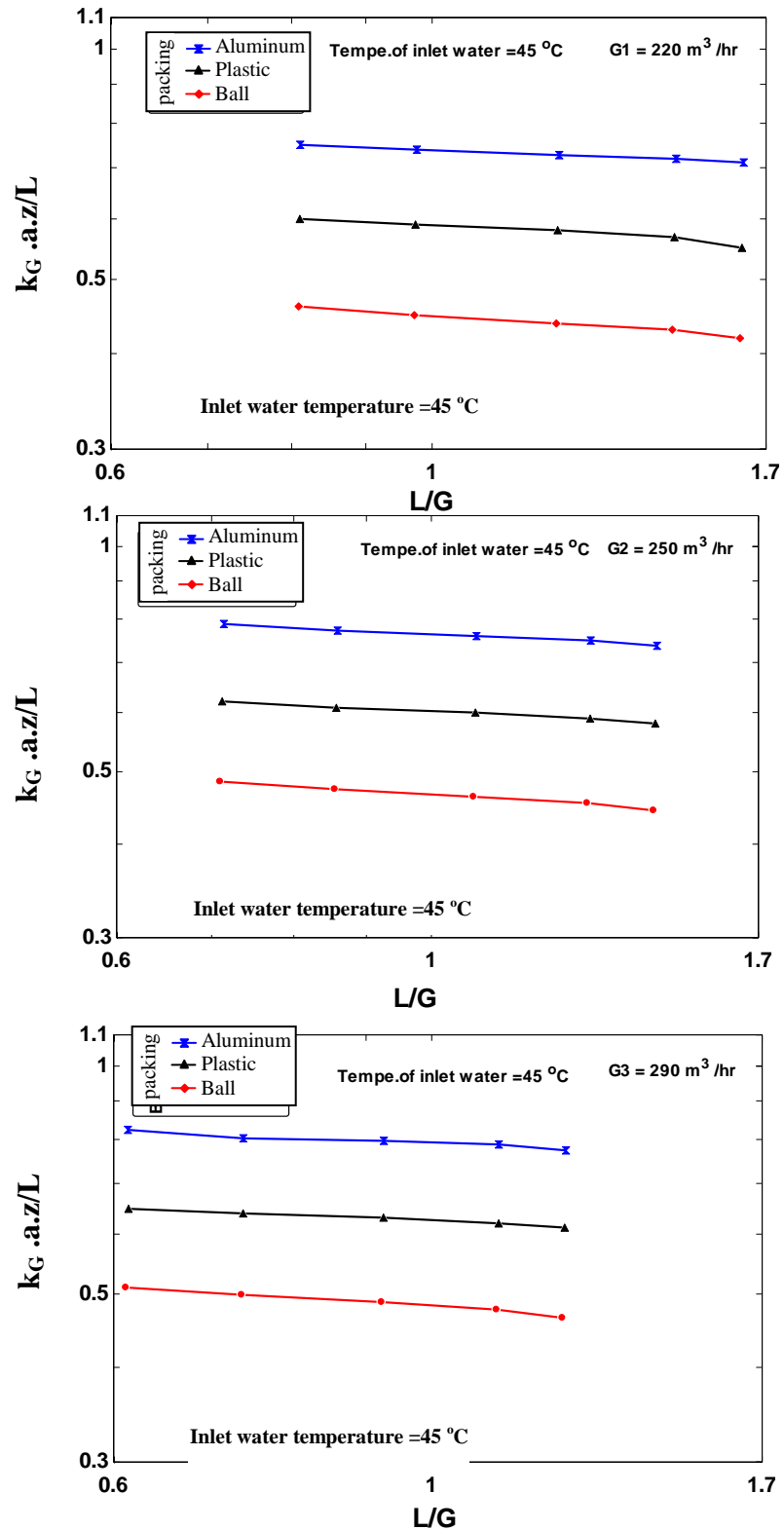
الشكل (4) رسم تخطيطي لبرج تبريد يعمل بقوة الدفع الميكانيكي



