مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (20) العدد (6+7) 1998
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Engineering Science Series Vol. (20) No (6+7) 1998

دراسة تجريبية لانتقال الحرارة داخل الطبقة المميعة

ممدوح عبد العزيز البصول

(قبل للنشر في 1998/11/10)

❐ ملخص ❐

هذا البحث يقدم نموذجاً تجريبياً لحساب معامل انتقال الحرارة في الطبقة المميعة باعتماد التحليل البعدي. لحساب ثوابت النموذج وللتحقق منه تم إجراء التجارب اللازمة في أنبوب التميع والذي قطره الداخلي 142mm وارتفاعه 1m. المبادل الحرارية كان على شكل كرة نحاسية مسخنة بوساطة الكهرباء بقدره ثابتة مقدارها 5w. استخدم في التجارب ثلاثة أنواع مختلفة من الحبيبات الصلبة وتم تغيير ارتفاع الطبقة الثابتة وسرعة تدفق هواء التميع، وتمت مقارنة النموذج المقترح مع النتائج التجريبية.

جامعة البلقاء التطبيقية كلية عمان للهندسة التكنولوجية قسم الهندسة الميكانيكية عمان– الأردن

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (20) العدد (6+7) 1998
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Engineering Science Series Vol. (20) No (6+7) 1998

EXPERIMENTAL STUDY FOR HEAT TRANSFER IN FLUIDIZED BED

Mamdoh A. Al-Busoul

❐ ABSTRACT ❐

This paper introduces an experimental model to calculate heat transfer Coefficient of fluidized bed – based on dimensional analysis. All experimental work is practiced in a cylindrical reactor with inside diameter (ID) of 142mm and 1m height, while the spherical copper exchanger is fed electrically by a power of 5 watt. Three types of solid particles are used with different bed heights, different flow Velocities. However, full comparison is made between the experimental and the proposed model.

Amman collage for engineering technology Department of mechanical engineering Amman – Jordan

المقدمة Introduction:

كانت أول استخدامات الطبقة المميعة (Fluidized Bed) على مستوى صناعي عام 1920 في ألمانيا في مجال الهندسة الكيميائية، وتعتبر الطبقة المميعة واحدة من أهم العمليات التكنولوجية التي أدت إلى تطور الهندسة الكيميائية. وتجد الطبقة المميعة بشكل مستمر ومتزايد استخدامات في الكثير من العمليات الصناعية[1،2،3،4،5،6] ومن أهم هذه التطبيقات هي المراجل التي تعمل بوساطتها، وذلك نتيجة للمميزات التي تتمتع بها هذه الطبقة مثل شدة التبادل الحراري والكتلي والخاصية الأيزوثرمية وحل المشاكل المعلقة بحرق النفايات الصلبة والوقود الرديء (الذي له قيمة حرارية منخفضة ويحتوي على نسبة عالية من الكبريت والرماد مثل الصخر الزيتي الذي يوجد بكميات كبيرة جداً في الأردن حوالي 40 مليار طن[7] مما يكفي استهلاك الأردن من الوقود لمئات الأعوام) وتحديد انبعاث الغازات الملوثة للجو والناتجة عن الاحتراق مثل NO_x وSO_2 وأيضاً الرفع من كفاية الاحتراق.

التطور المستمر للعمليات التكنولوجية التي تستخدم الطبقة المميعة يحتاج إلى دراسة علمية مكثفة في مجال الأيروديناميكا والاحتراق وانتقال الحرارة لأن هذه العوامل تعتبر العوامل الرئيسية في تصميم وتشغيل المراجل التي تعمل بواسطة الطبقة المميعة. هناك العديد من الدراسات النظرية لانتقال الحرارة داخل الطبقة المميعة، أو نموذج فيزيائي في هذا المجال قدم من قبل[5] Micley and Fairbanks عام 1949 وعرف بنموذج الحزم وفي عام 1951 قدم[8] Dawa and Jakob نموذجاً فيزيائياً آخر عرف بنموذج الطبقة الحدية وبعد ذلك عام 1954 اقترح الباحثان[6] Wicke and Fetting نموذجاً عرف بنموذج الطبقة المزدوجة.

وبالاعتماد على النماذج السابقة حال العديد من الباحثين في طرق تحليلية توضيح آلية انتقال الحرارة في الطبقة المميعة ونتج عن ذلك نماذج عديدة[4،8،9،10] حيث أنها كانت مختلفة بشكل كبير عن بعضها البعض نتيجة الاختلاف في الافتراضات والمدخلات وبسبب أنها كانت تأخذ بعين الاعتبار فقط بعض العوامل المؤثرة على آلية انتقال الحرارة في الطبقة المميعة. وهذه النماذج كانت تحتوي على عوامل كثيرة من الصعب تحديدها وقياسها عملياً ومن هنا يكون استخداماتها العملية محدودة. إن آلية انتقال الحرارة بين الطبقة المميعة وسطح المبادل الحراري تعتبر من الأمور المعقدة جداً لأنها تعتمد على عوامل عديدة مثل خواص الحبيبات الصلبة والمائع وشكل وأبعاد المبادل الحراري والمفاعل وظروف العمل، لهذا السبب من الأفضل أن يتم دراسة هذه الآلية عملياً (تجريبياً) ومع أن العلاقات الناتجة ستكون استخداماتها فقط في ظروف مشابهة لظروف التجارب الناتجة عنها ولكن تكون بصورة أقرب من الواقع، وهذا ما سيقدمه هذا البحث.

