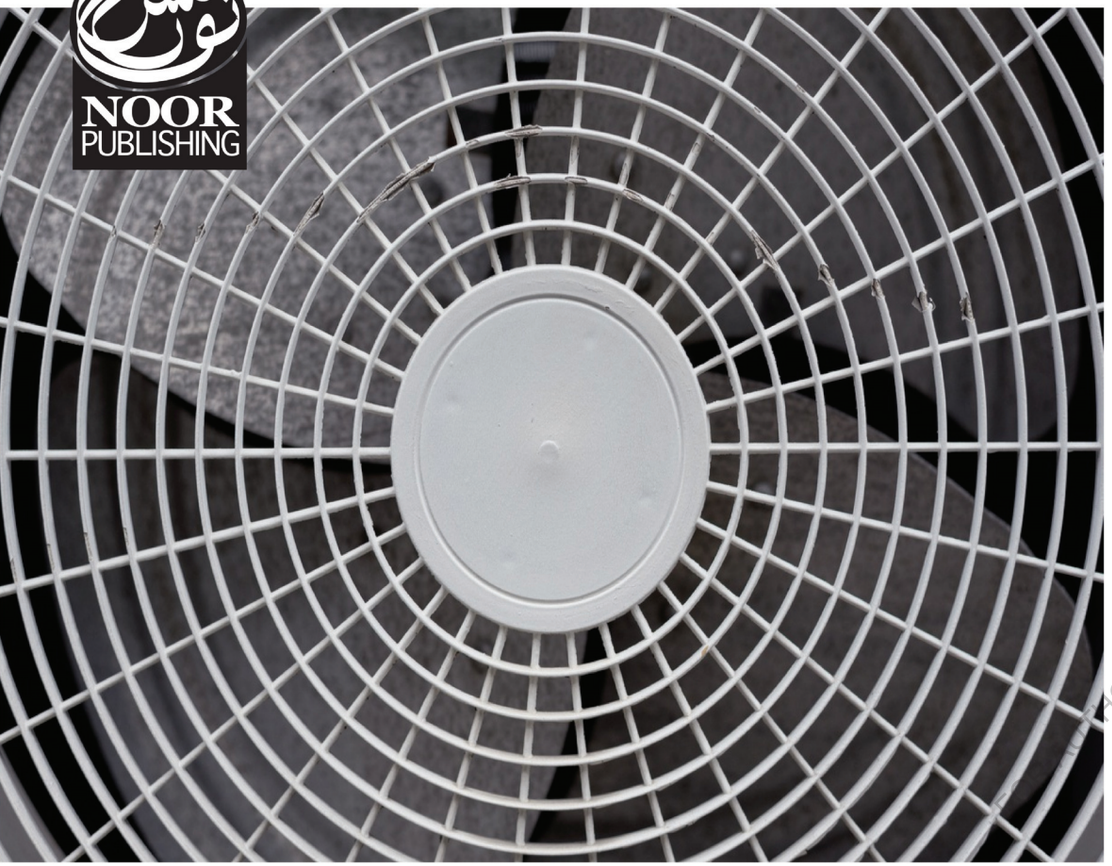


أسامة محمد المرضي سليمان خيال

كتاب مبادلات حرارية

طيف واسع من الأسئلة مع الأجابات النموذجية

NOOR PUBLISHING
نور نشر

كتاب مبادلات حرارية

خيال

FOR AUTHOR USE ONLY

كتاب مبادلات حرارية

يشتمل هذا الكتاب على مجموعة متنوعة من المسائل في المبادلات الحرارية لطلاب قسم الهندسة الميكانيكية وهندسة التصنيع في مستوي الدبلوم، البكلاريوس وطلاب الدراسات العليا.
يتضمَّن هذا الكتاب ثلاث فصول، حيث يتناول الفصل الاول كيفية أشتقاق معادلات فاعلية المبادل الحراري ، وفي نهاية هذا الفصل هنالك العديد من المسائل غير المحلولة والتي يرجي حلها بعد فهم وهضم الفصل الثاني.
أما الفصل الثاني فيشتمل علي بعض التعريفات الأساسية لمصطلحات المبادلات الحرارية وكيفية حسابها. على سبيل المثال متوسطا فرق درجة الحرارة الحسابي واللوغاريثمي، فاعلية المبادلات الحرارية متوازية ومتعاكسة السريان، أطوال وأقطار ومساحة سطح المبادل الحراري، معدَّل سريان كتل الموائع الباردة والساخنة، تفاوت درجات الحرارة بين مدخل ومخرج المبادل الحراري، مقارنة بين المبادل الحراري متوازي السريان ومتعاكس السريان من وجهة نظر مساحة السطح ومتوسط فرق درجة الحرارة اللوغاريثمي ، المقاومات الحرارية وعوامل الإتساخ، درجات حرارة الموائع الباردة والساخنة عند مدخل ومخرج المبادل الحراري.
أما الفصل الثالث فيتضمن ملخصا يشتمل على أهم القوانين والصيَغ الرياضية المستخدمة في المبادلات الحرارية.
إنَّ الكاتب يأمل أن يساهم هذا الكتاب في إثراء المكتبة الجامعية ويأمل من القارئ ضرورة إرسال تغذية راجعة إن كانت هنالك ثمَّة أخطاء حتى يستطيع الكاتب تصويبها.

دكتور مهندس أسامة محمد المرضي سليمان خيال وُلِدَ بمدينة عطبرة بالسودان في العام 1966م. حاز على درجة البكالوريوس في الهندسة الميكانيكية من جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا – الخرطوم في العام 1998م ، كما حاز على درجة الماجستير في تخصص ميكانيكا المواد من جامعة وادي النيل – عطبرة في العام 2003م ودرجة الدكتوراه من جامعة وادي النيل في العام 2017م.

NOOR PUBLISHING

978-620-0-77806-2

أسامة محمد المرضي سليمان خيال

كتاب مبادلات حرارية

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

أسامة محمد المرضي سليمان خيال

كتاب مبادلات حرارية

طيف واسع من الأسئلة مع الأجابات النموذجية

FOR AUTHOR USE ONLY

Noor Publishing

Imprint
Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: www.ingimage.com

Publisher:
Noor Publishing
is a trademark of
International Book Market Service Ltd., member of OmniScriptum Publishing Group
17 Meldrum Street, Beau Bassin 71504, Mauritius
Printed at: see last page
ISBN: 978-620-0-77806-2

Copyright © أسامة محمد المرضي سليمان خيال
Copyright © 2020 International Book Market Service Ltd., member of OmniScriptum Publishing Group

FOR AUTHOR USE ONLY

كتاب مبادلات حرارية

HEAT EXCHANGERS

طيف واسع من الأسئلة مع الأجابات النموذجية

FOR AUTHOR USE ONLY

تأليف

دكتور أسامة محمد المرضي سليمان خيال

أستاذ مشارك ، كلية الهندسة والتقنية

جامعة وادي النيل ، عطبرة ، السودان

أبريل 2020م

شكر وعرفان

(ACKNOWLEDGEMENTS)

بحمد الله و توفيقه فقد اكملت كتاب تصميم العناصر في الهندسة الميكانيكية. لقد تم تأليف هذا الكتاب اثناء فترة الحجر الصحي الذي فرضته السلطات الصحية في جميع عموم دولة السودان بسبب الأنتشار الوبائي العالمي لفيروس كورونا المستجد(Pandemic Corona Virus) أو (COVID - 19). من خلال هذا المنبر المعرفي أسأل الله العلي القدير أن يديم علي البشرية جمعاء نعمة الصحة والعافية.

الشكر والعرفان لله والتبريكات والصلوات على رسوله وخادمه محمد وعلى آله وصحابته وجميع من تبعه وتَقفّى أثره إلى يوم القيامة.

يود الكاتب ان يتقدم بالشكر أجذله لكل من ساهم بجهده وفكره ووقته في إخراج هذا الكتاب بالصورة المطلوبة ، ويخُص بذلك الزملاء/ الأساتذة بقسم الهندسة الميكانيكية بجامعة وادي النيل، عطبرة ، وأيضاً الإخوة/ الأساتذة بقسم الهندسة الميكانيكية بجامعة البحر الأحمر ، بورتسودان.

الشكر والتقدير والعرفان للبروفيسور/ **محمود يس عثمان** الذي ساهم بقدر كبير في مراجعة وإعادة مراجعة محتويات الكتاب.

اهدي هذا الكتاب بصفة أساسية لطلاب دبلوم وبكالوريوس الهندسة في جميع التخصصات خاصة طلاب قسم الهندسة الميكانيكية ، حيث يستعرض هذا الكتاب الكثير من التطبيقات في مجال الهندسة الميكانيكية وبالأخص في مجال تكنولوجيا المبادلات الحرارية.