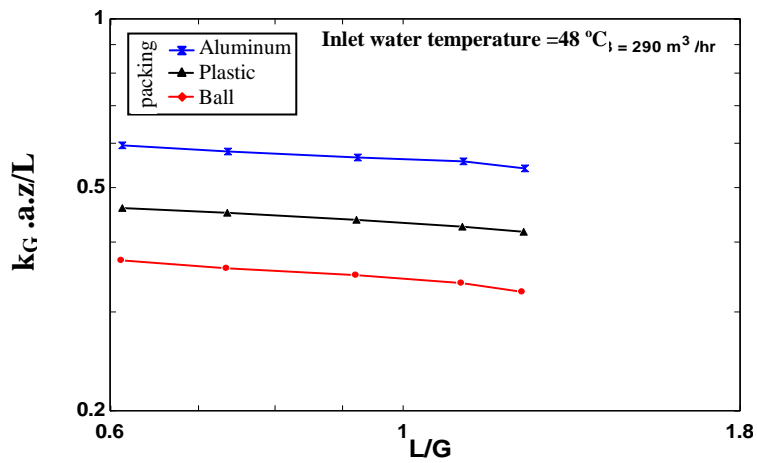
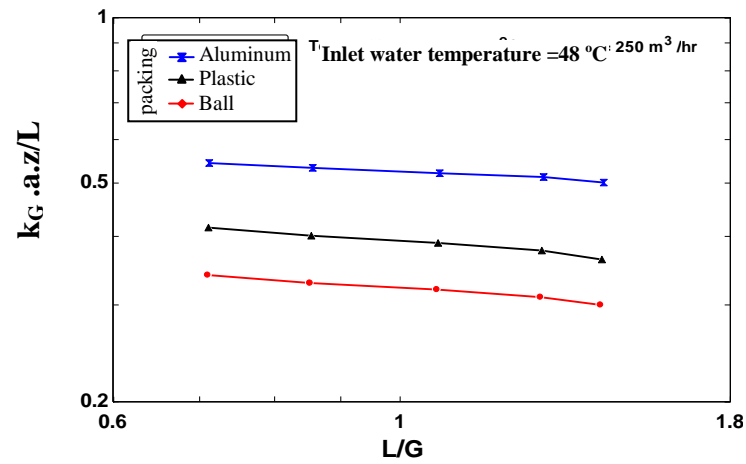
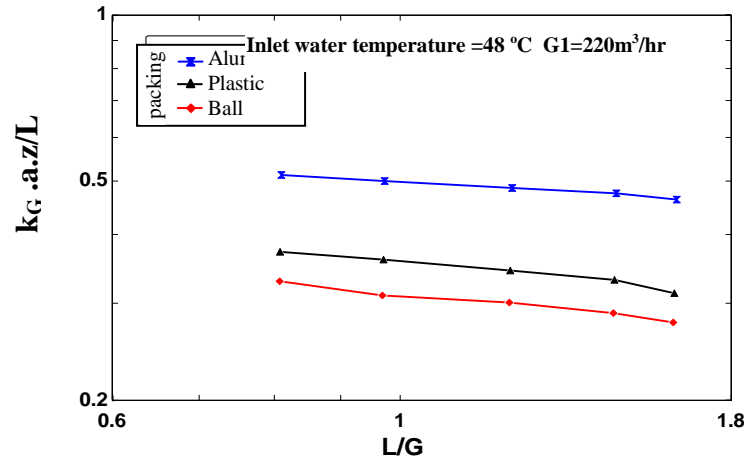
الشكل (5) رسم تخطيطي يوضح كيفية انتقال الحرارة عندما تكون درجة حرارة الماء أعلى من درجة حرارة الهواء الجاف



