

دراسة عملية لانتقال الحرارة بالحمل القسري من صف من الاسطوانات الأفقية المغموسة في وسط مسامي في جريان متعامد

د.مهند عبد الفتاح الظاهر-أستاذ مساعد-جامعة الأنبار-قسم الهندسة الميكانيكية.

د.محمد حسن الموسوي-أستاذ مساعد-جامعة كربلاء- قسم الهندسة الميكانيكية.
احمد توفيق السامرائي-مدرس مساعد-جامعة تكريت- قسم الهندسة الميكانيكية.

الخلاصة

أجريت دراسة عملية لانتقال الحرارة بالحمل القسري من صف من الاسطوانات الأفقية المغموسة في وسط مسامي في جريان متعامد تحت شرط ثبوت درجة حرارة سطح الاسطوانة المسخنة. شملت الدراسة بيان تأثير كل من عدد بكلية وموقع الاسطوانة المسخنة ضمن الصف والمسافات الفاصلة بين الاسطوانات على قابلية هذه الاسطوانة لتبديد الحرارة، فضلاً عن التعرف على مقدار التحسن في معدل انتقال الحرارة تبعاً لغمس الاسطوانات في الوسط المسامي.

أقيم لهذا الغرض منشأ تجريبي مؤلف أساساً من دافعة هواء ومجرى هواء ومقطع اختبار وعنصر التسخين الذي هو عبارة عن اسطوانة نحاسية قطرها (12.7 mm) تسخن من الداخل كهربائياً والتي تعد عنصر نقل وتبديد الحرارة خلال هذا المنشأ.

أنجزت الاختبارات ضمن مدى من نسب المسافة الفاصلة بين الاسطوانات تراوح بين ($1.2 \leq S/D \leq 2$) لصف يتكون من خمس اسطوانات مغموسة في وسط مسامي مكون من حبيبات الألومينا بمعدل قطر حبيبي مقداره (3.938 mm) في جريان مضطرب عند أعداد بكلية تراوحت بين ($15 < Pe < 56$).

بينت الدراسة أن قابلية الاسطوانة المسخنة على تبديد الحرارة هي دالة لعدد بكلية وموقع هذه الاسطوانة ضمن الصف والمسافات الفاصلة بين الاسطوانات.. إذ تزداد هذه القابلية بزيادة عدد بكلية، وقد لوحظ أن هذه القابلية تصل أعلى قيمة لها

عند الاسطوانة الثالثة في الصف عند نسبة مسافة فاصلة مقدارها ($S/D=1.6$) وكذلك عند الاسطوانة الرابعة في الصف عند نسبة مسافة فاصلة مقدارها ($S/D=1.4$). كما أظهرت الاسطوانة المسخنة الموضوعة في أي موقع ضمن الصف ولأغلب نسب المسافة الفاصلة زيادة في انتقال الحرارة مقدارها الأعظم (21%) مقارنة باسطوانة مفردة مغموسة في وسط مسامي. كذلك لوحظ أن أعلى قيمة للتحسن في انتقال الحرارة من الاسطوانة المسخنة في صف الاسطوانات (نتيجة" لاستخدام الوسط المسامي في غمس هذا الصف) كانت خمس مرات تقريبا" بقدر الحرارة المنتقلة من نفس الترتيب أو الصف لاسطوانات طليقة في جريان متعامد عند نفس سرعة الجريان اعتمادا" على نتائج متاحة من خلال دراسة عملية سابقة.

الكلمات الدالة

انتقال الحرارة، الحمل القسري، الوسط المسامي.

قائمة الرموز

الرمز	المعنى	الوحدات
A	المساحة	m^2
A_d	المساحة العرضية لمقطع الاختبار	m^2
a	ثابت تجريبي في المعادلة (7)	—
B	ثابت في المعادلة (3)	—
b	ثابت تجريبي في المعادلة (7)	—
C_p	الحرارة النوعية بثبوت الضغط	$J/kg \ K$
c	ثابت تجريبي في المعادلة (7)	—
D	قطر الاسطوانة	m
d	ثابت تجريبي في المعادلة (9)	—
الرمز	المعنى	الوحدات

d_p	معدل قطر الحبيبة	m
Gr	عدد كراشوف	-
g	التعجيل الأرضي	m/s^2
H	ارتفاع مجرى الهواء ، ارتفاع مقطع الاختبار	m
h	متوسط معامل انتقال الحرارة	$W/m^2 K$
Δh	قراءة فرق ارتفاع السائل في مرواز الضغط	m
k	الموصلية الحرارية	$W/m K$
M	معامل التدفق للصفحة المثقوبة	-
Nu	متوسط عدد نسلت	-
n	رقم موقع الاسطوانة المسخنة ضمن الصف	-
Pe	عدد بكليت	-
Pr	عدد براندتل	-
Q_{net}	صافي الحرارة أو القدرة	W
Re	عدد رينولدز	-
S	المسافة الفاصلة بين مركز اسطوانة وأخرى	m
T	درجة الحرارة	K
U	معدل سرعة جريان الهواء	m/s

الرموز اليونانية

الرمز	المعنى	الوحدات
α	الانتشارية الحرارية	m^2/s
λ	ثابت في المعادلة (3)	-
ρ	الكثافة الكتلية	kg/m^3
ϕ	المسامية	-

الرموز التحتية

الرمز	الدلالة
a	الهواء
d	محسوب على أساس قطر الحبيبة
e	الفعالة
f	المنطقة الغشائية
k	محسوب على أساس النفاذية
n	النفط الأبيض
or.	الصفحة المثقوبة
p	حبيبات الوسط المسامي
s	سطح الاسطوانة

المقدمة

اتجه مجال البحث في العقود الثلاثة الأخيرة وتحديدًا " بعد أزمة الطاقة التي برزت عند قطع النفط العربي عن الأسواق العالمية في حرب تشرين عام (1973) إلى تحفيز العمل باتجاهين، أولهما إيجاد بدائل جديدة للطاقة النفطية كالطاقات المتجددة (الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة الشلالات وطاقات باطن الأرض) وثانيهما ترشيد استهلاك الطاقة من خلال تحسين كفاءة أداء منظومات التبادل الحراري والدورات الحرارية عن طريق البحث عن محفزات يمكن استخدامها بصورة عملية بحيث تعمل على زيادة مقدار الحرارة المنتقلة من هذه المنظومات كالأوساط المسامية بنوعها الطبقات المحشوة والطبقات الممبوعة.. إذ إن استخدام الوسط المسامي كمحفز لانتقال الحرارة في المبادلات الحرارية المتكونة أساسًا من حزم الأنابيب قد يزيد من نقل الحرارة ويعطي الفرصة لتقليل المساحة السطحية اللازمة للتبادل الحراري مما يؤدي إلى تقليل حجم المبادل الحراري وكلفته، علاوة على السماح بفروق أقل في درجات الحرارة وبالتالي زيادة كفاءة تلك المبادلات للحجم المستخدم نفسه أو تقليل حجم المبادل والكفاءة نفسها.

أدى ذلك إلى ظهور العديد من الأعمال البحثية التي تناولت انتقال الحرارة من أو إلى الاسطوانات الأفقية وكذلك حزم الأنابيب المغموسة في الأوساط المسامية.

إن أولى هذه الدراسات والتي عالجت انتقال الحرارة من اسطوانة أفقية مغموسة في وسط مسامي كانت للباحث Cheng^[1] الذي أجرى دراسة نظرية لانتقال الحرارة بالحمل المختلط حول اسطوانة أفقية وكرة مغموستين في وسط مسامي.. إذ كانت حصيلتها استخراج صيغة عامة لتغير عدد نسلت الموضعي لكل من الاسطوانة والكرة بدلالة عدد بكليت الموضعي والنسبة اللابعدية ($\frac{Gr_k}{Re}$) التي تقيس الأهمية النسبية للحمل الطبيعي إلى الحمل القسري بحيث أن معدل انتقال الحرارة يصبح محاذاً لقيم الحمل القسري والطبيعي عندما تتجه قيم هذه النسبة إلى 0 و ∞ على التوالي.