وأُعبر عن شُكري وامتناني إلى المهندس/ **أسامة محمود محمد علي** بمركز دانية لخدمات الحاسوب والطباعة بمدينة عطبرة، الذي أنفق العديد من الساعات في طباعة ، مراجعة وتعديل

FOR AUTHOR USE ONLY

وإعادة طباعة هذا الكتاب أكثر من مرة. والشكر موصول أيضاً للمهندس/ **عوض علي بكري** بكلية الهندسة والتقنية – عطبرة ، جامعة وادي النيل الذي شارك في تنسيق هذا العمل.

أخيراً ، أرجو من الله سبحانه وتعالي أن يتقبل هذا العمل المتواضع والذي آمل أن يكون ذا فائدة للقارئ.

FOR AUTHOR USE ONLY

مقدمة

(PREFACE)

إنَّ مؤلِّف هذا الكتاب وإيماناً منه بالدور العظيم والمُقدَّر للأستاذ الجامعي في إثراء حركة التأليف والتعريف والترجمة للمراجع والكتب الهندسية يأمل أن يفي هذا الكتاب بمتطلبات برامج البكالوريوس والدبلوم لطلاب الهندسة الميكانيكية ، هندسة الإنتاج او التصنيع ، الهندسة الكهربائية والهندسة المدنية حيث يُغطِّى مناهج نظرية ومختبرية في الديناميكا الحرارية وتطبيقاتها. يتفق هذا الكتاب لغوياً مع القاموس الهندسي الموحَّد السوداني ، ويُعد الكتاب مرجعاً في مجاله حيث يمكن أن يستفيد منه الطالب والمهندس والباحث. هذا الكتاب مقتبس من مُذكرات مؤلفه في تدريسه لهذا المُقرر لفترة لا تقل عن خمس وعشرون عاماً.

FOR AUTHOR USE ONLY

يهدف هذا الكتاب لتأكيد أهمية دراسة المبادلات الحرارية نظرياً ، عملياً ومُختبرياً . فقد اشتمل هذا الكتاب على صياغة بعض النماذج الرياضية في المبادلات الحرارية وتطويرها حتى الوصول إلى الصيغ النهائية المستخدمة في حل المسائل بالإضافة لإيراده بعض الأمثلة لنظم مستخدمة في التطبيقات العملية والمُختبرية مثل ، فاعلية المبادلات الحرارية متوازية ومتعاكسة السريان، مساحة سطح المبادل الحراري، معدَّل سريان كتل الموائع الباردة والساخنة، تفاوت درجات الحرارة بين مدخل ومخرج المبادل الحراري.

يشتمل هذا الكتاب على مجموعة متنوعة من المسائل في مقرر المبادلات الحرارية لفائدة طلاب قسم الهندسة الميكانيكية وهندسة التصنيع في مستوي الدبلوم، البكلاريوس وطلاب الدراسات العليا.

يتضمَّن هذا الكتاب ثلاث فصول، حيث يتناول الفصل الاول كيفية أشتقاق معادلات فاعلية المبادل الحراري ، وفي نهاية هذا الفصل هنالك العديد من المسائل غير المحلولة والتي يرجي حلها بعد فهم وهضم الفصل الثاني.

أما الفصل الثاني فيشتمل علي بعض التعريفات الأساسية لمصطلحات المبادلات الحرارية وكيفية حسابها. على سبيل المثال متوسطا فرق درجة الحرارة الحسابي واللوغاريثمي، فاعلية المبادلات الحرارية متوازية ومتعاكسة السريان، أطوال وأقطار ومساحة سطح المبادل الحراري، معدَّل سريان كتل الموائع الباردة والساخنة، تفاوت درجات الحرارة بين مدخل ومخرج المبادل الحراري، مقارنة بين المبادل الحراري متوازي السريان ومتعاكس السريان من وجهة نظر مساحة السطح ومتوسط فرق درجة الحرارة اللوغاريثمي (LMTD) ، المقاومات الحرارية وعوامل الإتساخ، درجات حرارة الموائع الباردة والساخنة عند مدخل ومخرج المبادل الحراري.

أما الفصل الثالث فيتضمن ملخصا يشتمل على أهم القوانين والصيَّغ الرياضية المستخدمة في المبادلات الحرارية.

إنَّ الكاتب يأمل أن يساهم هذا الكتاب في إثراء المكتبة الجامعية داخل السودان وخارجه في هذا المجال من المعرفة ويأمل من القارئ ضرورة إرسال تغذية راجعة إن كانت هنالك ثَمَّة أخطاء حتى يستطيع الكاتب تصويبها في الطبعة التالية للكتاب.

والله الموفق

المؤلف

أبريل 2020 م

FOR AUTHOR USE ONLY

المحتويات

(CONTENTS)

	الموضوع	الصفحة
	شكر وعرفان	i
	مقدمة	iii
	المحتويات	v
	الفصل الأول : فاعلية المبادل الحراري	
1.1	مدخل	1
1.2	مسائل	8
	الفصل الثاني : أسئلة وإجاباتها النموذجية في المبادلات الحرارية	
2.1	المسألة (1): متوسط فرق درجة الحرارة الحسابي و اللوغاريثمي	18
2.2	المسألة (2): الفاعلية لمبادل حراري متوازي السريان	19
2.3	المسألة (3): مساحة المبادل الحراري	24
2.4	المسألة (4): طول انبوب المبادل الحراري	27
2.5	المسألة (5): درجة حرارة مخرج المائع الساخن	28
2.6	المسألة (6): مساحة إنتقال الحرارة المطلوبة والفاعلية	31
2.7	المسألة (7): معدَّل إنتقال الحرارة، معدَّل سريان كتلة الماء ومساحة	33

FOR AUTHOR USE ONLY

سطح المبادل الحراري

2.8 المسألة (8): إختيار المبادل الحراري المناسب 35

2.9 المسألة (9): مبادل حراري مزدوج الأنبوب متعاكس السريان 37

2.10 المسألة (10): مساحة إنتقال الحرارة لمبادل حراري متعاكس السريان و لمبادل حراري متواز السريان 38

2.11 المسألة (11): طول الأنبوب المطلوب لمبادل حراري متعاكس السريان 40

2.12 المسألة (12): عدد الأنابيب المطلوبة لمبادل حراري متعاكس السريان 42

2.13 المسألة (13): معامل إنتقال الحرارة الإجمالي و معدَّل إنتقال الحرارة 45

2.14 المسألة (14): طول الأنبوب المطلوب 47

2.15 المسألة (15): معدَّل تكثُّف البخار، متوسط معامل إنتقال الحرارة الإجمالي مؤسساً على مساحة السطح الداخلي، عدد وحدات إنتقال الحرارة و فاعلية المكثَّف 51

2.16 المسألة (16): فاعلية المبادل الحراري، طول الأنبوب ومعدَّل تكثُّف البخار 54

2.17 المسألة (17): معدَّل سريان كتلة الماء، فاعلية المبادل الحراري و مساحة السطح المطلوبة 56

2.18 المسألة (18): درجة حرارة مخرج الماء لترتيبة سريان متعاكس وترتيبة سريان متوازي 59

FOR AUTHOR USE ONLY

2.19 المسألة (19): درجة حرارة مخرج الزيت والماء، و درجة الحرارة القصوى الممكنة لمخرج الماء 61

2.20 المسألة (20): درجات حرارة مخرج المائع الساخن ومدخل المائع البارد 64

2.21 المسألة (21): معدَّل إنتقال الحرارة الكلي 66

2.22 المسألة (22): معدَّل إنتقال الحرارة في حالة أنَّ المائعان غير مختلطان 68

2.23 المسألة (23): إشتقاق تعبير لفاعلية المبادل الحراري متعاكس السريان 70

2.24 المسألة (24): معدَّل إنتقال الحرارة و درجة حرارة مخرج المائع 70

2.25 المسألة (25): درجة حرارة مخرج الماء 72

2.26 المسألة (26): مساحة إنتقال الحرارة المطلوبة و عدد وحدات إنتقال الحرارة 74

2.27 المسألة (27): فاعلية المبادل الحراري و درجة حرارة مخرج الماء والمادة الكيميائية 76

2.28 المسألة (28): مساحة المبادل الحراري، ودرجات حرارة مخرج الموائع الساخنة والباردة إذا تمَّ مضاعفة معدَّل سريان كتلة الماء الساخن 78

2.29 المسألة (29): مبادل حراري متلاقي 82

2.30 المسألة (30): درجات حرارة المخرج 86

2.31 المسألة (31): مكثِّف بخار من نوع الغلاف والأنبوب 89

2.32 المسألة (32): نسبة مساحة مبادل حراري متعاكس السريان إلي مساحة 94

FOR AUTHOR USE ONLY

مبادل حراري متوازي السريان

2.33 المسألة (33): تبريد الهواء 98

2.34 المسألة (34): الفاعلية و مساحة السطح 101

2.35 المسألة (35): محطة قدرة غاز توربينية 103

الفصل الثالث : ملخص

ملخص 107

المراجع

الكتب والمراجع العربية 110

الكتب والمراجع الإنجليزية 110

نبذة عن المؤلف 112

FOR AUTHOR USE ONLY

الفصل الأول

فاعلية المبادل الحراري

(Heat Exchanger Effectiveness)

1.1 مدخل :(Introduction)

في حالات معينة لتصميم مبادل حراري فإنَّ كفاءة إجراء إنتقال الحرارة تُصبح هامة جداً؛ كمثال لمبادلات حرارية صغيرة الحجم (مكتنزة) (Compact)، خصيصاً في صناعة الطائرات حيث عامل الوزن يكون هاماً، هنالك أسلوباً لـ Nusselt تمَّ تطويره فيما بعد بواسطة (Kays and London) سيتم مناقشته في هذا المقطع.