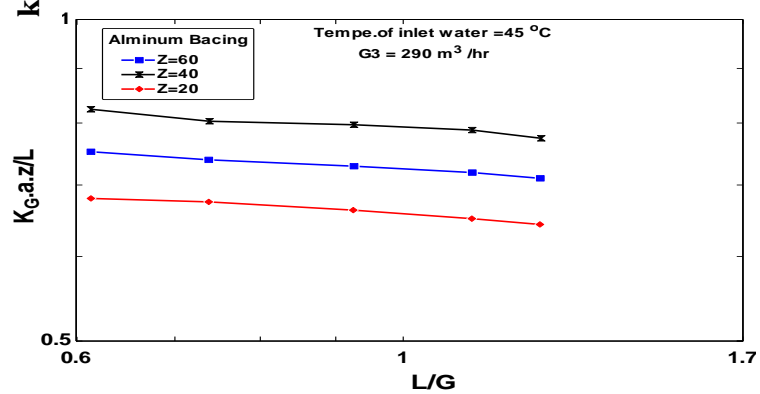
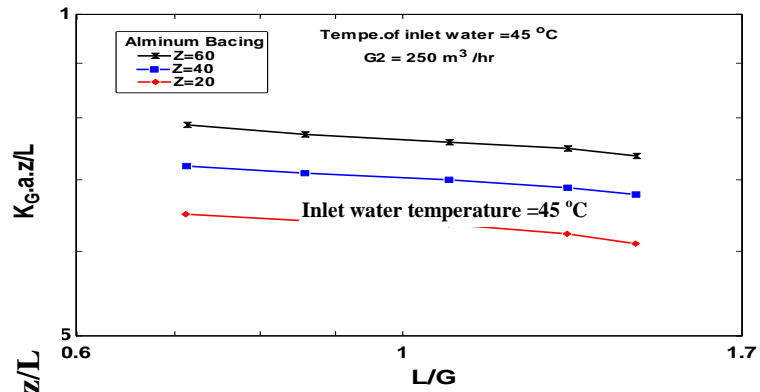
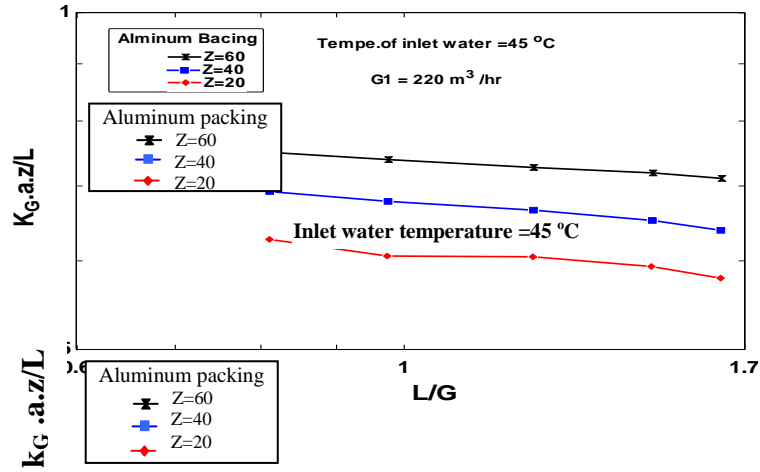
الشكل (6) رسم تخطيطي لبرج التبريد التجريبي يعمل بالدفع (Forced-draft)



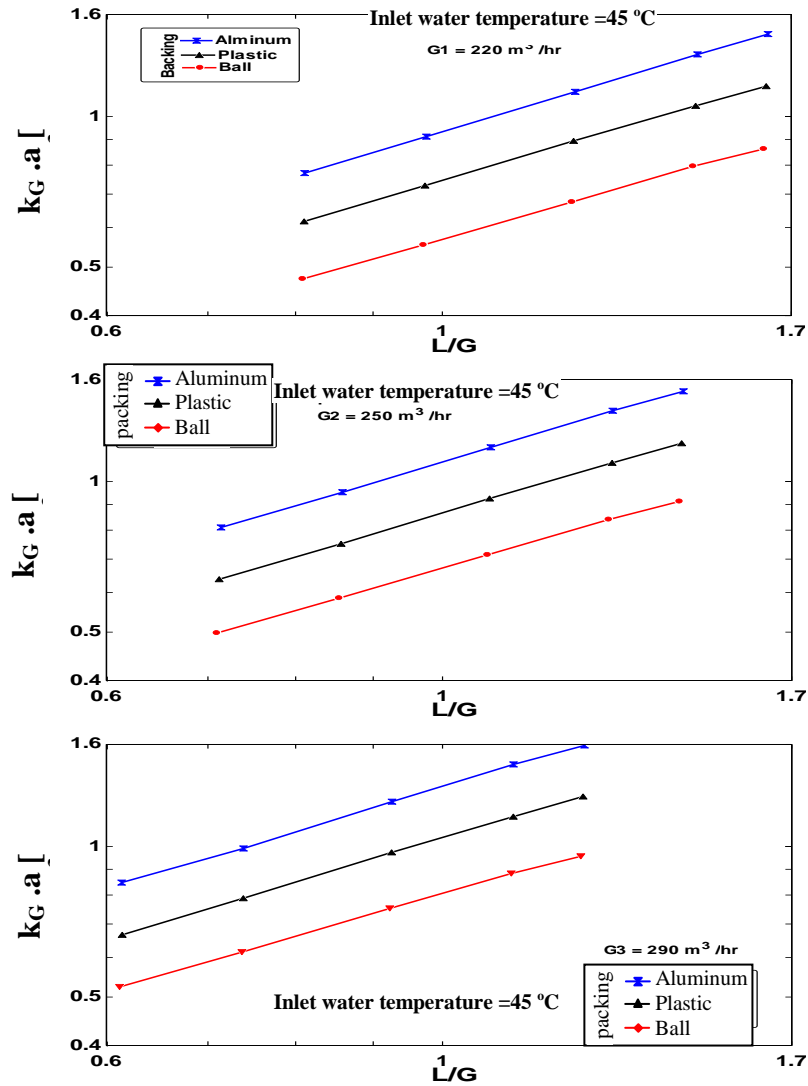
شكل (7) العلاقة بين معامل أداء برج تبريد والنسبة بين معدل تدفق الماء إلى الهواء (L/G) عند ثلاث حشوات مختلفة وبالاقتران مع ثلاث قيم متغيرة لمعدل تدفق الهواء (G) مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل إلى برج التبريد عند 45 °C. وبارتفاع حشوة 600 mm