أما الباحثان Phan و Fand^[2] فقد أنجزا دراسة تجريبية لانتقال الحرارة بالحمل المختلط من اسطوانة أفقية مغموسة في وسط مسامي مؤلف من كرات زجاجية محشوة عشوائياً ومشبعة بالماء. لقد بينت الدراسة أن الشرط ($\frac{Gr_k}{Re^2}$) يمثل معياراً يمكن الفصل به بين انتقال الحرارة المحكوم بالحمل القسري المجرد عن ذلك الذي يكون فيه الحمل الطبيعي ذا تأثير واضح، وهذا مشابه للشرط ($\frac{Gr}{Re^2}$) في حالة الجريان وانتقال الحرارة من الاسطوانات الأفقية الطليقة في جريان متعامد، وبناءً على ذلك تم الحصول على عدد كبير من القراءات تقع ضمن حدود الحمل القسري ($\frac{Gr_k}{Re^2} \leq 0.5$)، والمحكممة بثلاثة أنواع من الجريان اعتماداً على عدد رينولدز المحسوب على أساس قطر الكرات أو الحبيبات (Re_d).. إذ أن جزءاً من هذه القراءات محكوم بجريان دارسي ($0.1 < Re_d \leq 2.3$) وجزءاً آخر محكوم بجريان فورشماير ($5 < Re_d \leq 80$) وجزءاً ثالثاً محكوم بالجريان المضطرب ($Re_d > 120$) خلال الوسط المسامي، وقد ربطت كل مجموعة من هذه القراءات بمعادلة ارتباطيه وحسب نوع الجريان الحاكم لها.

كذلك فقد قام Nasr وآخرون^[3] بإجراء استقصاء عملي لانتقال الحرارة بالحمل القسري من اسطوانة أفقية مغموسة في طبقة محشوة مكونة من دقائق أو حبيبات كروية من مواد مختلفة (ألومينا، زجاج، نايلون)، حيث تم في هذا البحث دراسة تأثير قطر الدقائق أو الحبيبات المكونة لهذه الحشوة. إذ استعملت ثلاثة أقطار حبيبيه ذات موصلية حرارية تراوحت بين (0.23 W/m K) للنايلون إلى

(200 W/m K) للألمنيوم. بينت النتائج أن معامل انتقال الحرارة لهذا النظام أعلى بمقدار سبع مرات من الأسطوانة الطليقة، وأن انتقال الحرارة يزداد كلما صغر حجم الحبيبات المؤلفة للحشوة وكلما ازدادت موصليتها الحرارية.

كما تناولت البحوث من جانب آخر دراسات تجريبية ونظرية لانتقال الحرارة بالحمل القسري من أو إلى حزمة من الأنابيب أو الأسطوانات المغموسة في وسط مسامي خلال جريان متعامد. إن أولى هذه الدراسات كانت للباحثين Mohamad و Viskanta^[4]. إذ شمل البحث دراسة تجريبية لميزات استخدام الطبقات المحشوة المتكونة من حبيبات سيراميكية في تحسين انتقال الحرارة بالحمل القسري من نواتج الاحتراق الساخنة إلى أنابيب مغموسة في وسط مسامي، والمستعملة في تسخين الهواء المار خلالها (مسخنات الهواء الأنبوبية) في عملية التسخين المسبق للهواء الداخل إلى وحدات إنتاج البخار في المحطات الكهروحرارية. بينت نتائج الدراسة أن انتقال الحرارة إلى هذه الأنابيب يتحسن بنحو كبير عند غمسها بالوسط المسامي نتيجة "لزيادة المساحة السطحية لانتقال الحرارة من الوسط الناقل للحرارة إلى الأنابيب. كذلك فقد أجرى Mohamad وآخرون^[5] تطويراً" لـ"نموذج رياضي يحاكي عملية الاحتراق وانتقال الحرارة إلى أنابيب مغموسة في طبقة محشوة يمر عليها خليط الهواء والغاز الناتج عن عملية الاحتراق بصورة متعامدة، وقد تضمنت الدراسة احتساب ورسم مجال الجريان وتوزيع درجات الحرارة عددياً" خلال الحشوة. وقد تبعها دراسة قام بها Mohamad وآخرون^[6] طوروا فيها انموذجاً "رياضياً" مشابهاً" لـ"النموذج السابق ولكن بتحليل مجال الجريان وتوزيع درجات الحرارة خلال الحشوة عن طريق حل معادلات الكتلة والزخم والطاقة عددياً" لخواص فيزيائية متغيرة مع درجة الحرارة، وقد شمل البحث كذلك دراسة تأثير قطر الحبيبات المؤلفة للحشوة والهواء الزائد في عملية الاحتراق على الخواص الحرارية للنظام المبين في أعلاه. بينت الدراسة انه لمعدل انتقال حرارة محدد بين خليط الهواء والغاز وبين الحشوة المسامية أن درجة حرارة الخليط ودرجة حرارة الحشوة غير متساويتين موضعياً، علاوة على أن التوازن الحراري بين الخليط والحشوة يزداد بزيادة قطر الحبيبات المؤلفة لهذه الحشوة.

استناداً" إلى ما سبق فقد تبين ندرة البحوث العملية والنظرية التي تعالج انتقال الحرارة من حزم الاسطوانات أو الأنابيب بأشكالها الهندسية المختلفة والمغموسة في وسط مسامي على الرغم من أهمية هذا الترتيب الهندسي في جميع وسائل نقل وتبديد وخن الحرارة، وعليه فقد خطط في الدراسة الحالية لإنارة جانب ولو صغير من جوانب هذا الموضوع الحيوي عملياً" وذلك بإجراء دراسة عملية لانتقال الحرارة بالحمل القسري من صف من الأسطوانات الأفقية المغموسة في وسط مسامي في جريان متعامد تحت شرط ثبوت درجة حرارة سطح الاسطوانة المسخنة، وبيان تأثير موقع هذه الأسطوانة ضمن الصف والمسافات الفاصلة بين الاسطوانات على انتقال الحرارة من الاسطوانة المسخنة ومقدار التحسن في انتقال الحرارة تبعاً لغمس الاسطوانات بالوسط المسامي وكما موضح بالشكل (1)، إذ يدخل المائع (الهواء) إلى مقطع الاختبار بدرجة حرارة (T_a) ومعدل سرعة جريان (U) باتجاه عمودي على محور هذه الاسطوانات المغموسة في وسط مسامي مكون من حبيبات الألومينا (أوكسيد الألمنيوم) بمعدل قطر حبيبي ($d_p = 3.938$ mm). استخدمت لهذا الغرض خمس اسطوانات نحاسية توضع إحداها في مقطع الاختبار صعوداً (Up Stream) من الاسطوانات الأربع الباقية بنسب مسافة فاصلة ثابتة ضمن مدى ($1.2 \leq S/D \leq 2$) ثم تسخن كهربائياً" وتستخرج قابليتها على تبديد الحرارة، بعد ذلك يغير موقع هذه الاسطوانة بحيث يصبح ترتيبها الثانية ومن ثم الثالثة، والرابعة والخامسة في صف الاسطوانات وتختبر قابليتها على تبديد الحرارة وهكذا ضمن نفس المدى من نسب المسافات الفاصلة المبينة في أعلاه.. إذ أن تسخين جميع الاسطوانات أو تسخين إحداها خلال الدراسة الحالية لا يؤثر كثيراً" على النتائج المختبرية لمعامل انتقال الحرارة المحسوب لاسطوانة الاختبار المسخنة إذا عرفنا أن المائع المستخدم في الاختبارات الحالية هو الهواء بحيث أن عدد براندتل يكون ثابت تقريباً" عند مدى درجات الحرارة المأخوذة خلال الاختبارات^[7]، كما أن الاختبارات أجريت ضمن مدى ($\frac{Gr_k}{Re^2} \leq 1$) بحيث لا يظهر تأثير الحمل الطبيعي الذي قد يؤثر على النتائج فيما لو كانت الاختبارات الحالية ضمن مدياته^[2].

المنشأ التجريبي

إن الرسم التخطيطي للمنشأ التجريبي مبين في الشكل (2)، إذ يتألف هذا المنشأ بصورة أساسية من دافعة الهواء ذات الطرد المركزي ومجرى الهواء ومقطع الاختبار وعنصر التسخين، علاوة على منظومة القياس المؤلفة من أجهزة قياس تدفق الهواء وأجهزة قياس القدرة الكهربائية للمجهزة للمسخن وأجهزة قياس درجات الحرارة لسطح اسطوانة الاختبار المسخنة والهواء الداخل إلى مقطع الاختبار.

استخدمت دافعة هواء ذات الطرد المركزي تعمل بالتيار المتناوب بقدرة (3 kW) وبسرعة دورانية ثابتة مقدارها (2900 rpm) لدفع الهواء المطلوب خلال المجرى. ربطت هذه الدافعة إلى مجرى الهواء بواسطة انبوب توصيل من الحديد المغلون بقطر مقداره (76.2 mm) وطول (1.3 m)، وقد زود هذا الانبوب بصمام بوابي ومقياس الصفيحة المثقوبة لقياس تدفق الهواء خلال الانبوب.. إذ يسمح هذا الصمام لمعدل السرعة خلال مجرى الهواء ومقطع الاختبار أن يصل إلى (2.1 m/s) كحد أقصى. بعد الصمام ثبت مقياس الصفيحة المثقوبة وربطت فتحاً لقياس الضغط السكوني المتولد عبر الصفيحة إلى مرواز ضغط تفاضلي على شكل حرف U ذو مدى قراءة مقدارها ($0 < \Delta h < 680$ mm_{Kerosene}) وبدقة قراءة مقدارها (1 mm_{Kerosene}).