الفاعلية $\in$، لمبادل حراري يتم تعريفها كنسبة الحرارة المنتقلة الفعلية إلي الحرارة المنتقلة القصوى الممكنة.

لأيَّ مبادل حراري بمعدلات سريان كتلة لموائع ساخنة وباردة $\dot{m}_H$ و $\dot{m}_C$ وحرارة نوعية c_H و c_C، إجعل تغييرات درجة الحرارة الإجمالية لكل مائع تكون Δt_H و Δt_C.

بتجاهل الفقودات للبيئة المحيطة،

$$Q = \dot{m}_H c_H \Delta t_H = \dot{m}_C c_C \Delta t_C$$

أو $$Q = C_H \Delta t_H = C_C \Delta t_C \qquad (1)$$

(حيث $C_H = \dot{m}_H c_H$ و $C_C = \dot{m}_C c_C$ هما السعات الحرارية (thermal capacities) للموائع الساخنة والباردة).

FOR AUTHOR USE ONLY

من المعادلة (1) يمكن ملاحظة أنَّ المائع بالسعة الحرارية الأصغر، C، له تغير درجة حرارة أكبر، Δt. تغير درجة الحرارة الأقصى الممكن لأحد الموائع يكون $\left(t_{H_{\max}} - t_{c_{\min}}\right)$، وهذا التغير المثالي في درجة الحرارة يمكن فقط الوصول إليه بمائع ذو سعة حرارية منخفضة.

$$i.e.\ \text{الفاعلية}\ (effectiveness), \epsilon = \frac{Q}{C_{min}\left(t_{H_{max}} - t_{C_{min}}\right)} = \frac{\text{الحرارة المنتقلة الفعلية}}{\text{الحرارة المنتقلة القصوى الممكنة}} \qquad (2)$$

الهدف من تصميم جيّد لمبادل حراري هو الحصول على تغير أقصي ممكن لدرجة حرارة مائع لقوة إدارة معطاة، ذلك يكون لفرق درجة حرارة متوسط لوغاريثمي، LMTD. بالتالي هنالك مقياس مفيد لكفاءة المبادل الحراري هو عدد وحدات إنتقال الحرارة، NTU، الذي يتم تعريفه كـ:-

$$NTU = \frac{(\Delta t)_{max}\ \text{تغير درجة الحرارة الأقصى لاحد الموائع}}{LMTD}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

الآن،

$$Q = UA\ \ LMTD = C_{\min}\left(\Delta t\right)_{\max}$$

$$\therefore NTU = \frac{\left(\Delta t\right)_{\max}}{LMTD} = \frac{UA}{C_{\min}} \qquad (3)$$

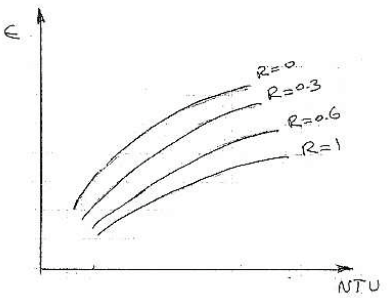
كلما زاد عدد وحدات إنتقال الحرارة كلما زادت فاعلية المبادل الحراري.

نسبة السعة الحرارية الدنيا إلي القصوى عادة ما تُعطي بالرمز R،

$$\text{i.e. capacity ratio}\ ،\ R = C_{\min}/C_{\max} \qquad (4)$$

لاحظ أنَّ R يمكن أن تتغير بين 1 (عندما يملك كلا المائعان نفس السعة الحرارية) و 0 (عندما يملك أحد الموائع سعة حرارية غير محدودة (infinite thermal capacity) e.g. بخار متكثِّف أو سائل مغلي).

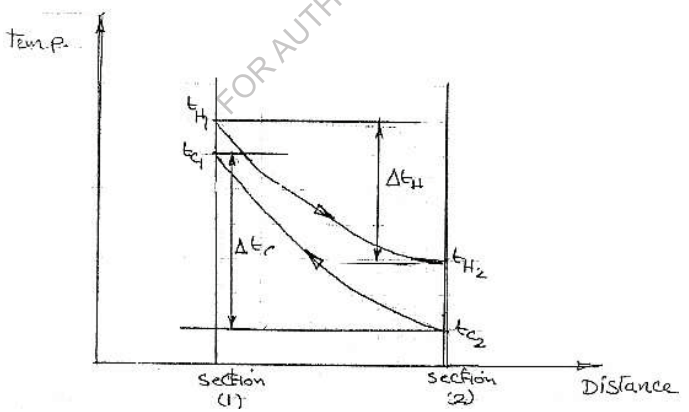
الشكل رقم (1.1) أدناه يُوضِّح مثالاً نموذجياً لمخطط فاعلية، ∈، ضد NTU لقيَّم متباينة لنسبة سعة حرارية، R.



شكل (1.1) مخطط الفاعلية ضد عدد وحدات إنتقال الحرارة

إعتبر مبادل حراري مضاد للسريان (counter flow H. Exchanger) كما موضَّح في الشكل (1.2) أدناه.

FOR AUTHOR USE ONLY



شكل (1.2) مبادل حراري مضاد للسريان

من الشكل يمكن ملاحظة أنَّ، $C_c = C_{min}$ بما أنَّ $\Delta t_C > \Delta t_H$

i.e. $R = C_{\min} / C_{\max}$

$$= C_C / C_H$$

أو مستخدماً المعادلة (1)،

$$\frac{C_C}{C_H} = \frac{\Delta t_H}{\Delta t_C}$$

$$R = \frac{t_{H_1} - t_{H_2}}{t_{C_1} - t_{C_2}} \qquad (5)$$

من المعادلة (2)،

$$\in = \frac{Q}{C_{\min}\left(t_{H_{\max}} - t_{C_{\min}}\right)} = \frac{C_{\min}\left(t_{C_1} - t_{C_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{H_1} - t_{C_2}\right)} = \frac{t_{C_1} - t_{C_2}}{t_{H_1} - t_{C_2}} \qquad (6)$$

من المعادلة (3)،

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{t_{C_1} - t_{C_2}}{LMTD}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

من المعادلة،

$$LMTD = \frac{\left(t_{H_1} - t_{C_1}\right) - \left(t_{H_2} - t_{C_2}\right)}{\log_e \dfrac{\left(t_{H_1} - t_{C_1}\right)}{\left(t_{H_2} - t_{C_2}\right)}}$$

$$\therefore NTU = \frac{\left(t_{C_1} - t_{C_2}\right)}{\left(t_{H_1} - t_{C_1}\right) - \left(t_{H_2} - t_{C_2}\right)} \log_e \frac{\left(t_{H_1} - t_{C_1}\right)}{\left(t_{H_2} - t_{C_2}\right)}$$

أو $$NTU \times \frac{\left(t_{H_1} - t_{H_2}\right) - \left(t_{C_1} - t_{C_2}\right)}{\left(t_{C_1} - t_{C_2}\right)} = \log_e \left\{ \frac{\left(t_{H_1} - t_{C_2}\right) - \left(t_{C_1} - t_{C_2}\right)}{\left(t_{H_1} - t_{C_2}\right) - \left(t_{H_1} - t_{H_2}\right)} \right\}$$

$$\therefore NTU\left(R-1\right) = \log_e \left\{ \frac{\left[\left(t_{C_1} - t_{C_2}\right) / \in\right] - \left(t_{C_1} - t_{C_2}\right)}{\left[\left(t_{C_1} - t_{C_2}\right) / \in\right] - R\left(t_{C_1} - t_{C_2}\right)} \right\}$$

مستخدماً المعادلات (5) و (6)،

$$NTU\,(R-1)=\log_e\frac{(1-\in)}{(1-R\in)}$$

$$\text{أو}\quad \in=\frac{1-e^{-NTU(1-R)}}{1-\mathrm{Re}^{-NTU(1-R)}} \qquad (7)$$

ملحوظة:-

لمبادل حراري مضاد السريان عندما $C_H = C_C$، i.e. R = 1 (قل مبادل حراري لتوربينة غازية)، بالتالي فإنَّ التعبير للفاعلية لا يمكن الحصول عليه بتعويض R=1 في المعادلة (7). لهذه الحالة فإنَّ تغيَّر درجة الحرارة لكل مائع هي نفسها، بما أنَّ $C_H = C_C$، بالتالي فإنَّ الـ LMTD يكون مساوياً لفرق درجة الحرارة بين الموائع الساخنة والباردة الذي يبقي ثابتاً في جميع أنحاء المبادل الحراري. عليه فإنَّ المعادلة يتم كتابتها كـ $NTU=(t_{C_1}-t_{C_2})/(t_{H_1}-t_{C_1})$ وبالتالي يتواكب الإشتقاق كما عاليه معطياً:-