النموذج The Model:

في هذا البحث نقترح نموذجاً تجريبياً بالاعتماد على التحليل البعدي (Dimensional Analysis) وتمت محاولة أخذ أهم العوامل التي لها تأثير واضح على انتقال الحرارة بين الطبقة المميعة وسطح المبادل الحراري المغمور داخلها هناك عوامل كثيرة لها تأثير على انتقال الحرارة يمكن تلخيصها على النحو التالي:

* خواص الحبيبات الصلبة:

وتشمل الكثافة ρ_p، والسعة الحرارية C_{pp}، أما الموصلية الحرارية K_p حسب العديد من الباحثين[4] فإنها لا تؤثر على عملية انتقال الحرارة.

* خواص غاز التميع:

وتشمل الكثافة ρ_g، الموصلية الحرارية K_g، السعة الحرارية C_{pg}، اللزوجة الديناميكية μ_g.

* ظروف التشغيل:

مثل سرعة تدفق غاز التميع U،قطر الحبيبات الصلبة d_p. فرق درجات الحرارة بين سطح المبـــادل والطبقـــة ΔT، التركيز الحجمي للحبيبات الصلبة في حالة الطبقة الثابتة (ε-1) وتسارع الجاذبية الأرضية g.

* أبعاد أنبوب التميع:

قطر أنبوب التميع D وارتفاع الطبقة الثابتة H_0.

مما سبق فإن كثافة انتقال الحرارة بين الطبقة المميعة والمبادل الحراري يمكن التعبير عنها على النحو التالي:

$$q = f\left(\rho_p, C_{pp}, d_p, \rho_g, C_{pg}, K_g, \mu_g, U, \Delta T, g, (1-\varepsilon)(1-\varepsilon_0)D, H_0\right) \quad (1)$$

وبعد إجراء التحليل البعدي باستخدام طريقة Buckingham (II) تم الحصول على العلاقة التالية:

$$\frac{hd}{k_g} = f\left[\frac{u.d_p.\rho_g}{\mu_g}, \frac{g.d_p^3.\rho_g(\rho_p-\rho_g)}{\mu_g^2}, \frac{\mu_g.C_{pg}}{K_g}, \frac{\rho_p.C_{pp}}{\rho_g C_{pg}}, \frac{H_0}{D}, \frac{D}{d_p}, \frac{H_0}{d_p}, \frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon_0}\right] \quad (2)$$

حيث أن:

hd_p/K_g: هو عدد نسلت Nu.

$ud_p\rho_g/\mu_g$: عدد رينولدز Re.

$gd_p^3\rho_g(\rho_p-\rho_g)\mu_g^2$: عدد أرخميدس Ar.

$\mu_g C_{pg}/K_g$: عدد برنول Pr.

ويمكن إدخال بعض الأعداد اللابعدية التي لها تأثير ضعيف على انتقال الحرارة إلى ثابت المعادلة، من هذه الأعداد $\frac{H_0}{D}$ حيث إن هذا العدد له تأثير فقط عندما يكون المبادل غير معمور داخل الطبقة[11،12] والعددين $\frac{H_0}{d_p}, \frac{D}{d_p}$ أيضاً تأثيرهما ضـــعيف على معامل انتقال الحرارة حسب المراجع[12،13] وبعد وضع تلك الأعداد في ثابت المعادلة (2) يمكن اختصارها لتصبح على النحو التالي:

$$Nu = f\left(\mathrm{Re}, Ar, \mathrm{Pr}, \frac{\rho_p C_{pp}}{\rho_g C_{pg}}, \frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon_0}\right) \quad (3)$$

حيث لا توجد معلومات كافية عن صيغة هذه العلاقة، ولكن يمكن كتابة الدالة بوجه عام بصيغة متسلسلة قـــوى بـــافتراض أس مجهول لكل متغير كما يلي:

$$Nu = a_0 \mathrm{Re}^{a_1} Ar^{a_2} \mathrm{Pr}^{a_3} \left(\frac{\rho_p C_{pp}}{\rho_g C_{pg}}\right)^{a_4} \left(\frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon_0}\right)^{a_5} \quad (4)$$

حيث أن a_0 ثابت العلاقة وa_1، a_2، a_3، a_4، a_5 هي ثوابت وأسس الأعداد اللابعدية ويمكن تحديدها عـــن طريـــق التجـــارب والعمليات الحسابية الإحصائية.