ربط انبوب التوصيل بمجرى هواء مستطيل المقطع صنع من ألواح خشبية. إن هذا المجرى ذو طول مقداره (1.6 m) ومساحة مقطع جريان قدرها (0.16×0.14 m²). صقلت الجدران الداخلية لمجرى الهواء صقلاً جيداً وطلايت بطلاء دهني لضمان الملاسة الهيدروليكية للمجرى، كما وضع مشبك من الأسلاك داخل المجرى ذو كثافة مقدارها (1.5×1.5 mm²) عمودياً على اتجاه الجريان وعلى بعد (0.5 m) من مكان الاتصال بين انبوب التوصيل ومجرى الهواء لتهدئة الجريان وجعله متجانساً وتقليل مستوى الاضطراب، كما عملت فتحة صغيرة في الجدار العلوي للمجرى على بعد (0.49 m) صعوداً من مقطع الاختبار لوضع مزدوج حراري لقياس درجة حرارة الهواء الداخل (T_a).

تضمن مجرى الهواء مقطع اختبار صنع من نفس الألواح الخشبية المستخدمة في صنع المجرى ذا مساحة مقطع عرضي مساوية لمساحة المقطع العرضي لمجرى الهواء وبطول قدره (170 mm). ثبت الجدار السفلي والجدران الجانبية لمقطع الاختبار في حين بقي الجدار العلوي قابلاً للفتح وذلك لكي يتم من خلاله التحكم بوضع الاسطوانات وتنظيم المسافات الفاصلة بينها، فضلاً عن إمكانية ملئ وتفريغ مقطع الاختبار بالحشوة المسامية التي وضعت في مكانها عن طريق تثبيت مشبك من الأسلاك بكثافة (1.5×1.5 mm²) على نهايتي مقطع الاختبار.

إن عنصر التسخين عبارة عن اسطوانة مجوفة من النحاس التجاري بقطر خارجي مقداره (12.7 mm) وسماك جدار (0.7 mm) وطول (160 mm) كما موضح تخطيطياً بالشكل (3). ثبتت هذه الاسطوانة إلى الشقين الطويلين المعمولين خلال الجدران الجانبية لمقطع الاختبار بواسطة سدادتين مجوفتين من الحديد، وقد سخنت هذه الاسطوانة بواسطة مسخن يتألف أساساً من مقاومة كهربائية من النيكل - كروم ذات مقاومة مقدارها (28Ω).

إن سمك الاسطوانة النحاسية أعطى توزيعاً حرارياً متجانساً على سطح الاسطوانة وبالتالي ثبوت لدرجة الحرارة حول محيط الاسطوانة.. إذ أن درجة الحرارة حول محيط الاسطوانة تكون ثابتة تقريباً ويفرق لا يزيد عن (0.5°C).

استخدمت أربع اسطوانات نحاسية أخرى غير مسخنة ذات أبعاد مساوية لأبعاد اسطوانة الاختبار لعمل صف أنابيب يوفر حقل جريان مناسب للاختبار.

جهاز المسخن بالقدرة اللازمة من مصدر للتيار المتناوب عبر مثبت لفرق الجهد ذي نسبة خطأ في الدقة لا تتجاوز (2%) من القدرة المجهزة وخلال محول قدرة نوع (SAT - 2020). كذلك استخدم جهاز قياس فرق جهد متعدد الأغراض نوع (K-1400) لقياس فرق الجهد على طرفي المسخن، يقرأ فرق جهد ضمن مدى من (0 V) إلى (500 V) وبدقة قراءة مقدارها (0.2 V). كما استخدم جهاز قياس تيار نوع (ENERTEC) لقياس التيار المار عبر المسخن يقرأ تياراً ضمن مدى (0 A) إلى (5 A) وبدقة قراءة مقدارها (0.002 A).

أما درجة الحرارة فقد تم قياسها بواسطة مقياس حرارة رقمي نوع (Jenway 7500) يقرأ درجات حرارة ضمن مدى (-220°C) إلى (1370°C) وبدقة قراءة مقدارها (0.5°C)، حيث استخدمت خمسة مزدوجات حرارية نوع (K) ذات قطر مقداره (0.27 mm) معيرة تعبيراً "جيداً" (مع مقياس الحرارة الرقمي) لقياس درجات حرارة سطح الاسطوانة المسخنة (T_s).. إذ لحمت ثلاثة من هذه المزدوجات على بعد (80 mm) من أحد طرفي الاسطوانة ووزعت بالتساوي على محيطها بواقع مزدوج حراري كل (120°)، بينما لحم المزدوجين الآخرين على بعد (30 mm) من طرفي الاسطوانة لقياس توزيع درجة الحرارة على محيط الاسطوانة وطولها على التوالي.

إن الغرض الأساسي من الاختبار هو بيان تأثير موقع الاسطوانة المسخنة ضمن الصف والمسافات الفاصلة بين الاسطوانات على انتقال الحرارة بالحمل القسري من الاسطوانة المسخنة الموضوعة ضمن صف الاسطوانات المغموسة في وسط مسامي في جريان متعامد، لذلك فانه في بداية أي اختبار يتم تحديد موقع الاسطوانة المسخنة ضمن الصف ومقدار المسافات الفاصلة بين الاسطوانات، ثم تثبت هذه الاسطوانات في أماكنها في مقطع الاختبار. بعد ذلك يتم ملئ مقطع الاختبار بحبيبات الألومينا المكونة للوسط المسامي.. إذ تسكب بشكل عشوائي داخل مقطع الاختبار إلى أن يمتلئ المقطع بهذه الحبيبات بشكل تام. بعدها تشغل دافعة الهواء وتترك لبضع ثواني حتى تصل حالة الاستقرار، ثم يثبت معدل التدفق المطلوب خلال مقطع الاختبار بواسطة الصمام البوابي وقراءة مرواز الضغط المربوط إلى مقياس الصفيحة المثقوبة. عند حالة التشغيل أعلاه يتم تزويد المسخن الكهربائي بالقدرة الكهربائية المنتخبة عن طريق محول القدرة وبالتالي الحصول على مقدار الحرارة المطلوب تجهيزها إلى الاسطوانة المسخنة، ثم يترك الجهاز مدة كافية لحين الوصول إلى حالة الاستقرار، عند ذلك تؤخذ قراءات المزدوجات الحرارية لدرجات حرارة سطح الاسطوانة المسخنة ودرجة حرارة الهواء الداخل ومقدار فرق الجهد والتيار الداخل ومقدار فرق الضغط المتولد عبر الصفيحة المثقوبة. بعد ذلك يغير معدل التدفق للهواء المار خلال مقطع الاختبار بمعدل تدفق آخر من خلال الصمام البوابي وتعاد

العملية من جديد.. إذ يتم عمل ذلك لعدة محاولات (خمس محاولات) كافية لرسم العلاقة بين عدد نسلت وعدد بكليت.

اختزلت النتائج المستحصلة من العمل التجريبي بدلالة عددي نسلت وبكليت كدالة للمسافة الفاصلة بين الاسطوانتين.. إذ تم حساب متوسط معامل انتقال الحرارة (h) بالمعادلة الآتية:

$$h = \frac{Q_{net}}{A_s(T_s - T_a)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

حيث أن:

Q_{net} : صاف الحرارة المنتقلة بالحمل القسري.. إذ وجد أن الحرارة المفقودة بالتوصيل والإشعاع لا تتجاوز (4%) من الحرارة المتولدة بالمسخن.
أما متوسط عدد نسلت (Nu) فقد حسب من المعادلة:

$$Nu = \frac{hD}{k_e} \quad \dots\dots\dots(2)$$

12

حيث أن:

k_e : الموصلية الحرارية الفعالة للوسط المسامي والتي يمكن حسابها من خلال انموذج (Zehner & Schlunder)^[8] وكما يأتي:

$$k_e = k_f \left\{ 1 - \sqrt{(1-\phi)} + \frac{2\sqrt{(1-\phi)}}{1-\lambda B} \times \left[\frac{(1-\lambda)B}{(1-\lambda B)^2} \ln\left(\frac{1}{\lambda B}\right) - \frac{B+1}{2} - \frac{B-1}{1-\lambda B} \right] \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