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\in=\frac{NTU}{1+NTU} \qquad (8)$$

لمبادل حراري متوازي السريان (parallel – flow H. Exchanger) يمكن توضيح أنَّ:-

$$\in=\frac{1-e^{-NTU(1+R)}}{1+R} \qquad (9)$$

عندما R = 0، i.e. في حالة مكثِّف، يمكن الملاحظة من المعادلة (7) أو المعادلة (9) أنَّ الفعالية تكون،

$$\in=1-e^{-NTU} \qquad (10)$$

مثال (1):

مبادل حراري مضاد للسريان بممر غلاف مفرد وأنابيب يستخدم غاز النفايات على جانب الغلاف لتسخين سائل في الأنابيب. يدخل غاز النفايات عند درجة حرارة 400°C بمعدَّل سريان كتله مقداره 40kg/s. يدخل السائل عند درجة حرارة 100°C بمعدَّل سريان كتله مقداره 3kg/s. مفترضاً أنَّ سرعة السائل لا تتجاوز 1m/s. مستخدماً البيانات المذكورة أدناه، أحسب الآتي:-

i/ عدد الأنابيب المطلوبة.

ii/ فاعلية المبادل الحراري.

iii/ درجة حرارة مخرج السائل.

تجاهل عوامل الإتساخ والمقاومة الحرارية لجدار الأنبوب.

البيانات:- القطر الداخلي للأنبوب = 10mm؛ القطر الخارجي للأنبوب = 27mm؛ طول الأنبوب = 4m؛ الحرارة النوعية لغاز النفايات = 1.04kj/kgK؛ الحرارة النوعية للسائل = 1.5kj/kgK؛ كثافة السائل = $500kg/m^3$؛ معامل إنتقال الحرارة على جانب الغلاف = $260W/m^2K$؛ معامل إنتقال الحرارة على جانب الأنبوب = $580W/m^2K$.

FOR AUTHOR USE ONLY

الحل:-

i/ معدَّل السريان الحجمي للسائل، Q

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{3}{500} = \underline{0.006}\ m^3/s$$

مساحة المقطع العرضي الكلية لسرعة 1 m/s،

$$A = \frac{Q}{v} = 0.006\, m^2$$

$$\text{عدد الأنابيب} = \frac{\text{مساحة المقطع العرضي الكلية}}{\text{مساحة المقطع لأنبوب واحد}}$$

$$n = \frac{0.006 \times 4}{\pi \times 0.01^2} = \underline{76.39} \approx \underline{\underline{77}}$$

(ملحوظة تكون السرعة في الأنابيب أقلّ من 1m/s كما هو مطلوب).

ii/ من المعادلة التالية، بأخذ فرق المساحة في الإعتبار،

$$\frac{1}{UA_o} = \frac{1}{h_o A_o} + \frac{1}{h_i A_i}$$

(حيث الرموز التحتية (subscript) 0 و i ترجع إلي خارج وداخل الأنبوب).

معامل إنتقال الحرارة الإجمالي، U، يُرجع إلي المساحة الخارجية الذي هو الأسلوب العملي المعتاد في تصميم المبادلات الحرارية،

FOR AUTHOR USE ONLY

i.e. $$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_0} + \frac{A_0}{h_i A_i} = \frac{1}{260} + \frac{12.7}{580 \times 10} = \underline{0.00604}$$

(بما أنَّ $A_0 / A_i = D_0 / D_i$)

i.e. $$U = \underline{165.68} W / m^2 K$$

بالتالي من المعادلة (3)،

$$NTU = \frac{165.68 \times \pi \times 0.0127 \times 4 \times 77}{3 \times 1.5 \times 1000} = \underline{0.452}$$

أيضاً،

$$R = \frac{3 \times 1.5}{40 \times 1.04} = \underline{0.1082}$$

بالتالي، من المعادلة (7)،

$$\in = \frac{1 - e^{-NTU(1-R)}}{1 - \mathrm{Re}^{-NTU(1-R)}} = \frac{1 - e^{-0.452 \times 0.8918}}{1 - 0.1082 e^{-0.452 \times 0.8918}}$$

$$\text{i.e.} \qquad \in = \underline{\underline{0.358}}$$

iii/ من المعادلة (6) ،

$$\in = 0.358 = \frac{t_{L_2} - 100}{400 - 100}$$

(حيث t_{C1} هي درجة حرارة مخرج السائل).

$$\therefore t_{C1} = 300 \times 0.358 + 100 = \underline{\underline{207.4}}\ ^{\circ}C$$

FOR AUTHOR USE ONLY

1.2 مسائل :(Problems)

1/ في مبرِّد هواء يتم نفخ الهواء عبر مجموعة أنابيب بمعدَّل 240kg/h وبسرعة 24m/s، يدخل الهواء عند 97°C ويغادر عند 27°C. يدخل ماء التبريد الأنابيب عند 10°C ويغادر عند 20°C، بسرعة متوسطة مقدارها 0.6m/s. يكون قطر الأنابيب 6mm ويتم تجاهل سمك الجدار. معامل إنتقال الحرارة من الهواء إلي الأنابيب يمكن حسابه من $\mathrm{Nu} = 0.33(\mathrm{Re})^{0.6} \times (\mathrm{Pr})^{0.33}$ بأخذ الخواص عند متوسط درجة حرارة معظم المائع.

معامل إنتقال الحرارة من الماء إلي الأنابيب يُعطي بـ،

$$St = \frac{f/2}{1 + (\mathrm{Pr})^{-1/6} (\mathrm{Re})^{-1/8} (\mathrm{Pr} - 1)}$$

حيث $f = 0.0791(Re)^{-1/4}$ ويتم أخذ الخواص عند متوسط درجة حرارة معظم المائع. مفترضاً أنَّ الأنابيب يتم ترتيبها في 6 ممرات، وأنَّ متوسط فرق درجة الحرارة اللوغاريثمي لسريان مضاد يمكن إستخدامه، أحسب عدد الأنابيب المطلوبة في كلِ ممر وطول الأنبوب الضروري.

(Ans. 7 ؛ 0.528m)

8/ هواء عند درجة حرارة مقدراها 15°C يتم نفخه عبر لوحة مستوية بسرعة متوسطة مقدراها 6 m/s. أحسب الحرارة المنتقلة لكل m عرض من كلا جانبي اللوحة لـ 150mm الأولي من طول اللوحة، عندما تكون درجة حرارة السطح 550°C. لإنتقال حرارة من لوحة مستوية بفرق درجة كبير بين اللوحة والمائع، خذ

$$Nu = 0.332(\mathrm{Pr})^{1/3} \times (\mathrm{Re})^{1/2}\left(\frac{T_w}{T_S}\right)^{0.117}$$

(حيث جميع الخواص تكون عند متوسط درجة حرارة الشريحة، و T_w و T_S هما درجتي الحرارة المطلقة للوحة وللسريان الحر للهواء على الترتيب). تجاهل الإشعاع.

FOR AUTHOR USE ONLY

(Ans. 4.39kW)

9/ مبادل حراري بغلاف ذو ممرين وأنابيب يتم استخدامه لتكثيف مركب كيميائي على جانبي الغلاف بسرعة 50kg/s عند درجة حرارة تشبع مقدارها 80°C. يدخل المركَّب الكيميائي كبخار جاف مشبَّع و لا يتم تبريده ناقصاً أثناء الإجراء. يكون هنالك ماء عند درجة حرارة 10°C ومعدَّل سريان كتلي مقداره 100kg/s يكون متاحاً كمبرِّد؛ تكون سرعة الماء تقريباً 1.5m/s. مستخدماً البيانات أدناه وبأخذ قطر أنبوب إسمي مقداره 25mm، متجاهلاً سمك جدار الأنبوب، حدِّد:-

i/ عدد الأنابيب المطلوبة.

ii/ طول الأنابيب.

iii/ عدد وحدات إنتقال الحرارة.

iv/ فاعلية المبادل الحراري.

البيانات:- الحرارة الكامنة للتبخر للمركب الكيميائي = 417.8kj/kg؛ معامل إنتقال الحرارة لجانب الغلاف = $10kW/m^2K$؛ عامل الإتساخ لجانب الغلاف = $0.1m^2K/kw$؛ وعامل الإتساخ لجانب الأنبوب = $0.2m^2K/kw$.

لسريان مضطرب في ماسورة،

$$Nu = 0.023Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

(بالخواص عند متوسط درجة حرارة معظم المائع).