بعد إجراء التجارب اللازمة والمبينة لاحقاً وباستخدام طريقة المربعات الصغرى (Least Square Method) ومـــن طريقة غوس-جوردن للحذف (Gauss-Jordan Elimination) تم حساب قيم الثوابت السابقة وكانت على النحو التالي:

$a_0 = 1.45$ $\quad a_1 = 0.4$ $\quad a_2 = -0.084$

$a_3 = 0.34$ $\quad a_4 = 0.111$ $\quad a_5 = 0.47$

وبعد وضع هذه الثوابت في المعادلة (4) أصبحت على الشكل التالي:

$$Nu = a_0 \mathrm{Re}^{a_1} Ar^{a_2} \mathrm{Pr}^{a_3} \left(\frac{\rho_p C_{pp}}{\rho_g C_{pg}}\right)^{a_4} \left(\frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon_0}\right)^{a_5} \quad (5)$$

عندما تكون درجة حرارة الطبقة المميعة مرتفعة وتزيد عن $600^{\circ}C$ [ ]، يجب إضافة مركبة الإشعاع الحراري إلى النموذج السابق. لحساب كمية الحرارة المنتقلة بين الطبقة والمبادل الحراري، لأنه عند درجات الحرارة المرتفعة تكون لمركبة الإشعاع قيمة مؤثرة على كمية الحرارة الكلية المنتقلة بين الطبقة والمبادل الحراري. ويمكن حساب هذه المركبة من المعادلة التالية[ ]:

$$h_R = 4e\delta\overline{T}^3$$

حيث أن:

e: الانبعاثية.

δ: ثابت ستيفان بولتزمان وقيمته $\left(5.67*10^{-8}\ \frac{W}{m^2.k}\right)$.

$\overline{T}$: المتوسط الحسابي لدرجة حرارة سطح المبادل والطبقة.

التجارب Experiments:

الشكل (1) هو رسم تخطيطي للجهاز التجريبي ويتكون من أنبوب التميع (1) المصنوع من البلاستك الشفاف وقطره الداخلي (D=0.142m) وارتفاعه (H=1m)، في أسفل أنبوب التميع يوجد الموزع (2) الذي يقوم بحمل الطبقة وتوزيع هواء التميع بشكل منتظم داخل الأنبوب، هواء التميع حصلنا عليه بوساطة مروحة السحب (3)، وبواسطة صمام التحكم (9) تم التحكم بسرعة تدفق الهواء، واستخدم مقياس السرعة الرقمي (Digital flow meter) (5) لقياس سرعة تدفق الهواء خلال الطبقة ولقياس فرق الضغط على ارتفاع الطبقة استخدم المانوميتر (6)، كما يوجد فتحات على ارتفاعات مختلفة من طول أنبوب التميع تعطي إمكانية إدخال المسخن داخل أنبوب التميع وقياس درجات الحرارة هناك.

لتحديد قيمة معامل انتقال الحرارة استخدم المبادل الحراري (مسخن كهربائي) المبين على الشكل (2) ويتكون هذا المسخن من كرة نحاسية (1) قطرها (d_h=0.029m) ويوجد بداخلها مقاومة كهربائية (2) ولقياس درجة حرارة سطح الكرة استخدم مزدوجة حرارية (3)، أما قطعة التفلون (4) فقد استخدمت للحد من الحرارة الضائعة وربط الكرة بالمقبض (5).

مواصفات وخواص الحبيبات الصلبة المستخدمة في التجارب مبينة في الجدول (1)

المادة	القطر المتوسط $\overline{d}_p[\mu_m]$	الكثافة الحقيقية Kg/m^3	الكثافة الظاهرة Kg/m^3	سرعة التميع الدنيا m/s	التركيز الحجمي للطبقة الثابتة	السعة الحرارية $C_{pp}[J/kg.k]$
صخر زيتي	138	1500	1008	0.0353	0.672	950
رمل A	202	2600	1513	0.055	0.582	840
رمل B	423	2600	1515	0.129	0.583	840

تم حساب قيم mf المبينة في الجدول من المرجع[14].

أجريت التجارب في درجة حرارة الجو مع تغير سرعة تدفق الهواء في مجال (0.02m/s إلى 1.5m/s). لارتفاعات مختلفة للطبقة الثابتة ولثلاثة أقطار مختلفة من الحبيبات الصلبة كما هو مبين في الجدول (1).

تم حساب التركيز الحجمي (ε-1) من المعادلة التالية[8]:

$$H_1(1-\varepsilon) = H_0(1-\varepsilon_0) \quad (6)$$

حيث أن: $1-\varepsilon_0 = \frac{\rho_u}{\rho_p}$

طريقة تحديد قيمة معامل انتقال الحرارة موضحة على الشكل (3).

تم قياس فرق درجات الحرارة بين سطح المبادل والطبقة في محور أنبوب التميع على ارتفاع 0.035m من الموزع ومن ثم كان حساب معامل انتقال الحرارة h بواسطة المعادلة التالية:

$$h = \frac{Q}{A(T_s - T_b)} = \frac{I.V}{A(T_s - T_b)} W/m^2.K \quad (8)$$

استطاعة التسخين I.V كان ثابتة ومقدارها 5W.

النتائج ومناقشتها Results and discussion:

الشكل (4) يبين تغير قيمة معامل انتقال الحرارة h مع تغير سرعة تدفق عواء التميع لـثلاث أقطـار مختلفـة مـن الحبيبات الصلبة. ويبين الشكل مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث مع نتـائج الباحـث[4] Wunder. الـذي استخدم حبيبات زجاجية بأقطار مقاربة للأقطار المستخدمة في هذا البحث.