إذ أن: $B = 1.25[(1-\phi)/\phi]^{10/9}$ و $\lambda = k_f / k_p$

إن الموصلية الحرارية للألومينا (k_p) أخذت من الجدول (1)^[3]، والتي تساوي (40 W/m K)، أما بالنسبة للمسامية الظاهرية للوسط (ϕ) فقد استخدمت

الطريقة الحجمية المتبعة في المصدر نفسه أعلاه لحسابها، وتبين من الحسابات أن المسامية الظاهرية للحشوة المستخدمة في هذا الاختبار تساوي (0.363). في حين تم احتساب معدل سرعة جريان الهواء عند الدخول إلى مقطع الاختبار (U) باستخدام معادلة حساب التدفق خلال الصفيحة المثقوبة^[9]، وذلك بعد ترتيب حدودها لتصبح بالشكل الآتي:

$$U = M \frac{A_{or.}}{A_d} \sqrt{\frac{2g\rho_n\Delta h}{\rho_a}} \dots\dots\dots(4)$$

حيث أن:

M : معامل التدفق خلال الصفيحة المثقوبة، والذي يستخرج من الشكل (13.7)^[9]. إن مقداره يساوي (0.76) خلال الدراسة الحالية اعتماداً على نسبة القطر وعدد رينولدز المحسوب على أساس قطر انبوب التوصيل. وقد حسب عدد بكليت (Pe) من المعادلة:

$$Pe = \frac{UD}{\alpha_e} \dots\dots\dots(5)$$

حيث أن:

α_e : الانتشارية الحرارية الفعالة للوسط المسامي والتي حسبت بالمعادلة:

$$\alpha_e = \frac{k_e}{\rho_f C_{P_f}} \dots\dots\dots(7)$$

استخرجت جميع الخواص الفيزيائية للهواء الداخل إلى مقطع الاختبار من جدول (A-5) لخواص الهواء عند الضغط الجوي^[10] عند متوسط درجة حرارة المائع (الهواء) الغشائية (T_f).

استخدمت طريقة (Kline & McClintock)^[9] في تحليل الخطأ التجريبي في حساب معدل سرعة الجريان عند الدخول إلى مقطع الاختبار ومتوسط معامل انتقال الحرارة وكذلك عدد بكلييت ومتوسط عدد نسلت.. إذ كانت نسبة الخطأ محصورة بين (3% - 23.5%) لجميع الكميات التي تم استخراجها.

النتائج والمناقشة

قبل البدء بالاختبارات تم معايرة اسطوانة الاختبار الأساسية (الاسطوانة المسخنة) وبالتالي معايرة المنشأ التجريبي بصورة إجمالية، وذلك عن طريق اختبار انتقال الحرارة بالحمل القسري من الاسطوانة المسخنة كأسطوانة مفردة طليقة في جريان متعامد.. إذ استخرج معدل انتقال الحرارة من هذه الاسطوانة ممثلاً " بعدد نسلت ولأعداد رينولدز تراوحت بين ($1 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^3$) بثبوت عدد براندتل تقريباً" ($Pr \approx 0.7$)، ومن ثم مقارنته مع المعادلة الارتباطية المستنبطة من قبل تشرشل وبيرنستين (1977)^[11] وكما مبين في الشكل (4). إذ يتضح مدى التوافق الجيد بين النتائج العملية والمعادلة الارتباطية، أما الفارق البسيط الموجود بينهما فيرجع إلى أن المعادلة الارتباطية أعلاه كانت مأخوذة لمدى واسع جداً من أعداد رينولدز ($10^2 < Re < 10^7$) وأعداد براندتل ($0 < Pr < 10^3$)، وبملاحظة مخطط المعادلة الارتباطية^[11] فإن منحنى هذه المعادلة يكون أسفل النتائج العملية ضمن مدى أعداد رينولدز العملية أعلاه.

14

تم بيان تأثير الجريان على انتقال الحرارة بالحمل القسري من صف من الاسطوانات الأفقية المغموسة في وسط مسامي في جريان متعامد بالشكل (5)، الذي يصف العلاقة بين متوسط انتقال الحرارة ممثلاً " بعدد نسلت (Nu) وعدد بكلييت (Pe). إذ يبين كل شكل ضمن الشكل أعلاه تغير عدد نسلت لاسطوانة معينة ضمن صف الاسطوانات مقابل عدد بكلييت لصف مكون من خمس اسطوانات عند نسب مسافة فاصلة تراوحت بين ($1.2 \leq S/D \leq 2$).

يلحظ من هذه الأشكال أن معدل انتقال الحرارة يزداد بزيادة سرعة الجريان وهذه نتيجة متوقعة لأن انتقال الحرارة بالحمل القسري يزداد بزيادة تماس تيار المائع

البارد مع السطح الساخن لوحدة الزمن على الرغم من كون الجريان انزلاقي ضمن الوسط المسامي، علاوة" على أن سمك الطبقة المتاخمة الهيدروليكية يصبح أكثر نحافة" عند زيادة سرعة الجريان وبالتالي فإن سمك الطبقة المتاخمة الحرارية المحيطة بالاسطوانات سوف يتقلص مما يؤدي بالتالي إلى تناقص المقاومة الحرارية بين الاسطوانات وتيار الهواء الجاري وزيادة انتقال الحرارة منها.

كذلك يلحظ من هذه الأشكال أن منحنيات العلاقة بين عدد نسلت وعدد بكلييت عند نسب المسافة الفاصلة المبينة في أعلاه وضمن نفس الشكل تتباين في شكلها وموقعها من نسبة لأخرى، كما أنها متشابكة وغير واضحة المعالم ولا يمكن معها بالتالي دراسة تأثير المتغيرات الأخرى (موقع الاسطوانة المسخنة ضمن الصف والمسافات الفاصلة بين الاسطوانات) على انتقال الحرارة من الترتيب في أعلاه، لذلك فقد تم استكمال قيم عدد بكلييت ومتوسط عدد نسلت لاستخراج معادلات ربط توضح العلاقة بين المتغيرين أعلاه لاسطوانات محددة عند نسب مسافات فاصلة ثابتة. استخرجت من هذه المعادلات علاقات تبين تأثير موقع الاسطوانة المسخنة ضمن الصف والمسافات الفاصلة بين الاسطوانات على انتقال الحرارة عند أعداد بكلييت مختلفة وكما مبين بالشكل (6) والشكل (7) على التوالي.

15

يلحظ من الشكلين في أعلاه أن انتقال الحرارة يزداد بزيادة عدد بكلييت، كما أن العلاقة بين متوسط عدد نسلت وموقع الاسطوانة المسخنة ضمن الصف هي علاقة تتغير صعوداً ونزولاً اعتماداً على تغير معدل انتقال الحرارة، أما العلاقة بين متوسط عدد نسلت ونسب المسافات الفاصلة بين الاسطوانات هي علاقة منحنى متموج يعتمد تموجه على مقدار معدل انتقال الحرارة من أي اسطوانة مسخنة في الصف عند نسبة مسافة فاصلة معينة وعدد بكلييت ثابت.

إن انتقال الحرارة من الاسطوانة الأولى عند عدد بكلييت ($Pe = 20$) وكما مبين في الشكل (6) يكون أكبر من جميع اسطوانات الصف المتأخرة عدا الاسطوانة الثالثة عند نسبة مسافة فاصلة ($S/D = 1.2$) بسبب صغر المسافة الفاصلة بين الاسطوانتين مما يؤدي إلى انتقال تأثير الدوامات المتكونة خلف الاسطوانة الأولى إلى

الثالثة وبالتالي زيادة انتقال الحرارة منها بنحو أكبر من بقية اسطوانات الصف عند عدد بكلية المبين في أعلاه.

كما يلحظ أن انتقال الحرارة من الاسطوانة الثانية تقريبا" ذو اقل مقدار عند نسب مسافة فاصلة (1.2 و 1.4 و 1.6) ولجميع أعداد بكلية وهذا راجع إلى أن الاسطوانة الثانية تكون تحت تأثير منطقة الركود النسبي في الجريان المتكونة خلف الاسطوانة الأولى والتي ينسحب تأثيرها على الاسطوانة الثالثة أيضا" عند نسبتي المسافة الفاصلة (1.8 و 2) لتصبح ذات اقل مقدار في تبديد الحرارة وكما مبين بالشكل (6) والشكل (7) عند نسبتي المسافة الفاصلة المبينة في أعلاه.