(Ans. 472; 10.61 m; 0.981; 62.5%)

10/ 500kg/h من زيت عند درجة حرارة 120°C يتم تبريدها في حلقة لمبادل حراري مضاد السريان مزدوج الماسورة بماء يدخل الماسورة الداخلية عند10°C. الماسورة الداخلية لها قطر داخلي مقداره 25mm وسمك جدار مقداره 2mm، والقطر الداخلي للماسورة الخارجية هو 50mm؛ يكون الطول الفعَّال مقداره 12m.

مستخدماً البيانات أدناه أحسب درجة حرارة مخرج الزيت.

بيانات:- الزيت: خذ Nu = 30، مؤسساً على القطر المكافئ، d_e، المعطي بـ

$$d_e = \frac{4 \times (\text{مساحة السريان})}{\text{مساحة انتقال الحرارة لكل وحدة طول}}$$؛

FOR AUTHOR USE ONLY

الحرارة النوعية = 2.31kj/kgK؛ الموصلية الحرارية = 0.135W/mK ؛عامل الإتساخ = $0.001m^2K/W$.

الماء: إفترض أنَّ تناظر رينولدز البسيط يكون صحيحاً (أي يمكن إستخدامه)، بأخذ السرعة كـ 1m/s وعامل الإحتكاك f، كـ 0.002؛ الحرارة النوعية = 4.18kj/kgK؛ الكثافة = $1000kg/m^3$؛ عامل الإتساخ = $0.0002m^2K/W$. تجاهل المقاومة الحرارية لجدار الماسورة.

(Ans. 93.8°C)

11/ مكثِّف يحوي أربع ممرات أنابيب طولها 3m، قطرها الداخلي 25mm، وكل ممر يحوي 100 أنبوبة. يدخل ماء التبريد الأنابيب عند درجة حرارة 20°C بمعدَّل 80kg/s عندما يكون بخار جانب الغلاف عند درجة حرارة 50°C. قبل التنظيف يكون عامل الإتساخ على جانب الماء $0.0005m^2K/W$؛ يمكن أخذ السطح الخارجي للأنابيب نظيفاً. متجاهلاً المقاومة الحرارية لشريحة المائع على السطح الخارجي للأنابيب والمقاومة الحرارية لجدار الأنبوب، أحسب مستخدماً البيانات أدناه:-

i/ فاعلية المبادل الحراري.

ii/ معدَّل التكثُّف.

iii/ عامل الإتساخ المطلوب على جانب الماء إذا تمت زيادة الفاعلية إلي 0.7 لنفس معدَّل سريان الكتلة للماء.

لإنتقال حرارة في الأنابيب:- $Nu = 0.023\ Re^{0.8}\ Pr^{1/3}$

FOR AUTHOR USE ONLY

بيانات:- الحرارة الكامنة للتبخُر لمائع جانب الغلاف = 300kj/kg؛ الخواص المتوسطة للماء لمدى درجة الحرارة الذي يتم إعتباره:-

الكثافة = $1000kg/m^3$؛ الحرارة النوعية = 4.19kj/kgK؛ الموصلية الحرارية = 0.6W/mK؛ اللزوجة = 0.9×10^{-3} kg/ms.

(Ans. 0.337 ؛11.3kg/s ؛$0.000049m^2K/W$)

12/ في دورة محطة توربينة غاز مغلقة يدخل هواء من الضاغط أحد جانبي مبادل حراري صغير الحجم (مكتنز) (compact) عند 150°C بمعدَّل سريان كتلة مقداره 10kg/s. يدخل الهواء المغادر للتوربينة المبادل الحراري عند درجة حرارة 504°C وينساب بسريان مضاد للهواء. للمبادل الحراري مساحة سريان مقدارها $0.144m^2$ ومساحة إنتقال حرارة فعّالة مقدارها $115.2m^2$ لكل وحدة طول في إتجاه السريان على كلا جانبي المبادل الحراري الساخن والبارد. أحسب الطول المطلوب للمبادل الحراري للحصول على فاعلية مقدارها 0.7. إفترض سطوح مبادل حراري نظيفة وتجاهل المقاومة الحرارية لألواح التقسيم (separating plates). لسريان هواء في ممرات المبادل الحراري، إفترض،

$Nu = 0.023\ Re^{0.8}\ Pr^{0.3}$ مؤسسة على قطر مكافئ معطي بـ

$$\frac{4\times(\text{مساحة السريان})}{\text{مساحة السطح الساخن لكل وحدة طول}}$$

خذ الخواص عند متوسط درجة الحرارة بين مدخل الهواء البارد ومدخل الهواء الساخن.

(Ans. 1.257m)

FOR AUTHOR USE ONLY

13/ مبرِّد زيت يتكون من مبادل حراري بغلاف وأنابيب متعاكس السريان بممر مفرد و بـ 300 أنبوب بقطر داخلي 7.3mm وطول 8m. الزيت المنساب في جانب الأنابيب يدخل بمعدَّل سريان كتلة 12kg/s عند 15°C. مستخدماً البيانات أدناه، أحسب:-

i/ عدد وحدات إنتقال الحرارة؛

ii/ فاعلية المبادل الحراري؛

iii/ درجة حرارة مخرج الزيت.

بيانات:- معامل درجة الحرارة لجانب الغلاف = $1000W/m^2K$

معامل درجة الحرارة لجانب الأنابيب يتم إعطاؤه بالمعادلة التالية:-

$Nu=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$؛ بالخواص كالآتي: - الحرارة النوعية للزيت تساوي 3.42kj/kgK؛ كثافة الزيت تساوي $900kg/m^3$؛ اللزوجة الديناميكية للزيت μ تعادل 1.5×10^{-3} kg/ms، الموصلية الحرارية للزيت k تكافئ 0.15W/mK.

FOR AUTHOR USE ONLY

(Ans. 1.1 ; 58.3% ، 37.7°C)

14/ يتم إستخدام مبادل حراري متعاكس السريان لتبريد 0.55kg/s (c_p = 2.45kj/kg°C) من الزيت من 115°C إلي 40°C بإستخدام الماء. درجات حرارة مدخل ومخرج ماء التبريد هما 15°Cو 75°C على الترتيب. يتوقع أن يكون معامل إنتقال الحرارة الإجمالي مكافئاً لـ $1450W/m^2°C$. مستخدماً أسلوب عدد وحدات إنتقال الحرارة (NTU)، أحسب الآتي:-

i/ معدَّل سريان كتلة الماء.

ii/ فاعلية المبادل الحراري.

iii/ مساحة السطح المطلوبة.

$(0.4kg/s\ ;\ 0.75\ ;\ 2.197m^2)$

15/ زيت (c_p=3.6kj/kg°C) عند 100°C يسري بمعدَّل 30،000kg/h ويدخل إلي مبادل حراري متوازي السريان. ماء التبريد(c_p=4.2kj/kg°C) يدخل المبادل الحراري عند 10°C بمعدَّل 50،000kg/h. مساحة إنتقال الحرارة هي $10m^2$، ومعامل إنتقال الحرارة U يساوى $1000W/m^2°C$

أحسب الآتي:-

i/ درجات حرارة مخرج الزيت والماء.

ii/ درجة الحرارة القصوى الممكنة لمخرج الماء.

(Ans. $t_{h_2} = 76.6°C$; $t_{C_2} = 22°C$ ، $t_{C_{2_{max}}} = 40.5°C$)

16/ بخار عند ضغط جوى يدخل غلاف مكثِّف سطحي يسرى فيه ماء خلال مجموعة من أنابيب بقطر 25mm وبمعدَّل 0.05kg/s. درجات الحرارة لمدخل ومخرج الماء هما 15°C و 70°C، على الترتيب. يحدث التكثُّف على السطح الخارجي للأنابيب. إذا كان معامل إنتقال الحرارة الإجمالي هو $230W/m^2°C$، أحسب الآتي مستخدماً أسلوب عدد وحدات إنتقال الحرارة:-

i/ فاعلية المبادل الحراري.

ii/ طول الأنبوب.

iii/ معدَّل تكثُّف البخار.

FOR AUTHOR USE ONLY

خذ الحرارة الكامنة للتبخُّر عند 100°C تكافئ 2257kj/kg.

(Ans. 0.674; 12m; 0.00509 kg/s or 18.32kg/h)

17/ في مبادل حراري ذو غلاف وأنابيب متعاكس السريان ينساب ماء خلال أنبوب نحاسي بقطر داخلي 20mm وقطر خارجي 23mm، بينما ينساب زيت خلال الغلاف. يدخل الماء عند 20°C ويغادر عند 30°C، بينما يدخل الزيت عند 75°C ويغادر عند 60°C. معاملات إنتقال الحرارة للماء والزيت هما 4500W/m^2°C و 1250W/m^2°C على الترتيب. الموصلية الحرارية لجدار الأنبوب هي 355W/m°C. عوامل الإتساخ على جانبي الماء والزيت يمكن أخذهما كـ 0.0004 و 0.001 على الترتيب. إذا كان طول الأنبوب هو 2.4m، أحسب الآتي:-

i/ معامل إنتقال الحرارة الإجمالي.

ii/ معدَّل إنتقال الحرارة.