من هذا الشكل يمكن ملاحظة أن لجميع هذه الأقطار يوجد هناك مرحلتان:

في المرحلة الأولى:

مع زيادة سرعة تدفق هواء التميع فإن قيمة معامل انتقال الحرارة تزداد إلى أن تصل قيمتها القصـوى وذلـك عنـد سرعة تساوي من ثلاث إلى أربع أضعاف سرعة التميع الدنيا U_{mf} وينطبق ذلك على كل من النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث ونتائج Wunder. وهذا يعود إلى زيادة سرعة تدفق الهواء تؤدي إلى الخلط الجيد للحبيبات وأيضاً إلى تقليل زمـن التلامس بين الحبيبات الصلبة وسطح المبادل الحراري مما يبقي فرق درجات الحرارة بين السطح والحبيبات ΔT كبيراً وهـذا يؤدي إلى زيادة انتقال الحرارة.

أما في المرحلة الثانية:

نلاحظ أنه مع زيادة سرعة تدفق هواء التميع فإن قيمة معامل انتقال الحرارة تقل. ويمكن تفسير ذلك بأنه مع زيـادة سرعة تدفق هواء التميع إلى أكبر من أربعة أضعاف سرعة التميع الدنيا $_{mf}$ فهذا يؤدي إلى تمدد الطبقة بشكل كبير مما يـؤدي إلى تقليل التركيز الحجمي للحبيبات الصلبة وبالتالي إلى تقليل قيمة معامل انتقال الحرارة. إن نتائج هذا البحث المتعلقة بتغييـر معامل انتقال الحرارة مع سرعة تدفق هواء التميع تتفق مع نتائج Wunder. إلا أن قيم معامل انتقال الحرارة التي حصل عليها Wunder أعلى من قيم معامل انتقال الحرارة التي تم الحصول عليها في هذا البحث، وهذا يعود إلى أن ظروف تجارب هـذا البحث كانت مختلفة عن الظروف التي استخدمها Wunder من حيث قطر أنبوب التميع، والمسخن ونوعية الحبيبات الصـلبة. إن تغير معامل انتقال الحرارة مع سرعة تدفق هواء التميع كما هو مبين في الشكل (4) يتفق مع نتائج الكثيـر مـن البـاحثين المبينة في المراجع[4،8].

الشكل (5) يبين تغير عدد نسلت Nu مع تغير عدد رينولدز Re لحبيبات الصخر الزيتي والحبيبات الزجاجية التـي استخدمها Wunder[4].

حيث يمكن ملاحظة أنه يوجد تشابه كبير بين تغير Nu=f(Re) وتغير h=f(u) من الشكل السابق. مع زيادة عدد Re فإن قيمة عدد Nu تزداد إلى أن تصل قيمتها القصوى عند Re=10 وبعد ذلك تبدأ بالنقصان والسبب في ذلك هو ما سبق ذكـره عنـد شرح الشكل (4).

الشكل (6) يبين العلاقة بين قيم معامل انتقال الحرارة h المحسوبة من المعادلة (5) مع تغير قطر الحبيبات الصـلبة، ومقارنتها بالنتائج التجريبية التي تم الحصول عليها في هذا البحث والتي حصل عليها كل مـن Wunder[4] و mickley[5]. من هذا الشكل يمكن ملاحظة أنه مع زيادة قطر الحبيبات الصلبة فإن قيمة معامل انتقال الحرارة تقل وذلـك لجميـع النتـائج النظرية والتجريبية، ويمكن تفسير ذلك بأنه مع زيادة قطر الحبيبات الصلبة فإن مساحة تلامـس الحبيبـات لسـطح المبـادل

الحراري تقل مما يؤدي إلى تقليل قيم معامل انتقال الحرارة. أيضاً يمكن ملاحظة أن قيم معامل انتقال الحرارة المقاسة قريبة جداً من قيم معامل انتقال الحرارة المحسوبة.

علاقة $h=f(d_p)$ المبينة على الشكل (6) تتفق مع نتائج الكثير من الباحثين المبينة في المراجع[8،4،1].

الشكل (7) يبين مقارنة بين قيم معامل انتقال الحرارة المحسوبة من المعادلة (5) والقيم التي تم الحصول عليها من التجارب العملية ويمكن ملاحظة أن هناك تطابقاً منطقياً بين القيم تلك. وتم حساب معامل الارتباط (Correlation coefficient) بين القيم المحسوبة والمقاسة وكانت قيمة $r=0.83$ وهذه القيمة منطقية وعالية نسبياً في ظروف انتقال الحرارة في الطبقة المميعة مما يدل على أن المعادلة (5) تعبر بشكل مرضي عن قيم معامل انتقال الحرارة التي تم الحصول عليها بوساطة التجارب العملية بجميع الظروف المستخدمة.

الاستنتاجات Conclusions:

من خلال التحليل السابق يمكن تلخيص أهم الاستنتاجات التالية:

- يتناسب معامل انتقال الحرارة طرداً مع سرعة تدفق المائع إلى أن تصل السرعة إلى ثلاث أو أربع أضعاف سرعة التميع الدنيا وعند السرعات الأعلى من ذلك يتناسب عكسياً، وذلك للحبيبات ذات القطار المتغير من $138\mu_m$ إلى $423\mu_m$.
- يتناسب معامل انتقال الحرارة عكسياً، مع زيادة قطر الحبيبات الصلبة ضمن المدى $138\mu_m$ إلى $423\mu_m$.
- يمكن التعبير عن معامل انتقال الحرارة في ظروف التجارب السابقة بشكل مقبول بواسطة المعادلة (5).