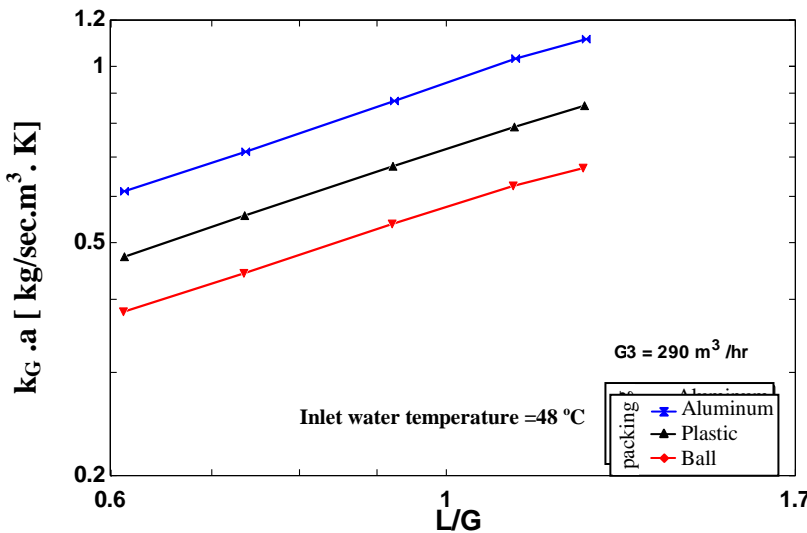
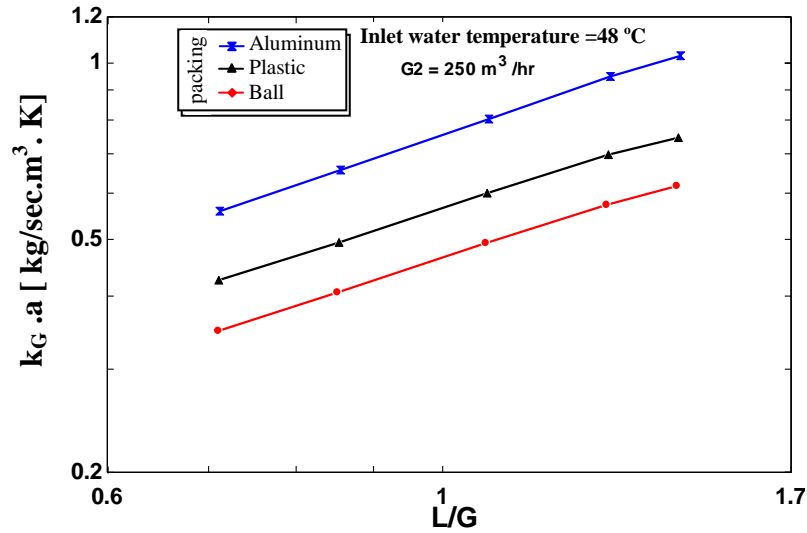
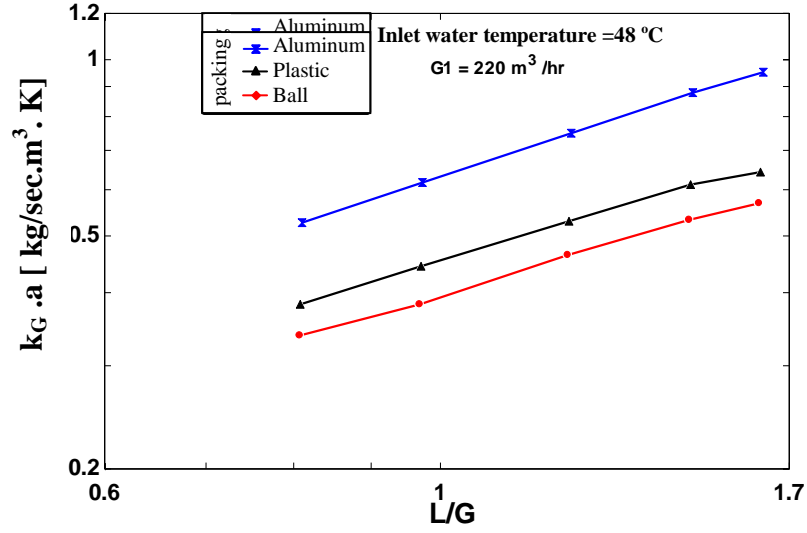
شكل (8) العلاقة بين معامل أداء برج تبريد والنسبة بين معدل تدفق الماء إلى الهواء (L/G) عند ثلاث حشوات مختلفة ولثلاث قيم متغيرة لمعدل تدفق الهواء (G) مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل عند 48 °C. وبارتفاع حشوة 600 mm