FOR AUTHOR USE ONLY

Ans. (396.8W/m^2°C; 2920.78W)

18/ مبادل حراري متعاكس السريان، يمر من خلاله هواء بمعدَّل 12.5kg/s ليتم تبريده من 540°C إلي 146°C. يحتوي المبادل الحراري على 4200 أنبوبة، قطر كل منها 30mm. درجات حرارة مدخل ومخرج ماء التبريد هما 25°C و 75°C على الترتيب. إذا تمَّ تجاهل مقاومة السريان على جانب الماء، أحسب طول الأنبوب المطلوب لهذه الخدمة.

لسريان مضطرب داخل أنابيب:- $Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$

خواص الهواء عند متوسط درجة الحرارة تكون كما يلي:-

$\mu = 2.075\times10^{-5}\,kg/ms$ ؛ c_p=1.0082kj/kg°C ؛ $\rho = 1.009\,kg/m^3$)؛

$(k = 3.003\times10^{-2}\,W/m°C$

Ans. (L = 2.31m)

19/ مبادل حراري متعاكس السريان مزدوج الأنبوب يستخدم بخار محمَّص يتم إستخدامه لتسخين ماء بمعدل 10،500kg/h. يدخل البخار إلي المبادل الحراري عند 180°C ويغادر عند 130°C. درجات حرارة مدخل ومخرج الماء هي 30°C و 80°C على الترتيب. إذا كان معامل إنتقال الحرارة الإجمالي من البخار إلى الماء هو 814W/m^2°C، أحسب مساحة إنتقال الحرارة. كم ستكون الزيادة المئوية في المساحة إذا كان السريان متوازياً؟

Ans. (7.5m^2; 9.87%)

20/ وضَّح أنَّه لمبادل حراري مزدوج الأنبوب متعاكس السريان إذا كان $\dot{m}_h c_h = \dot{m}_c c_c$ ، فإنَّ خطوط درجة الحرارة للمائعين على إمتداد طول المبادل الحراري هما خطوط مستقيمة متوازية.

21/ مبرِّد زيت لنظام تزليق يقوم بتبريد 1000kg/h من الزيت (C = 2.09kj/kg°C) من 80°C إلي 40°C بإستخدام ماء تبريد بسريان مقداره 1000kg/h عند 30°C. فاضل فيما بين إستخدام مبادل حراري متوازي السريان أو متعاكس السريان مع ذكر الأسباب. أحسب مساحة سطح المبادل الحراري، إذا كان معامل إنتقال الحرارة الإجمالي هو 24W/m^2°C. خذ c للماء = 4.18kj/kg°C.

Ans. (سريان متعاكس ; 53.16m^2)

22/ مائع ساخن عند 200°C يدخل مبادل حراري بمعدَّل سريان كتلة مقداره 10^{4}kg/h، حرارته النوعية 2000J/kgK، يتم تبريده بواسطة مائع آخر يدخل عند درجة حرارة 25°C بمعدَّل سريان

FOR AUTHOR USE ONLY

كتلة 2500kg/h وحرارة نوعية 400J/kgK. معامل إنتقال الحرارة الإجمالي المؤسس على مساحة خارجية بمقدار $20m^2$ هو $250W/m^2K$. أوجد درجة حرارة محرج المائع الساخن عندما يكون المائعان في سريان متوازي.

23/ البيانات التالية تتعلق بمبادل حراري متوازي السريان يتم فيه تسخين هواء بغازات عادم:-

الحرارة المنتقلة في الساعة 155450kj

معامل إنتقال الحرارة الداخلي $120W/m^2°C$

معامل إنتقال الحرارة الخارجي $195W/m^2°C$

درجات حرارة مدخل ومخرج المائع الساخن 450°C و 250°C على الترتيب.

درجات حرارة مدخل ومخرج المائع البارد 60°C و 120°C على الترتيب.

الأقطار الداخلية والخارجية للأنبوب هما 50mm و 60mm على الترتيب.

أحسب طول الأنبوب المطلوب لحدوث إنتقال الحرارة الضروري. تجاهل مقاومة الأنبوب.

FOR AUTHOR USE ONLY

Ans. (14.65m)

24/في مبادل حراري متوازي السريان مزدوج الأنبوب ينساب ماء خلال أنبوب داخلي ويتم تسخينه من 20°C إلي 70°C.

الزيت المنساب خلال تجويف خارجي يتم تبريده من 200°C إلي 100°C. من المرغوب فيه تبريد الزيت إلي درجة حرارة مخرج دنيا بزيادة طول المبادل الحراري. حدَّد درجة الحرارة الدنيا التي يمكن بها تبريد الزيت.

Ans. (t = 80°C)

الفصل الثاني

أسئلة وإجاباتها النموذجية في المبادلات الحرارية

(Questions and Model Answers in Heat Exchangers)

2.1 المسألة (1): متوسط فرق درجة الحرارة الحسابي و اللوغاريثمي

(Logarithmic Mean Temperature Difference)

عند أي قيمة من نسبة فروقات درجة الحرارة الطرفية $\frac{\theta_1}{\theta_2}$ يكون متوسط فرق درجة الحرارة الحسابي أكبر بمقدار 5% من متوسط فرق درجة الحرارة اللوغاريثمي؟

الحل:-

FOR AUTHOR USE ONLY

$\bar{\theta} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$، متوسط فرق درجة الحرارة الحسابي.

$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\log_e(\theta_1 / \theta_2)}$، متوسط فرق درجة الحرارة اللوغاريثمي.

$$\frac{\bar{\theta}}{\theta_m} = \frac{\left[\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right]}{\frac{\theta_1 - \theta_2}{\log_e(\theta_1 / \theta_2)}} = \frac{(\theta_1 + \theta_2)}{2(\theta_1 - \theta_2)} \log_e\left[\frac{\theta_1}{\theta_2}\right]$$

معطي أنَّ $\bar{\theta}$ يكون أكبر بمقدار 5% عن θ_m

$$\frac{\bar{\theta}}{\theta_m} = 1.05 = \frac{\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right) + 1}{2\left[\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right) - 1\right]} \ln\left[\frac{\theta_1}{\theta_2}\right]$$

$$\text{Or} \quad \frac{\left(\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)+1\right)}{\left(\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)-1\right)} \times \ln\left[\frac{\theta_1}{\theta_2}\right] = 2 \times 1.05 = 2.1$$

بالمحاولة والخطأ نحصل على،

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \underline{2.2}$$

عليه فإنَّ متوسط فرق درجة الحرارة الحسابي يعطي نتائج في حدود دقة أو خطأ مقداره 5% عندما تتفاوت فروقات درجة الحرارة الطرفية بمقدار لا يزيد عن العامل $\frac{\theta_1}{\theta_2} = 2.2$.

2.2 المسألة (2): الفاعلية لمبادل حراري متوازي السريان

(Parallel Flow Heat Exchanger Effectiveness)

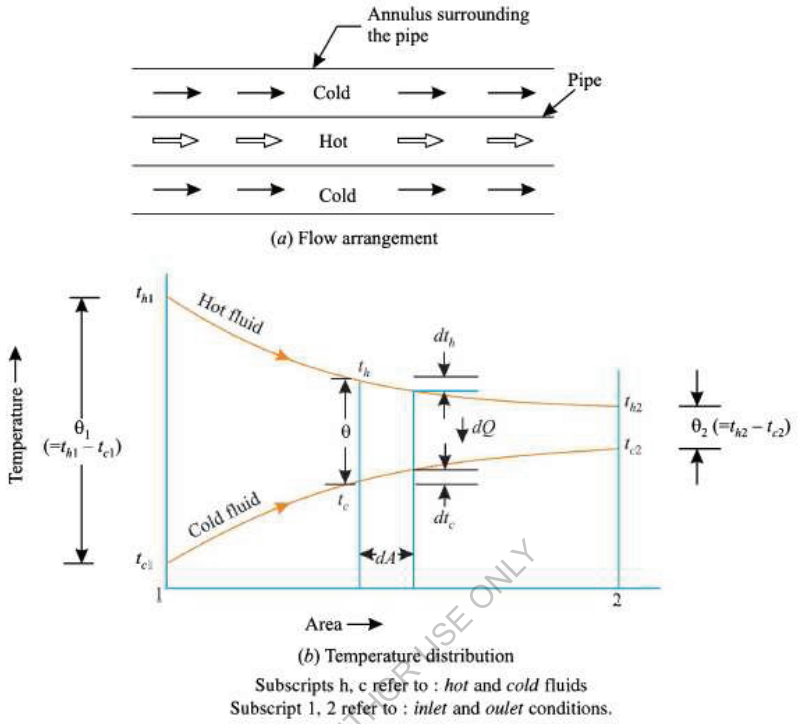
FOR AUTHORISE ONLY

(a) إشتُّق تعبيراً لفاعلية مبادل حراري متوازي السريان بدلالات عدد وحدات إنتقال الحرارة NTU، ونسبة السعة $R = C_{min}/ C_{max}$.