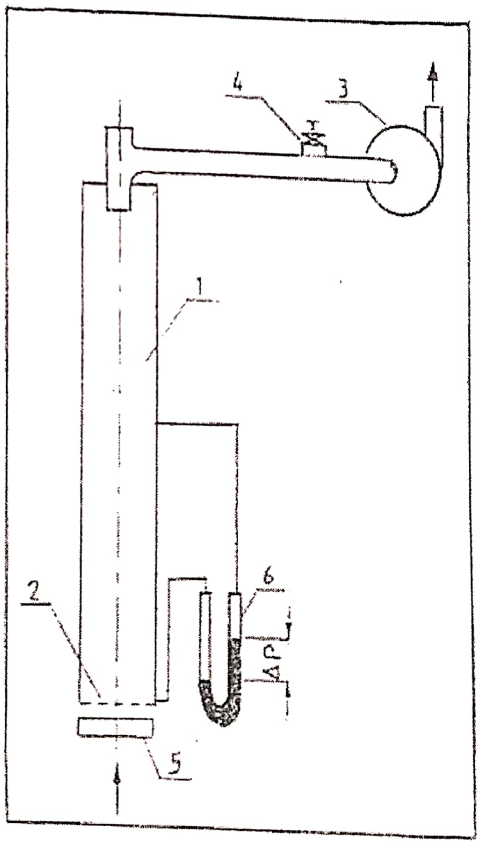
الرموز Nomenclature:

A مساحة سطح المبادل	m^2
C_{pg} السعة الحرارية للغاز	J/K_gk
C_{pp} السعة الحرارية للحبيبات الصلبة	J/K_gK
D قطر أنبوب التميع	m
d_h قطر المسخن	m
d_p قطر الحبيبات الصلبة	m
H ارتفاع أنبوب التميع	m
H_0 ارتفاع الطبقة الثابتة	m
H_i ارتفاع الطبقة في حالة التميع	m
h معامل انتقال الحرارة	$/m^2.k$
I شدة التيار الكهربائي	A
K_g الموصلية الحرارية للغاز	W/n.K
K_p الموصلية الحرارية لحبيبات الصلبة	W/n.K
ΔP فرق الضغط على ارتفاع الطبقة	Pa
Q كمية الحرارة المتدفقة	W
ΔT فرق درجات الحرارة بين المبادل والطبقة	K
T_b درجة حرارة الطبقة	K
T_s درجة حرارة سطح المبادل	K
U سرعة تدفق المائع	m/s

U_{mf} سرعة التميع الدنيا	m/s	
V فرق الجهد الكهربائي	V	
$(1-\varepsilon)$ التركيز الحجمي للحبيبات الصلبة في حالة التميع	-	
$(1-\varepsilon_0)$ التركيز الحجمي للحبيبات الصلبة في ثبات الطبقة	-	
ρ_g كثافة الغاز	K_g/m^3	
ρ_p كثافة الحبيبات الصلبة	K_g/m^3	
ρ_u الكثافة الظاهرية للحبيبات الصلبة	K_g/m^3	
μ_g اللزوجة الديناميكية	$K_g/m.s$	

الأعداد اللابعدية:

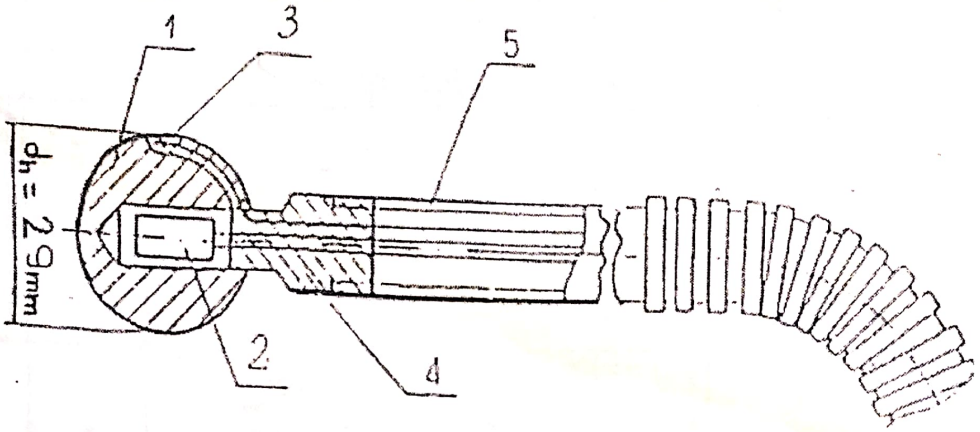
Ar عدد أرخميدس	$Ar = gd_p^3\rho_g(\rho_p - \rho_g)\mu_g^2$
Nu عدد نسلت	$Nu = h.d_p/K_g$
Pr عدد برندل	$Pr = C_{pp}/\mu_g/K$
Re عدد رينولد	$\mathrm{Re} = \frac{U_g\rho_g d_p}{\mu_g}$