إن الاسطوانتين الثالثة والرابعة تتبادلان القيمة العظمى لتبديد الحرارة عند اغلب نسب المسافة الفاصلة وعددي بكلية (35 و 50).. إذ يلحظ انه عند نسبة المسافة الفاصلة ($S/D=1.2$) وعدد بكلية ($Pe=35$) وكذلك عند نسبة المسافة الفاصلة ($S/D=1.6$) وعددي بكلية (35 و 50) أن الاسطوانة الثالثة هي ذات أعلى قيمة في معدل انتقال الحرارة وهذا نتيجة" لزيادة تدويم الجريان قريبا" من الاسطوانات وبالتالي جلب مائع من خارج الأثر الحار ليصطدم بالاسطوانة مما يؤدي إلى تقلص سمك الطبقة المتاخمة الحرارية المحيطة بهذه الاسطوانة موضعيا" وبالتالي ازدياد انتقال الحرارة منها. أما عند نسبة المسافة الفاصلة ($S/D=1.2$) وعدد بكلية ($Pe=50$) وكذلك عند نسب المسافة الفاصلة (1.4 و 1.8 و 2) وعددي بكلية (35 و 50) فإن الاسطوانة الرابعة ذات أعلى قابلية في تبديد الحرارة وهذا راجع إلى أن سمك الطبقة المتاخمة الحرارية المحيطة بهذه الاسطوانة يكون أكثر نحافة" من بقية الاسطوانات نتيجة" لانتقال تأثير التدويم إليها من الاسطوانة الثالثة.

إن انتقال الحرارة من الاسطوانة الخامسة عند اغلب نسب المسافة الفاصلة وأعداد بكلية يكون ثابت تقريبا" وكما موضح بالشكل (7). إن هذا الثبوت النسبي في قابلية تبديد الحرارة يعود إلى كبر المسافة الفاصلة بين هذه الاسطوانة والاسطوانة الأولى نسبيا" مما يؤدي إلى بقاء سمك الطبقة المتاخمة الحرارية المحيطة بها ثابتا"، أي أن تأثير موقع الاسطوانة ضمن الصف والمسافات الفاصلة بين اسطوانات هذا

الصف على انتقال الحرارة منها سوف يتلاشى تقريبا" عند الاسطوانة الخامسة وما بعدها.

كذلك يلحظ من الشكلين (6 و 7) أن انتقال الحرارة من هذا الترتيب مشابه إلى حد كبير لطبيعة انتقال الحرارة من ترتيب الاسطوانات الطليقة في جريان متعامد اعتمادا" على النتائج المستتبطة من قبل الظاهر وآخرون^[12]، على الرغم من كون الجريان انزلاقي خلال الوسط المسامي مما يدل على حصول ظاهرة انتقال في الجريان من الطباق إلى الاضطرابي خلال هذا الوسط مع ملاحظة أن الطبقة المتاخمة الحرارية المحيطة بالاسطوانات تكون نحيفة مما يؤدي إلى الزيادة الكبيرة في انتقال الحرارة من جميع هذه الاسطوانات نسبة" للاسطوانات المناظرة في الحالة الطليقة.

لتوضيح فعالية الوسط المسامي في تحسين انتقال الحرارة بالحمل القسري من الاسطوانات الأفقية في جريان متعامد فقد تم اعتماد الشكل (8) الذي يمثل العلاقة بين نسبة التحسن في انتقال الحرارة وموقع الاسطوانة المسخنة ضمن الصف عند نسب مسافات فاصلة مختلفة وسرعة الجريان مقدارها (2 m/s) التي تمثل أفضل نقطة التقاء بين نتائج الدراسة الحالية ونتائج الدراسة التي قام بها الظاهر وآخرون^[12].. إذ يلحظ أن نسبة التحسن في انتقال الحرارة من أي اسطوانة في الصف لا تقل عن (1.799)، أي أن مقدار الحرارة المنتقلة من أي اسطوانة في الصف المغموس في الوسط المسامي عند أي نسبة مسافة فاصلة بين الاسطوانات أعلى بمقدار مرتين تقريبا" عن مقدار الحرارة المنتقلة من أي اسطوانة في الصف عند نفس نسبة المسافة الفاصلة بين اسطوانات طليقة في جريان متعامد. كذلك فإن أعلى نسبة تحسن في انتقال الحرارة مقدارها (4.54 و 4.824) للاسطوانة الثالثة عند نسبة مسافة فاصلة (S/D=1.6) والاسطوانة الرابعة عند نسبة مسافة فاصلة (S/D=1.4) على التوالي، أي أن أعلى مقدار للحرارة المنتقلة من صف الاسطوانات عند هاتين الوضعيتين لاسطوانات مغموسة في وسط مسامي أعلى بمقدار خمس مرات تقريبا" عن مقدار الحرارة المنتقلة من صف الاسطوانات عند نفس الوضعيتين لاسطوانات طليقة في جريان متعامد.

يتضح من خلال ما سبق أن حبيبات الوسط المسامي تعمل كمحفز أو محسن فعال لانتقال الحرارة بالحمل القسري نتيجة" للفعل المركب لكل من المائع والوسط الصلب في نقل الحرارة بالتوصيل والحمل بالإضافة إلى التحطيم المستمر من قبل حبيبات الوسط للطبقة المتاخمة للزجة التي تحاول النمو على سطح الاسطوانات، مما يؤدي إلى أن تصبح الطبقة المتاخمة الحرارية المحيطة بالاسطوانات المغموسة في وسط مسامي ذات سمك نحيف مقارنة" مع سمك الطبقة المتاخمة الحرارية المحيطة بالاسطوانات الطليقة في جريان متعامد وبالتالي زيادة تبديد الحرارة من هذه الاسطوانات المغموسة مقارنة" بالاسطوانات الطليقة.

كما استخرجت صيغة معادلة تربط بين النتائج العملية أو التجريبية لانتقال الحرارة بالحمل القسري من صف الاسطوانات المغموسة في وسط مسامي والمتغيرات التي أختيرت.. إذ استعملت طريقة استكمال المربعات الدنيا (Least Squares Fitting Method) لهذا الغرض. إن معدل انتقال الحرارة من إحدى الاسطوانات في صف الاسطوانات المغموسة ممثلاً" بعدد نسلت يكون دالة لكل من نسبة المسافة الفاصلة وعدد بكليت.. إذ تكتب معادلة الربط على النحو الآتي:

$$Nu = a (S/D)^b Pe^c \dots\dots\dots(7)$$

18

حيث أن:

a و b و c : هي ثوابت تجريبية تستخرج باستعمال طريقة استكمال المربعات الدنيا للنتائج العملية.

باستخدام شكل المعادلة المبينة في أعلاه والنتائج التجريبية لانتقال الحرارة واستعمال طريقة الاستكمال في أعلاه، فقد استخرجت قيم الثوابت التجريبية لهذه المعادلة وكما مبين في الجدول (1) لكل اسطوانة في صف الاسطوانات المغموسة في وسط مسامي.

أستتبعت معادلة ارتباطيه لانتقال الحرارة بالحمل القسري من صف الاسطوانات أكثر عمومية من السابق.. حيث أضيف متغير آخر إلى المتغيرين

السابقين هو رقم موقع الاسطوانة المسخنة ضمن الصف (n)، لذلك فقد أصبح عدد نسلت بدلالة مجموعة من المتغيرات اللابعدية وكما يأتي:

$$Nu = f(Pe, S/D, n) \dots\dots\dots(8)$$

كما هو مقترح في المعادلة أعلاه فقد ربط عدد نسلت مقابل نسبة المسافة الفاصلة ورقم موقع الاسطوانة المسخنة ضمن الصف، فضلاً عن عدد بكليت وكما مبين بالمعادلة الآتية:

$$Nu = a (S/D)^b Pe^c n^d \dots\dots\dots(9)$$

باستعمال طريقة الاستكمال المبينة في أعلاه وتطبيقها على النتائج التجريبية للاختبارات استخرجت قيم الثوابت التجريبية للمعادلة (9) وكانت كالآتي:

$$a=0.529, b=-0.072, c=0.386, d=0.024$$

لذلك فإن الشكل العام للمعادلة الارتباطية الخاصة بانتقال الحرارة بالحمل

19 القسري من اسطوانة معينة في صف من الاسطوانات المغموسة في وسط مسامي عند $(\frac{D}{d_p} = 3.225, \frac{k_p}{k_f} = 1520)$ يكون كالآتي:

$$Nu = 0.529(S/D)^{-0.072} Pe^{0.386} n^{0.024} ; \left\{ \begin{array}{l} 1.2 \leq S/D \leq 2 \\ 1 \leq n \leq 5 \end{array} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

قورنت نتائج انتقال الحرارة من صف من الاسطوانات الأفقية المغموسة في وسط مسامي مع المعادلة الارتباطية (10) الخاصة بهذا الترتيب وكما مبين في الشكل (9)، إذ يلحظ التوافق الجيد بين النتائج ومنحني هذه المعادلة مع وجود بعض التشتت الواضح للقيم حول منحني المعادلة والنتائج عن نسبة الخطأ المرتفعة نسبياً في حساب الموصلية الحرارية الفعالة وعدد بكليت وعدد نسلت خلال الوسط المسامي (كما مبين في تحليل الخطأ التجريبي في أعلاه)، علاوةً على صعوبة التحكم الدقيق

في قيمة المسامية الظاهرية للوسط خلال كل الاختبارات الخاصة بهذا الترتيب. لقد قورن عدد نسلت المقاس عمليا" مع عدد نسلت المحسوب من المعادلة الارتباطية كما مبين في الشكل (10..). إذ يتبين أنه لمائة وخمس وعشرين نقطة قراءة أن (95%) من هذه النقاط تقع ضمن مدى انحراف مقداره $(\pm 18\%)$ عن المعادلة الارتباطية وهذا يبين مدى التوافق الجيد بين هذه المعادلة والنتائج العملية للترتيب المبين في أعلاه ضمن مدى المحددات الخاصة بها.