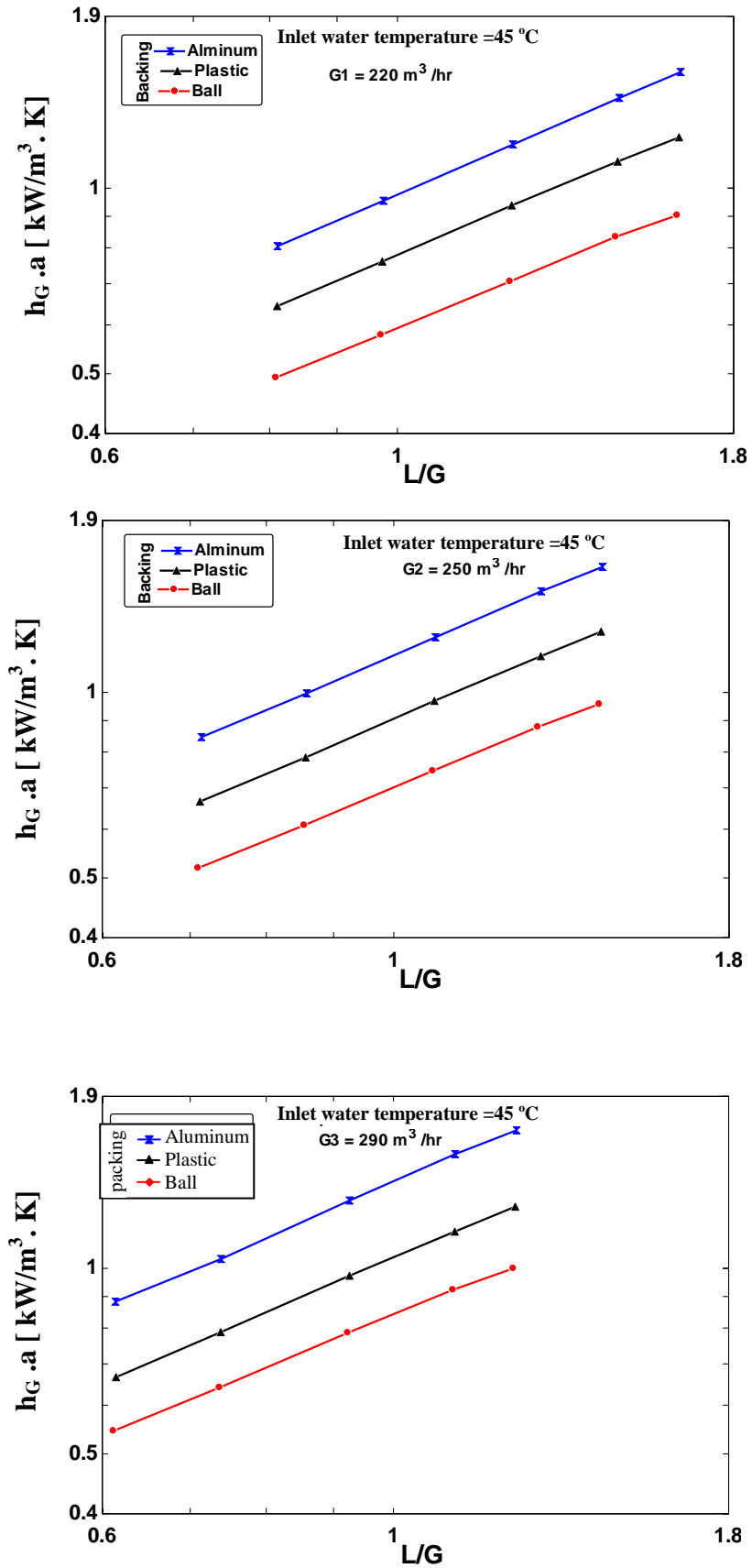
شكل (9) علاقة بين معامل أداء برج تبريد والنسبة معدل تدفق الماء إلى الهواء (L/G) لحشوة الألمنيوم عند ارتفاعات مختلفة لثلاث قيم متغيرة لمعدل تدفق الهواء (G) مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل عند 45 °C