(b) في مبادل حراري متوازي السريان مزدوج الأنبوب ينساب الماء خلال أنبوب داخلي ويتم تسخينه من 20°C إلي 70°C.

الزيت المنساب خلال تجويف خارجي يتم تبريده من 200°C إلي 100°C. من المرغوب فيه تبريد الزيت لدرجة حرارة مخرج دنيا بزيادة طول المبادل الحراري. حدِّد درجة الحرارة الدنيا التي يمكن بها تبريد الزيت.

الحل:-



شكل (1)

FOR AUTHOR USE ONLY

(a) الفاعلية لمبادل حراري متوازي السريان:-

بالرجوع للشكل رقم (1) عاليه. معدَّل إنتقال الحرارة dQ خلال مساحة dA للمبادل الحراري يُعطي بـ :-

$$dQ = U.dA(t_h - t_c) \qquad (1)$$

$$= -\dot{m}_h c_h dt_h = \dot{m}_c c_c dt_c$$

$$= -C_h dt_h = C_c dt_c \qquad (2)$$

من المعادلة (2)، نحصل على،

$$dt_h = -\frac{dQ}{C_h} \quad \text{و} \quad dt_c = -\frac{dQ}{C_c}$$

$$\therefore dt_h - dt_c = -\frac{dQ}{C_h} - \frac{dQ}{C_c}$$

$$d(t_h - t_c) = -dQ\left[\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right]$$

بتعويض قيمة dQ من المعادلة (1) وبإعادة الترتيب، نحصل على

$$\frac{d(t_h - t_c)}{(t_h - t_c)} = -U.dA\left[\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right]$$

بالتكامل ما بين المقطعين (1) و (2) نحصل على

$$\ln\left[\frac{(t_{h_2} - t_{c_2})}{(t_{h_1} - t_{c_1})}\right] = -UA\left[\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right]$$

$$\ln\left[\frac{(t_{h_2} - t_{c_2})}{(t_{h_1} - t_{c_1})}\right] = \frac{-UA}{C_h}\left[1 + \frac{C_h}{C_c}\right]$$

أو $$\left[\frac{t_{h_2} - t_{c_2}}{t_{h_1} - t_{c_1}}\right] = e^{\frac{-UA}{C_h}\left[1+\frac{C_h}{C_c}\right]} \qquad (3)$$

من معادلة سابقة، لدينا تعبيراً للفاعلية،

$$\text{الفاعلية}, \epsilon = \frac{\text{الحرارة المنتقلة الفعلية}}{\text{الحرارة المنتقلة القصوى الممكنة}} = \frac{Q}{C_{min}(t_{h_{max}} - t_{c_{min}})}$$

$$\therefore \epsilon = \frac{C_h(t_{h_1} - t_{h_2})}{C_{\min}(t_{h_1} - t_{c_1})} = \frac{C_c(t_{c_2} - t_{c_1})}{C_{\min}(t_{h_1} - t_{c_1})} \qquad (4)$$

FOR AUTHOR USE ONLY

$$t_{h_2} = t_{h_1} - \frac{\in C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}{C_h}$$ بالتالي ، (5)

$$t_{c_2} = t_{c_1} - \frac{\in C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}{C_c} \quad (6)$$

بتفادي t_{h_2} وt_{c_2} من المعادلة (3)، بمساعدة المعادلتين (5) و (6)، نحصل على

$$\frac{1}{\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} = \left[\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right) - \in C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)\left\{\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right\}\right] = e^{\frac{-UA}{C_h}\left[1+\frac{C_h}{C_c}\right]}$$

أو $$1 - \in C_{\min}\left\{\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right\} = e^{\frac{-UA}{C_h}\left[1+\frac{C_h}{C_c}\right]}$$

أو $$\in = \frac{1 - e^{\frac{-UA}{C_h}\left[1+\frac{C_h}{C_c}\right]}}{C_{\min}\left\{\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right\}} \quad (7)$$

FOR AUTHOR USE ONLY

إذا كانت $C_c > C_h$ بالتالي $C_{min} = C_h$ و $C_{max} = C_c$ بالتالي تصبح المعادلة (7) كالآتي:

$$\in = \frac{1 - e^{\frac{-UA}{C_{\min}}\left[1+\frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right]}}{1 + \left\{\frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right\}} \quad (8)$$

إذا كانت $C_c < C_h$ بالتالي $C_{min} = C_c$ و $C_{max} = C_h$ بالتالي تصبح المعادلة (7) كالآتي:

$$\in = \frac{1 - e^{\frac{-UA}{C_{\max}}\left[1+\frac{C_{\max}}{C_{\min}}\right]}}{1 + \left\{\frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right\}} \quad (9)$$

بإعادة ترتيب المعادلات (8) و (9)، نحصل على معادلة مشتركة.

$$\in = \frac{1 - e^{\frac{-UA}{C_{\min}}\left[1+\frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right]}}{1+\frac{C_{\min}}{C_{\max}}}$$

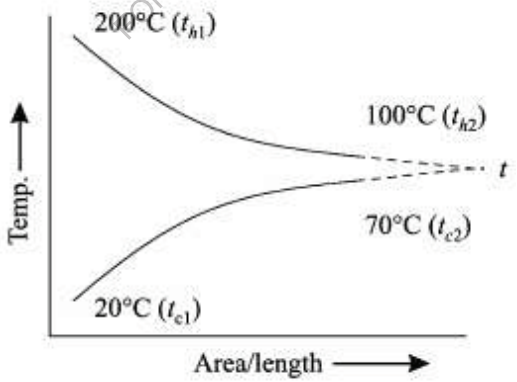
- المجموعة UA/C_{min} هي تعبير لا بعدي تُعرف بعدد وحدات إنتقال حرارة NTU.
- C_{min}/C_{max} هي كمية متغير لا بعدية تُعرف بنسبة السعة R.

عليه فإنَّ فاعلية مبادل حراري متوازي السريان تُعطي بـ

$$\in = \frac{1 - e^{-NUT[1+R]}}{1+R} \qquad (10)$$

(b)

FOR AUTHOR USE ONLY



شكل (2)

$t_{h_1} = 200°C \quad ; t_{h_2} = 100°C$

$$t_{c_1} = 20°C \quad ; t_{c_2} = 70°C$$

$$Q = \dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

أو

$$\frac{\dot{m}_c c_c}{\dot{m}_h c_h} = \frac{100}{50} = 2$$

إجعل t هي درجة الحرارة الأدنى التي يمكن تبريد الزيت إليها والتي ستكون درجة الحرارة الأقصى للماء (إرجع للشكل (2) عاليه).

بالتالي،

$$\dot{m}_h C_h (200 - t) = \dot{m}_c C_c (t - 20)$$

$$200 - t = \frac{\dot{m}_c c_c}{\dot{m}_h c_h}(t - 20)$$

$$200 - t = 2(t - 20)$$

$$200 - t = 2t - 40 \quad \text{أو}$$

$$t = \underline{\underline{80}}°C \quad \text{أو}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

2.3 المسألة (3): مساحة المبادل الحراري

(Heat Exchanger Surface Area)

معدلات السريان لجداول من ماء ساخن وبارد تمر من خلال مبادل حراري متوازي السريان هما 0.2kg/s و 0.5kg/s على الترتيب. درجات حرارة المدخل على الجانبين الساخن والبارد هما 75°C و 20°C على الترتيب. درجة حرارة مخرج الماء الساخن هي 45°C. إذا كانت معاملات

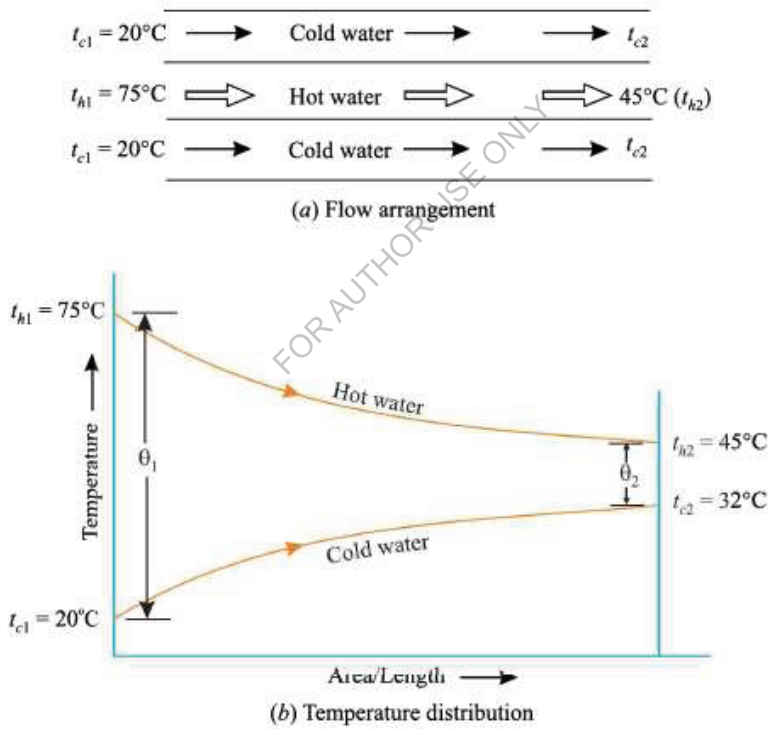
إنتقال الحرارة المفردة على كلا الجانبين هي $650W/m^2°C$، أحسب مساحة المبادل الحراري. خذ c للماء $4.187kj/kg°C$.