الاستنتاجات

إن هذه الدراسة أعطت تصورا" واضحا" وكاملا" عن تأثير موقع الاسطوانة المسخنة ضمن صف مكون من خمس اسطوانات مغموسة في وسط مسامي والمسافات الفاصلة بين هذه الاسطوانات على انتقال الحرارة بالحمل القسري من الاسطوانة المسخنة في جريان متعامد وكذلك التحسن في انتقال الحرارة تبعا" لاستخدام الوسط المسامي في غمس الاسطوانات.. إذ أن هذا التأثير يمكن تلخيصه بما يأتي:

20

- 1- إن معدل انتقال الحرارة من الاسطوانة المسخنة يزداد بزيادة عدد بكليت وموقع هذه الاسطوانة ضمن الصف والمسافات الفاصلة بين الاسطوانات إلى أن يصل إلى أعلى قيمة والتي تمثل القيمة المثلى، ثم يبدأ بعدها بالانخفاض.
- 2- إن أعلى مقدار لانتقال الحرارة بالحمل القسري من اسطوانة معينة في صف من الاسطوانات المغموسة في وسط مسامي (القيمة المثلى) يكون عند الاسطوانة الثالثة في الصف بنسبة مسافة فاصلة بين الاسطوانات مقدارها $(S/D=1.6)$ وكذلك عند الاسطوانة الرابعة في الصف بنسبة مسافة فاصلة مقدارها $(S/D=1.4)$.

- 3- أظهرت الاسطوانة المسخنة الموضوعة في أي موقع ضمن الصف ولأغلب نسب المسافة الفاصلة بين الاسطوانات المغموسة في وسط مسامي زيادة في انتقال الحرارة مقدارها الأعظم (21%) مقارنة" باسطوانة مفردة مغموسة في وسط مسامي في جريان متعامد.

- 4- إن أعلى قيمة للتحسن في انتقال الحرارة من الاسطوانة المسخنة في صف الاسطوانات الأفقية في جريان متعامد نتيجة "لدفن هذا الصف أو غمسه بالوسط المسامي كانت خمس مرات تقريبا" بقدر انتقال الحرارة من نفس الصف في الحالة الطليقة عند نفس سرعة الجريان.
- 5- إن المعادلة الارتباطية التي تم استنباطها من النتائج العملية لانتقال الحرارة بالحمل القسري من اسطوانة معينة في صف من الاسطوانات المغموسة في وسط مسامي في جريان متعامد هي معادلة مقبولة إلى حد كبير لتخمين انتقال الحرارة من الترتيب المبين في أعلاه وضمن مدى المحددات الخاصة بهذه معادلة.

المصادر

- [1] Cheng, P., "Mixed Convection About A Horizontal Cylinder And A Sphere In A Fluid-Saturated Porous Medium", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, No. 8, 1982, pp. 1245-1247.
- 21 [2] Fand, R. M., and Phan, R. T., "Combined Forced And Natural Convection Heat Transfer From A Horizontal Cylinder Embedded In A Porous Medium", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 7, 1987, pp. 1351-1358.
- [3] Nasr, K., Ramadhyani, S., and Viskanta, R., "An Experimental Investigation On Forced Convection Heat Transfer From A Cylinder Embedded In A Packed Bed", ASME Journal Of Heat Transfer, Vol. 116, FEB. 1994, pp. 73-80.
- [4] Mohamed, A., and Viskanta, R., "Combined Convection-Radiation Heat Transfer In A Surface Combustor-Process Heater", In: Simulation Of Thermal Energy Systems, Bohem, R. F., and El-Sayed, Y. M., eds., ASME HTD-Vol. 124, 1989, pp. 1-8.
- [5] Mohamad, A., Ramadhyani, S., and Viskanta, R.,

"Modelling Of Combustion And Heat Transfer In A Packed Bed With Embedded Coolant Tubes", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, No. 8, 1994, pp. 1181-1191.

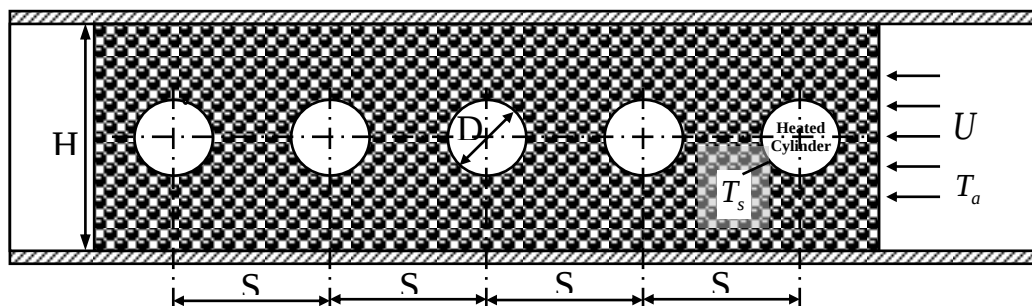
- [6] Mohamad, A., Viskanta, R., and Ramadhyani, S., "Numerical Predictions Of Combustion And Heat Transfer In A Packed Bed With Embedded Coolant Tubes", Combustion Science & Technology, Vol. 96, 1994, pp. 387-407.
- [7] Aiba, S., and Yamazaki, Y., "An Experimental Investigation Of Heat Transfer Around A Tube In A Bank", ASME Journal Of Heat Transfer, AUG. 1976, pp. 503-507.
- [8] Kaviany, M., "Principles Of Heat Transfer in Porous Media", 2nd Edition, Springer-Verlag, Inc, New York, 1999.
- [9] Holman, J. P., "Experimental Methods For Engineers", 4th Edition, McGraw-Hill, Tokyo, Japan, 1971.
- [10] Holman, J. P., "Heat Transfer", 5th Edition, McGraw-Hill, Tokyo, Japan, 1981.
- [11] Churchill, S. W., and Bernstein, M., "A Correlating Equation For Forced Convection From Gases and Liquids To A Circular Cylinder In Cross Flow", ASME Journal Of Heat Transfer, Vol. 99, MAY 1977, pp. 300-306.

22

- [12] د.الظاهر، مهند عبد الفتاح، ود.الموسوي، محمد حسن، والسامرائي، احمد توفيق، "دراسة عملية لانتقال الحرارة بالحمل القسري من صف من الاسطوانات الأفقية في جريان متعامد"، مجلة تكريت للعلوم الهندسية، المجلد العاشر، العدد الأول، آذار 2003، صفحة 18-39.