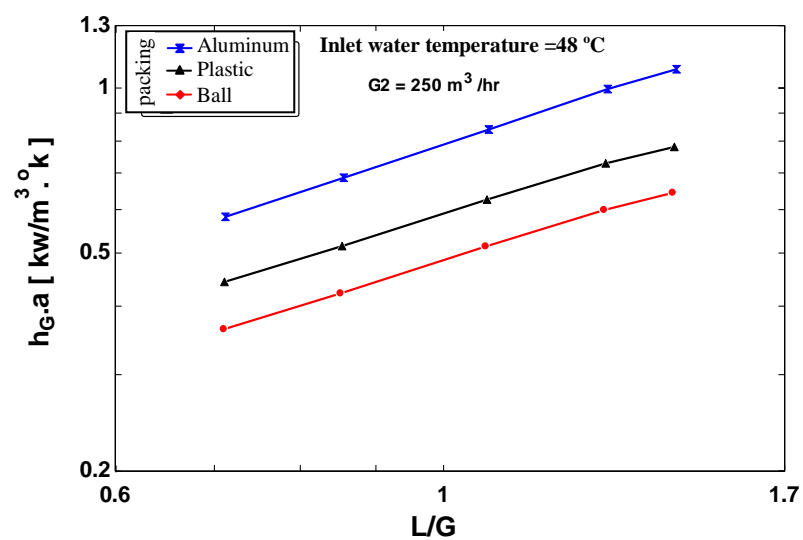
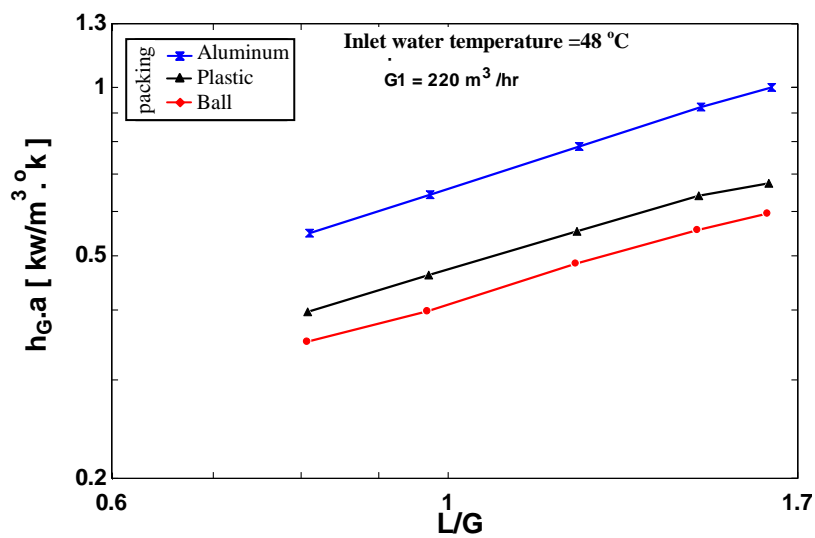
شكل (10) العلاقة بين معامل الكتلة الحجمي مع نسبة معدل التدفق الماء إلى الهواء (L/G) لثلاث حشوات مختلفة ولثلاث قيم متغيرة لمعدل تدفق الهواء (G) مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل عند 45 °C . وبارتفاع حشوة 600 mm

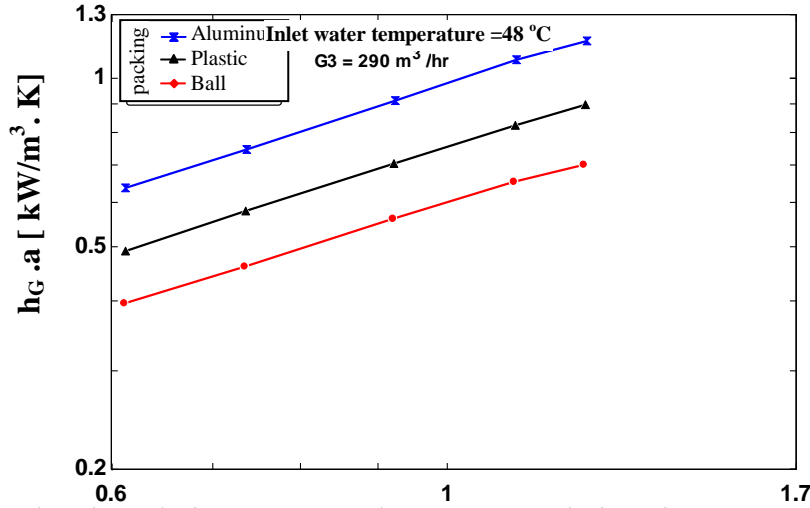


شكل (11) علاقة معامل الكتلة الحجمي مع نسبة معدل التدفق الماء إلى الهواء (L/G) لثلاث حشوات مختلفة ولثلاث قيم متغيرة لمعدل تدفق الهواء (G) مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل عند 48 °C. وبارتفاع حشوة 600 mm