شكل (1): الجهاز التجريبي:

1) المفاعل 2) الموزع 3) مروحة السحب

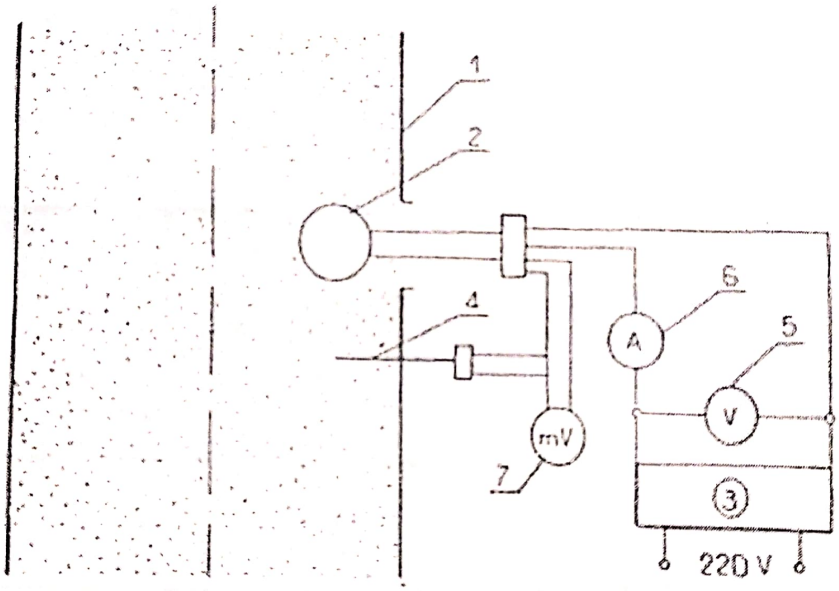
4) الصمام 5) مقياس سرعة تدفق الهواء الرقمي 6) مانوميتر.



شكل (2): المسخن الكهربائي

1) كرة نحاسية 2) مقاومة كهربائية 3) ازدواج حراري

4) قميص من التفلون 5) المقبض.