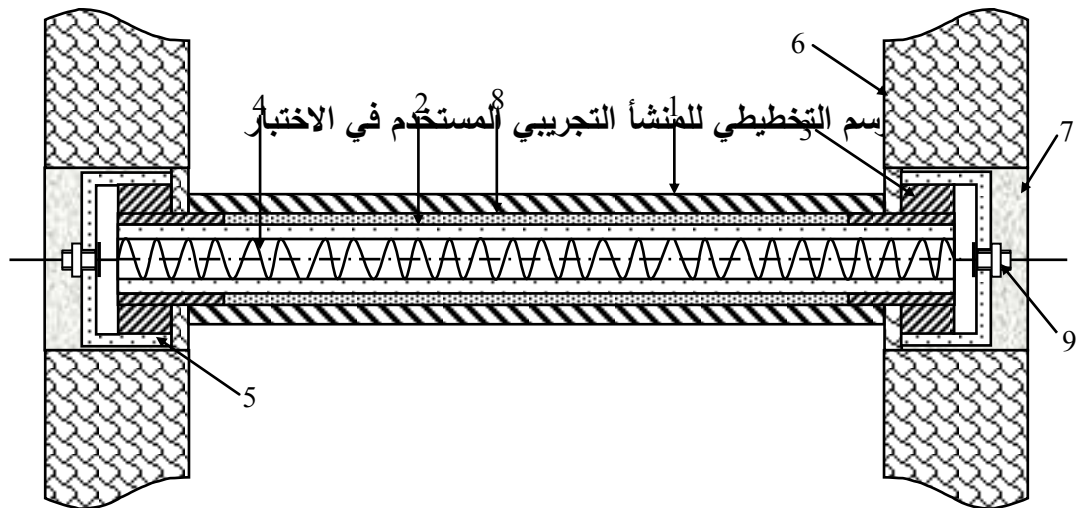
جدول (1) الثوابت التجريبية للمعادلة (7) لصف الاسطوانات المغموسة في وسط مسامي

Cylinder No.	a	b	c
1	0.691481598	0.023725088	0.311021484
2	0.634597281	0.347043892	0.255250121
3	0.53336383	-0.453140139	0.450116371
4	0.397357833	-0.264341984	0.516894595
5	0.579079595	0.127659219	0.329889097



شكل (1) التمثيل الفيزيائي لمسألة البحث مثبت عليه نظام الإحداثيات

24



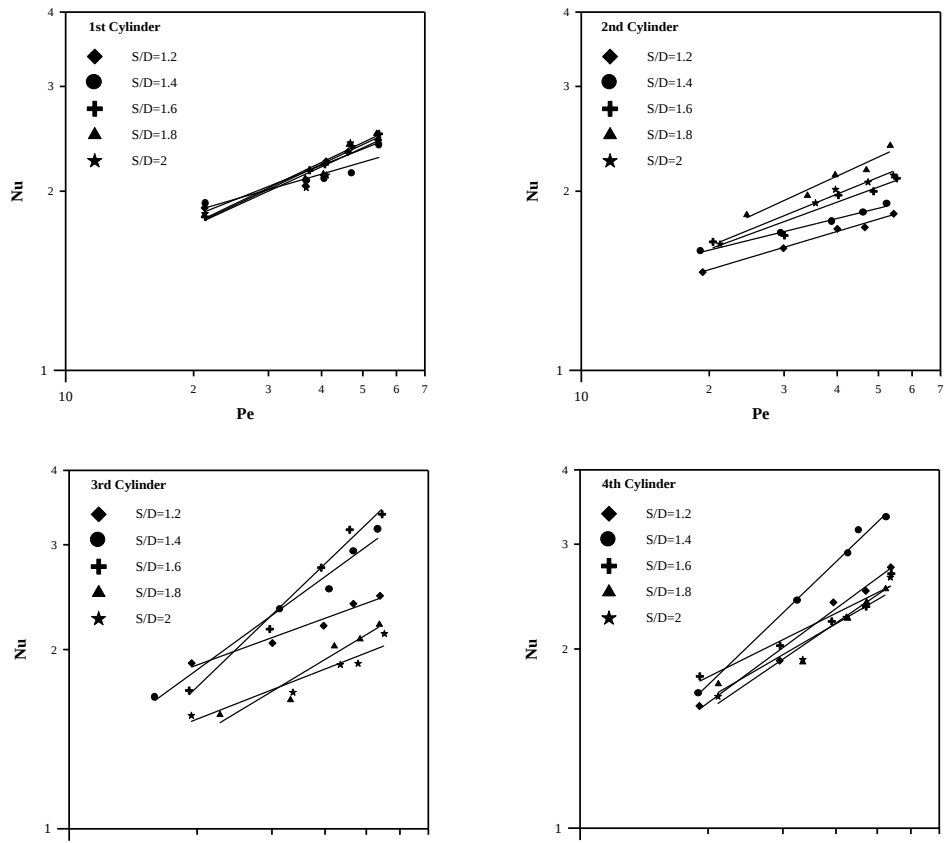
- 1- اسطوانة نحاسية. 2- انبوب زجاجي مقاوم للحرارة. 3- سداة حديدية. 4- مقاومة كهربائية. 5- رمل ناعم. 6- الجدران الجانبية لمقطع الاختبار. 7- شريحة سميكة من الفلين. 8- رمل ناعم. 9- مسمار ملولب مع الصامولة.

6	Single Cylinder	Present Work
5		

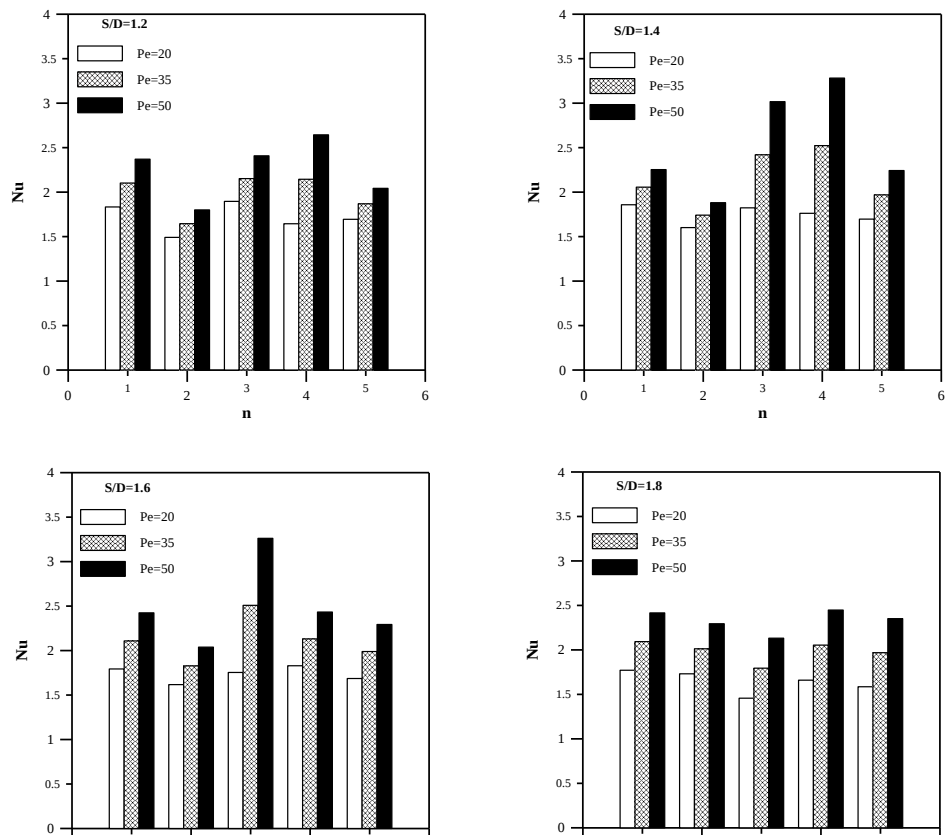
شكل (3) الرسم التخطيطي للاسطوانة المسخنة

25

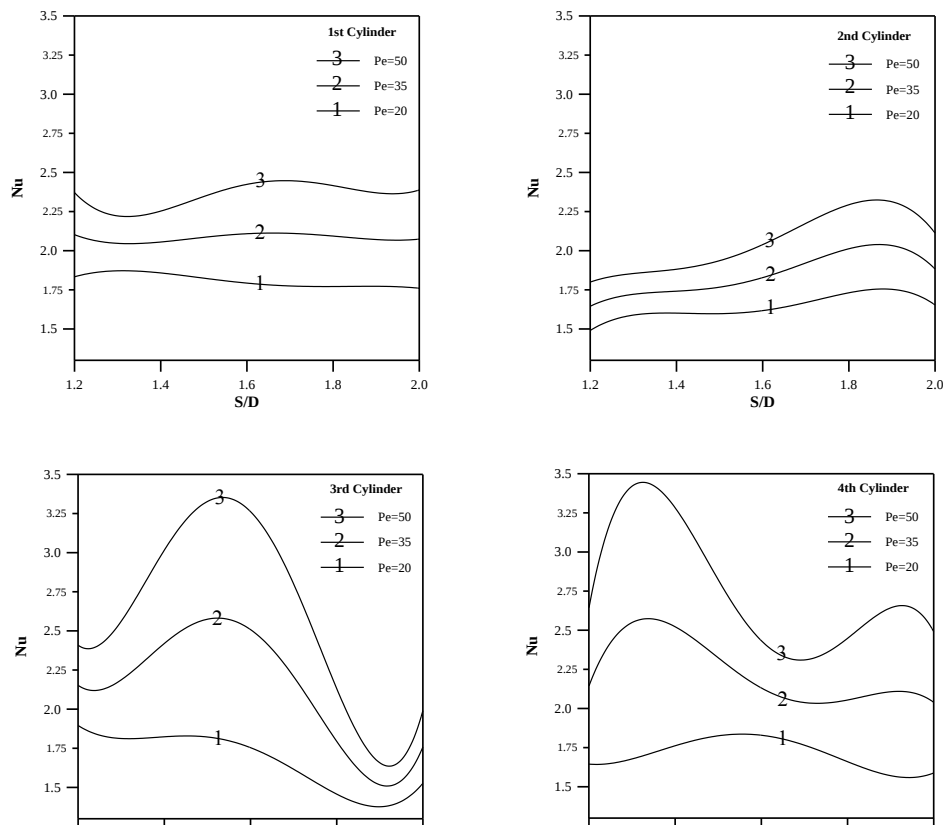
شكل (4) مقارنة النتائج العملية مع المعادلة الارتباطية لتشرشل وبيرنستين (1977) لانتقال الحرارة بالحمل القسري من اسطوانة أفقية طليقة في جريان متعامد