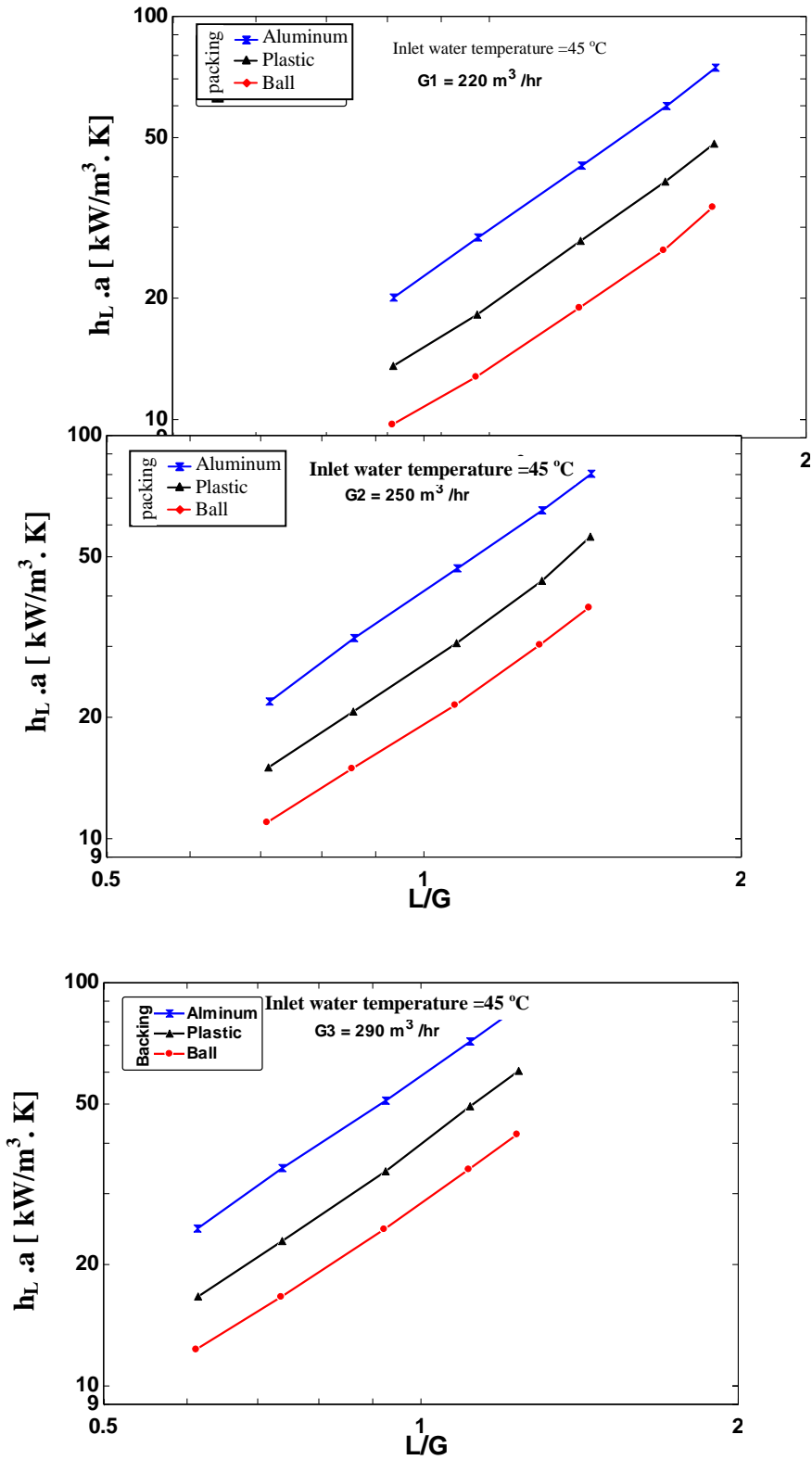


شكل (12) العلاقة بين معامل انتقال الحرارة من جانب الهواء مع نسبة معدل التدفق الماء إلى الهواء (L/G) لثلاث حشوات مختلفة وثلاث قيم متغيرة لمعدل تدفق الهواء (G) مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل عند 45 °C. وبارتفاع حشوة 600 mm