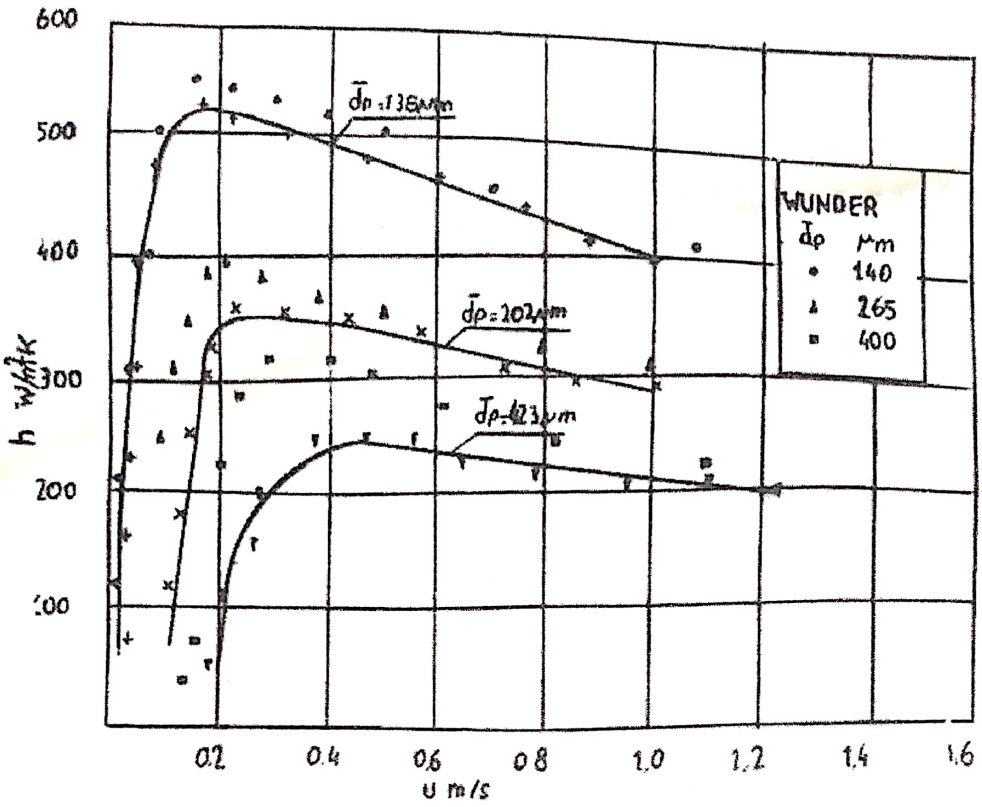


شكل (3): نظام قياس معامل انتقال الحرارة الموضعي

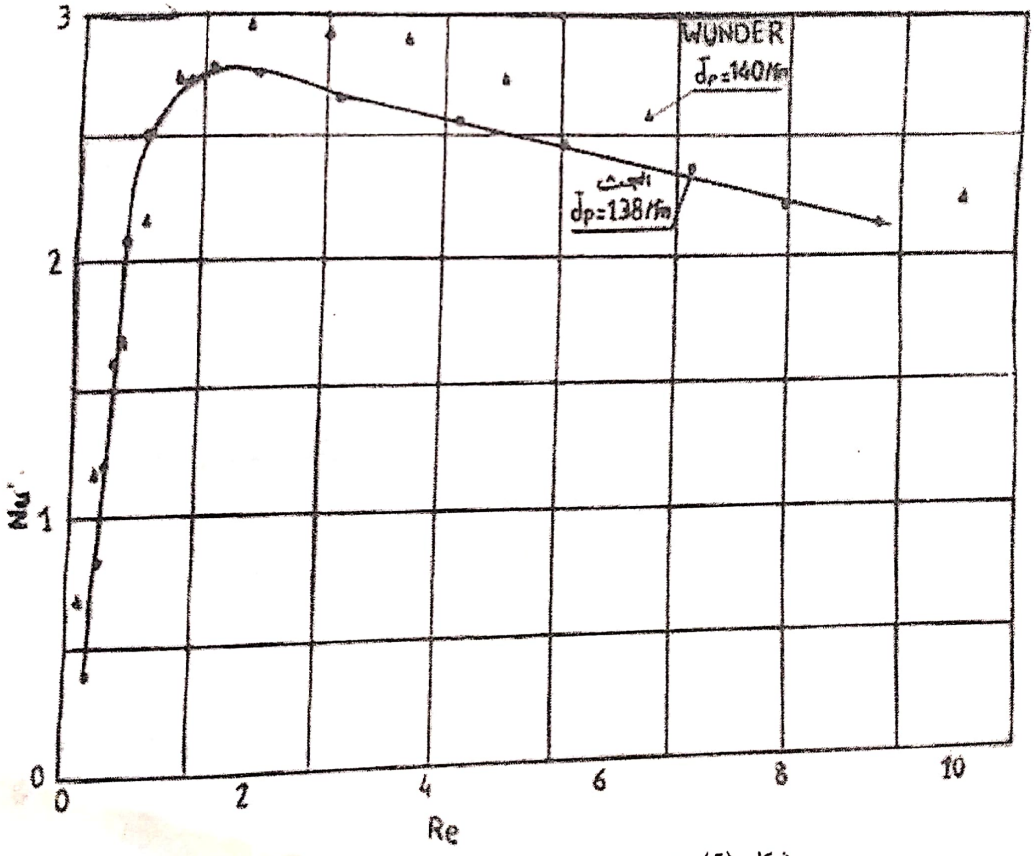
1) المفاعل 2) المسخن 3) مصدر تيار ثابت

4) ازدواج حراري 5) فولتميتر 6) أمبيرميتر

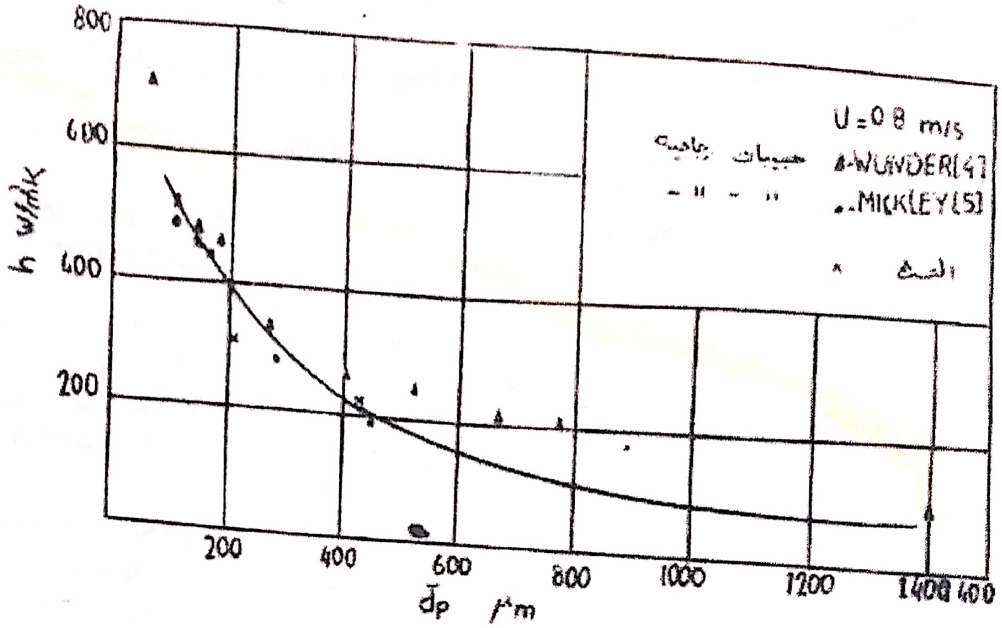
7) مليفولتميتر.