شكل (5) تغير عدد نسلت مع عدد بكليت لأي اسطوانة مسخنة في صف الاسطوانات المغموسة في وسط مسامي في جريان متعامد عند نسب مسافة فاصلة متغيرة

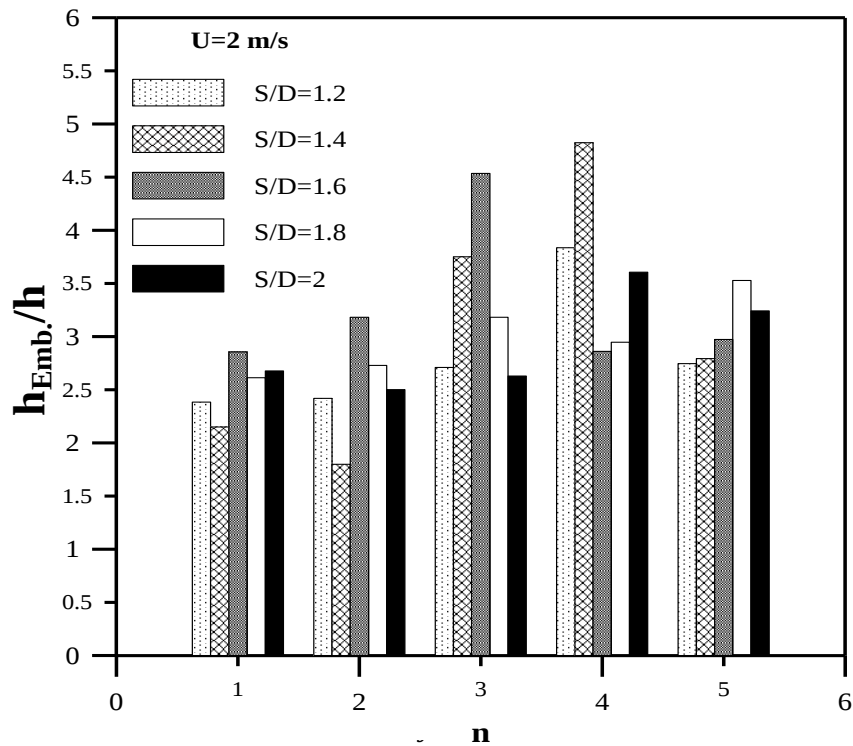


شكل (6) تغير عدد نسلت مع موقع الاسطوانة المسخنة ضمن صف الاسطوانات المغموسة في وسط مسامي في جريان متعامد عند أي نسبة مسافة فاصلة لأعداد بكميت مختلفة

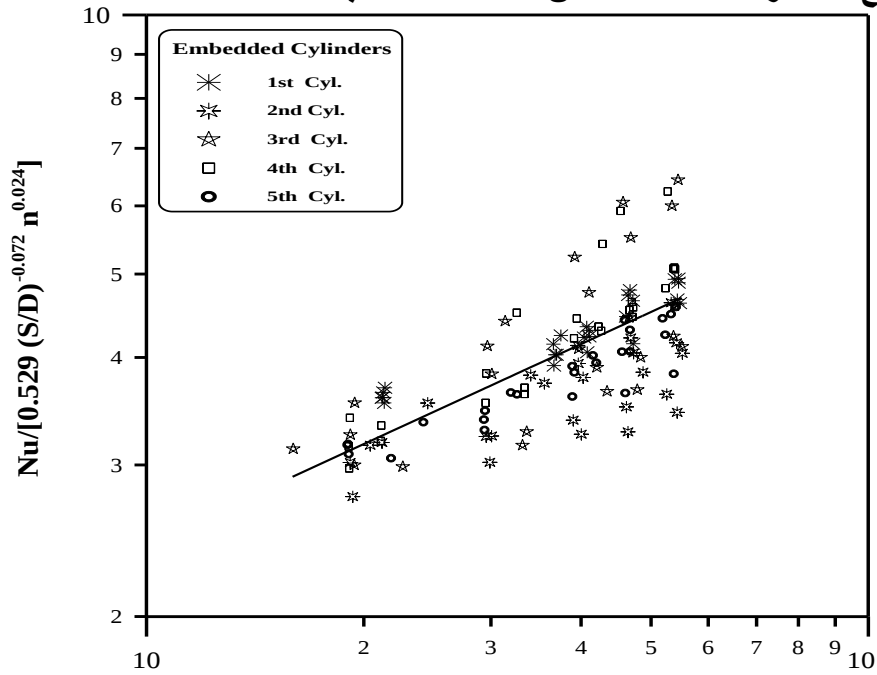


شكل (7) تغير عدد نسلت مع نسب المسافة الفاصلة بين الاسطوانات المغموسة في وسط مسامي في جريان متعامد عند أي اسطوانة مسخنة في الصف لأعداد بكليت مختلفة

28

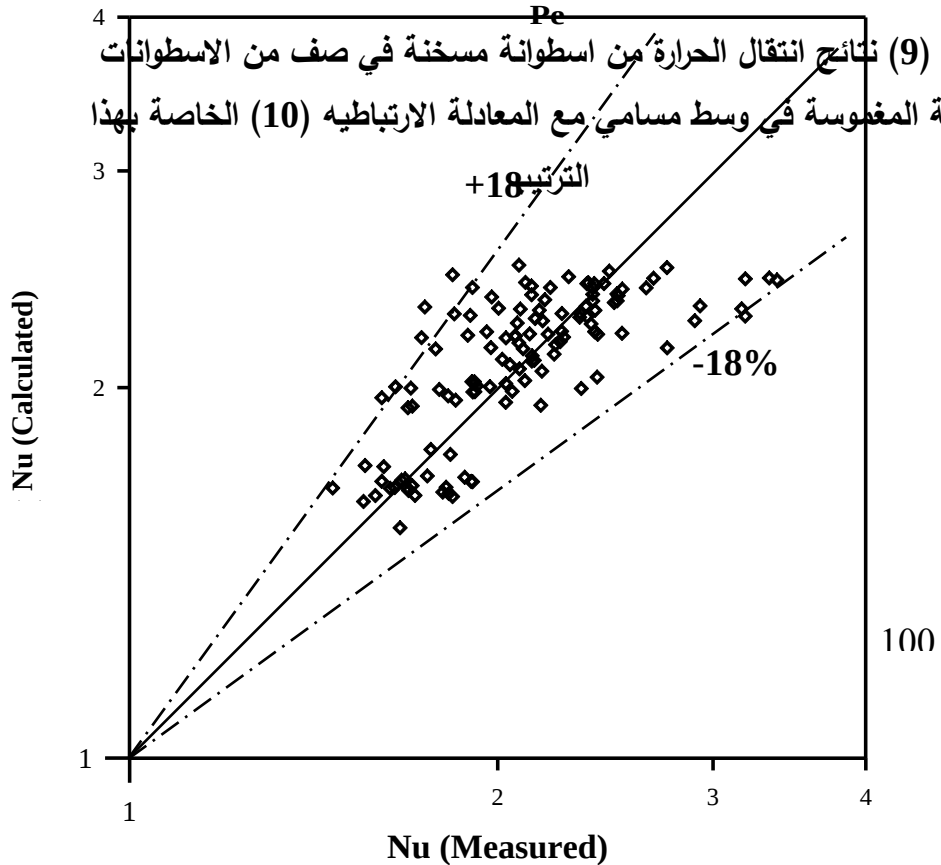


شكل (8) العلاقة بين نسبة التحسن في انتقال الحرارة وموقع الاسطوانة المسخنة ضمن الصف عند نسب مسافات فاصلة مختلفة



29

شكل (9) نتائج انتقال الحرارة من اسطوانة مسخنة في صف من الاسطوانات الأفقية المغموسة في وسط مسامي مع المعادلة الارتباطية (10) الخاصة بهذا



شكل (10) مقارنة عدد نسلت المقاس مع عدد نسلت المحسوب من المعادلة (10)