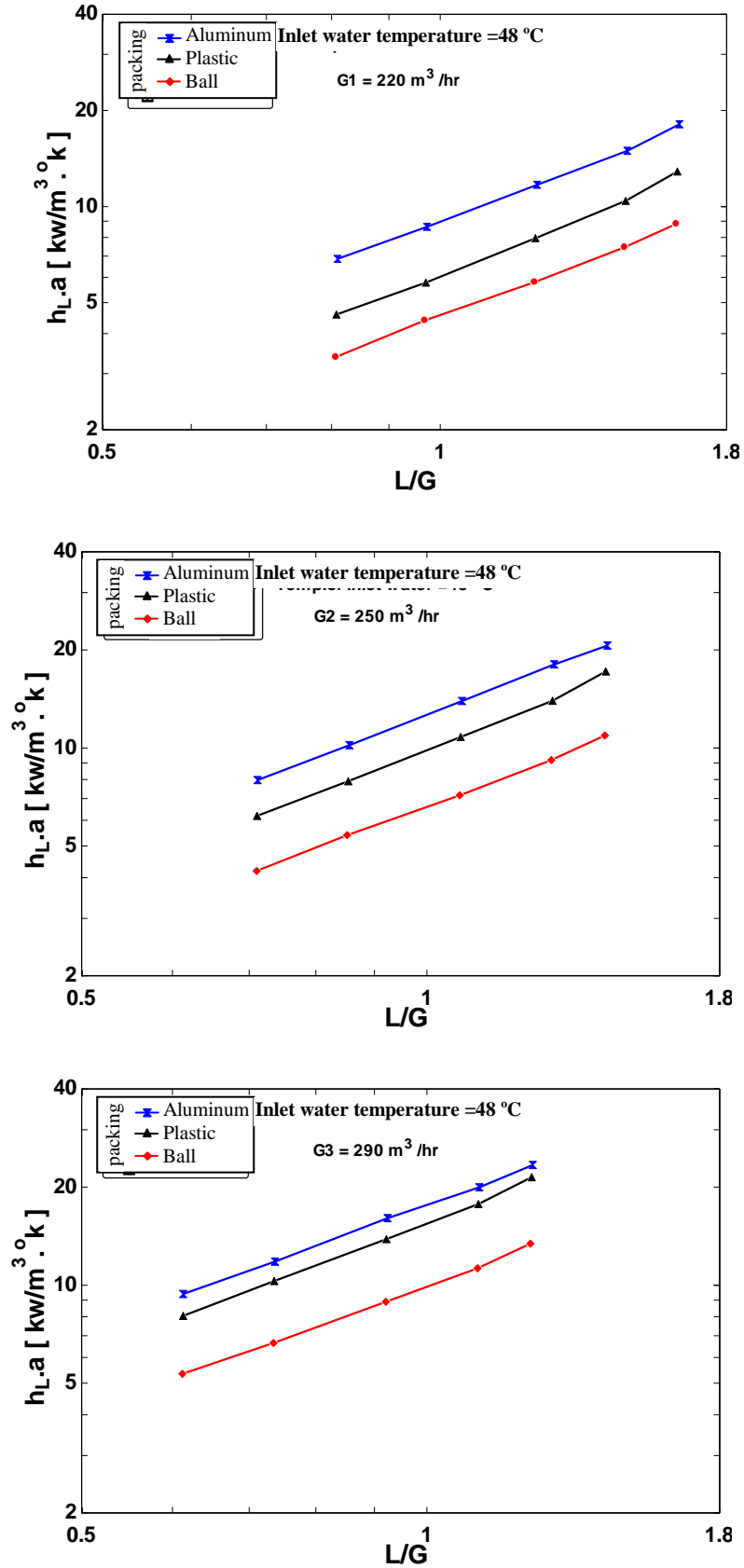


شكل (13) العلاقة بين معامل انتقال الحرارة من جانب الهواء مع نسبة معدل التدفق الماء إلى الهواء (L/G)
 لثلاث حشوات مختلفة ولثلاث قيم متغيرة لمعدل تدفق الهواء (G) مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل عند 48 °C
 وبارتفاع حشوة 600 mm



شكل (14) العلاقة بين معامل انتقال الحرارة من جانب الماء مع نسبة معدل التدفق الماء إلى الهواء (L/G) لثلاث حشوات مختلفة ولثلاث قيم متغيرة لمعدل تدفق الهواء (G) مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل عند 45°C وبارتفاع حشوة 600 mm

$h_{L.a}$ [kW/m³ . K]



شكل (15) العلاقة معامل انتقال الحرارة من جانب الماء مع نسبة معدل التدفق الماء إلى الهواء (L/G) لثلاث حشوات مختلفة ولثلاث قيم متغيرة لمعدل تدفق الهواء (G) مع ثبوت درجة حرارة الماء الداخل عند $48 \text{ }^\circ\text{C}$. وبارتفاع حشوة 600 mm