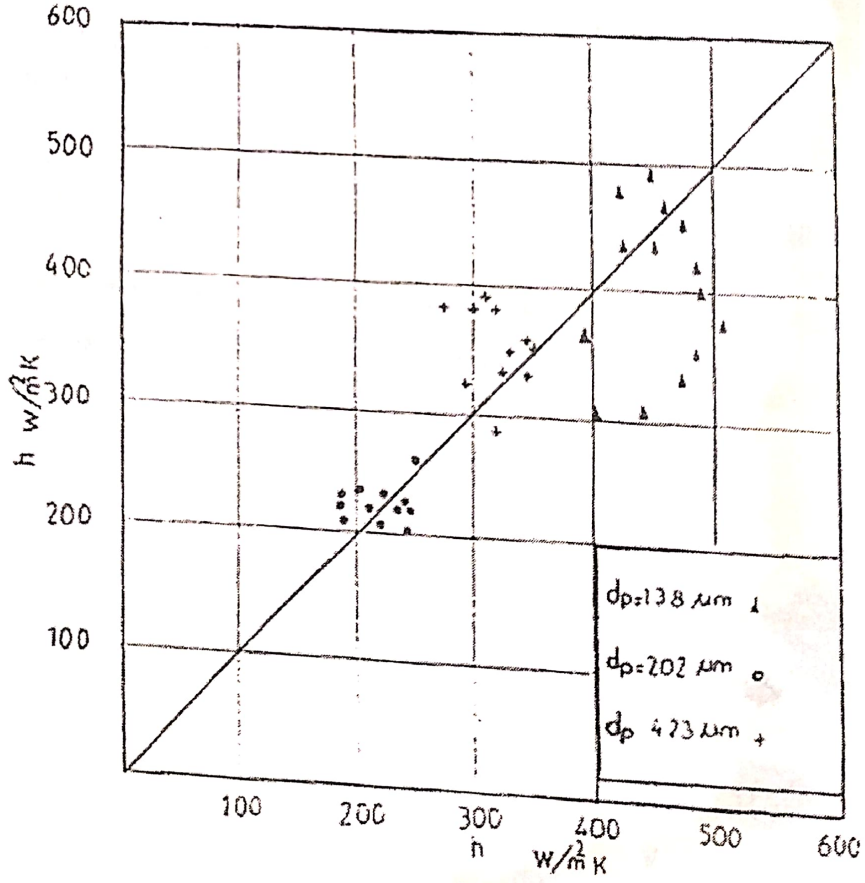
شكل (4): تغير معامل انتقال الحرارة مع سرعة تدفق الهواء.



شكل (5): تغير عدد نسلت مع عدد رينولد.



شكل (6): تغير معامل انتقال الحرارة مع قطر الحبيبات الصلبة.



شكل (7): مقارنة قيم عدد نسلت المحسوبة من النموذج والتي تم الحصول عليها من التجارب.

References المراجع

[1]- Davidson J.F. Clift R. and Harrison D "Fluidization" (Academic press London, 1985); pp. 437-452.

[2]- Howard J., R "Fluidized bed technology, principles and Applications" (Adam. Hidger, bristol and New York, 1989), pp. 4-9.

[3]- Kunii D. and Levenspiel F., "Fluidization Engineering", (2nd Ed) Butterworth – Heinemann, Stoncham, 1991), pp. 1-10.

[4]- Martin H., H "Heat transfer between gas fluidized beds of solid particles and surfaces of immersed heat exchanger elements", Chemical Engineering and processing, Vol.18, 1984, pp. 157-223.

[5]- Mickley H.S. and Faiarvanks D.F., "Mechanism of heat transfer of fluidized bed", American institute of chemical Engineers (AlchE) Vol.I, 1955, pp. 374-384.

[6]- Ouyang S., Li xG, Davies G. and Potter OE, "Heat transfer between a vertical tube bundle and fine particles in a CFB downcomer with and without Circulation of Solids" Chemical engineering and Processing Vol. 35 No.1, 1996, pp. 21-27.

[7]- وزارة الطاقة والثروة المعدنية في الأردن. "ملخص حول الصخر الزيتي في الأردن" (أيار 1994. ص2-4).

[8]- Botterill J.S. M. "Fluid bed heat transfer" (Academic Press London, 1975), pp. 1-5.

[9]- Davidson J.F. and Harrison D. "Fluidization". (Academic Press London, 1971), pp. 3-6.

[10]- Suwanayuen STS and Nimipal W "Heat transfer characteristics in a small – scale fluidized bed boiler" Int. J. of Energy Research, Vol.20, No.6, 1996. Pp. 521-530.

[11]- Hoelen Q and Stemrcling S, "Heat transfer in a fluidized bed, Part II, Interpretation of heat transfer Coefficient on the basis of Solids Movement", Powder Technology, Vol.30, No.2, 1981. Pp. 175-174.

[12]- Saleh K. and Moh'd M. "The heat transfer mechanism between a fluidized bed and an immersed surface" (graudation project, Amman University College for applied engineering, Mechanical engineering department, 1997), pp. 29-39.

[13]- Borodulya V.A., Teplitski Yu s., Markevich II, Hassan A., F. and Yeryomenko T.P., "Heat transfer between a surface and a fluidized bed" Int. J. Heat mass transfer Vol.34, No.1, 1991, pp. 47-55.

[14]- البصول ممدوح "سرعات الغاز المميزة للطبقة المميعة ذات الحبيبات الصلبة غير متساوية الأقطار"، مجلة اتحاد الجامعات العربية للدراسات والبحوث الهندسية، العدد الأول المجلد الرابع 1997، ص73-86.