الحل:-

معطي: $\dot{m}_h = 0.2kg/s$ ؛ $\dot{m}_c = 0.5kg/s$ ؛ $t_{h_1} = 75°C$ ؛ $t_{h_2} = 45°C$ ؛ $t_{c_1} = 20°C$ ؛

$h_i = h_o = 650W/m^2°C$.

يتم توضيح المبادل الحراري تخطيطياً في الشكل (3) أدناه



FOR AUTHOR USE ONLY

شكل (3)

معدّل إنتقال الحرارة $Q = \dot{m}_h \times c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)$ ،

$$= 0.2 \times 4.187 \times (75-45) = \underline{25.122}\ kj/s$$

الحرارة المكتسبة بالمائع البارد = الحرارة المفقودة بالمائع الساخن

$$\dot{m}_h \times c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c \times c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

$$25.122 = 0.5 \times 4.187 \times \left(t_{c_2} - 20\right)$$

$$\Rightarrow \qquad \therefore t_{c_2} = \underline{32}\,°C$$

متوسط فرق درجة الحرارة اللوغاريثمي يُعطي بـ

$$LMTD = \theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\log_e \dfrac{\theta_1}{\theta_2}}$$

أو $\theta_m = \dfrac{\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right) - \left(t_{h_2} - t_{c_2}\right)}{\log_e \left\{\dfrac{t_{h_1} - t_{c_1}}{t_{h_2} - t_{c_2}}\right\}} = \dfrac{(75-20)-(45-32)}{\log_e \left\{\dfrac{75-20}{45-32}\right\}}$

$$\theta_m = \frac{55-13}{\log_e \dfrac{55}{13}} = \underline{29.12}\ °C$$

FOR AUTHOR USE ONLY

معامل إنتقال الحرارة الإجمالي يُحسب من المعادلة التالية،

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

$$= \frac{1}{650} + \frac{1}{650} = \frac{2}{650} = \frac{1}{325}$$

$$\therefore U = \underline{325}\ W/m^2\,°C$$

أيضاً ، $Q = UA\,\theta_m$

$$A = \frac{Q}{U\theta_m} = \frac{25.122 \times 10^3}{325 \times 29.12} = \underline{\underline{2.65}}\ m^2$$

2.4 المسألة (4): طول انبوب المبادل الحراري

(Heat Exchanger Tube Length)

البيانات التالية تتعلق بمبادل حراري متوازي السريان يتم فيه تسخين هواء بغازات عادم.

الحرارة المنتقلة في الساعة 155450kj

معامل إنتقال الحرارة الداخلي $120W/m^2°C$

معامل إنتقال الحرارة الخارجي $195W/m^2°C$

درجات حرارة مدخل ومخرج المائع الساخن 450°C و 250°C على الترتيب.

درجات حرارة مدخل ومخرج المائع البارد 60°C و 120°C على الترتيب.

الأقطار الداخلية والخارجية للأنبوب 50mm و 60mm على الترتيب.

أحسب طول الأنبوب المطلوب لحدوث إنتقال الحرارة الضروري. تجاهل مقاومة الأنبوب.

FOR AUTHOR USE ONLY

الحل:-

$Q = 155450kj/h$ ؛ $h_i = 120W/m^2°C$ ؛ $h_o = 195W/m^2°C$ ؛ $t_{h_1} = 450°C$ ؛

$d_i=50mm=0.05m$ ؛ $d_o=60mm=0.06m$ ؛ $t_{h_2} = 250°C$ ؛ $t_{c_1} = 60°C$ ؛ $t_{c_2} = 120°C$ ؛

$$(LMTD), \theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\log_e \frac{\theta_1}{\theta_2}} = \frac{(t_{h_1} - t_{c_1}) - (t_{h_2} - t_{c_2})}{\log_e \left\{ \frac{t_{h_1} - t_{c_1}}{t_{h_2} - t_{c_2}} \right\}}$$

$$= \frac{(450-60)-(250-120)}{\ln\left\{\frac{450-60}{250-120}\right\}} = \frac{390-130}{\ln\frac{390}{130}} = \underline{236.66}°C$$

معامل إنتقال الحرارة الإجمالي يُعطي بـ

$$\frac{1}{UA_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{A_o}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o} = \frac{\pi d_o L}{\pi d_i L \times h_i} + \frac{1}{h_o} = \frac{d_o}{d_i}\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

$$= \frac{0.06}{0.05}.\frac{1}{120} + \frac{1}{195} = \underline{0.01513}$$

$$\therefore U = 66.09\, W/m^2 °C$$

معدَّل إنتقال الحرارة الكلي يُعطي بـ

$$Q = UA\theta_m = U \times (\pi d_o L) \times \theta_m$$

$$or\ L = \frac{Q}{U \times \pi d_o \times \theta_m} = \frac{155450 \times (10^3/3600)}{66.09 \times \pi \times 0.06 \times 236.66} = \underline{\underline{14.65}}\ m$$

2.5 المسألة (5): درجة حرارة مخرج المائع الساخن

(Hot Fluid Exit Temperature)

FOR AUTHOR USE ONLY

مائع ساخن عند 200°C يدخل مبادل حراري بمعدَّل سريان كتلة 10^4kg/h، حرارته النوعية 2000J/kgK. يتم تبريده بواسطة مائع آخر يدخل عند درجة حرارة 25°C بمعدَّل سريان كتلة 2500kg/h وحرارة نوعية 400J/kgK. معامل إنتقال الحرارة الإجمالي المؤسس على مساحة خارجية بمقدار $20m^2$ هو $250W/m^2K$. أوجد درجة حرارة مخرج المائع الساخن عندما يكون المائعان في سريان متوازي.

الحل:-

معطى:

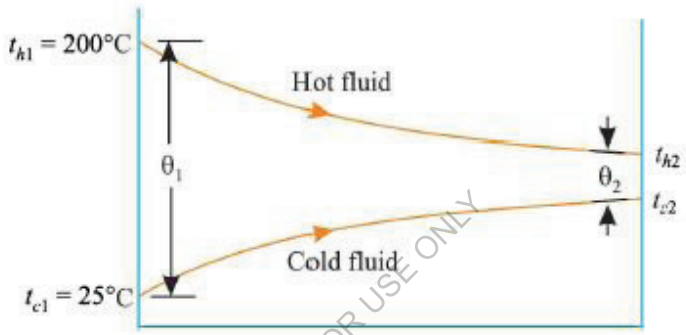
$$t_{c_1} = 25°C\ ;\ c_h = 2000J/kgK\ ;\ \dot{m}_h = \frac{10^4}{3600} = 2.78kg/s\ ;\ t_{h_1} = 200°C$$

$\dot{m}_c = \frac{2500}{3600} = 0.694 kg/s$ ؛ $c_c = 400 J/kgK$ ؛ $U = 250 W/m^2K$.

الحرارة المفقود بواسطة الماء الساخن، $Q = \dot{m}_h \times c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)$

$$= 2.78 \times 2000 \times \left(200 - t_{h_2}\right) = 5560 \times \left(200 - t_{h_2}\right) \qquad \text{(i)}$$

يتم توضيح المبادل الحراري في الشكل (4) أدناه:



شكل (4)

FOR AUTHOR USE ONLY

الحرارة المكتسبة بواسطة الماء البارد، $Q = \dot{m}_c c_h \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$

$$= 0.694 \times 400 \times \left(t_{c_2} - 25\right)$$

$$= 277.6 \times \left(t_{c_2} - 25\right) \qquad \text{(ii)}$$

بمساواة (i) و (ii)، نحصل على

$$5560 \times \left(200 - t_{h_2}\right) = 277.6 \times \left(t_{c_2} - 25\right)$$

أو $t_{c_2} = \frac{5560}{277.6} \times \left(200 - t_{h_2}\right) + 25 = 4025 - 20 t_{h_2}$ (iii)

أيضاً، الحرارة المنتقلة تُعطي بـ

$$Q = UA\theta_m$$

حيث $$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\log_e \frac{\theta_1}{\theta_2}}$$

$$\theta_1 = t_{h_1} - t_{c_1} = 200 - 25 = \underline{175}^{\circ}C$$

و $$\theta_2 = t_{h_2} - t_{c_2}$$

$$\therefore \theta_m = \frac{175 - \left(t_{h_2} - t_{c_2}\right)}{\ln\left\{\frac{175}{t_{h_2} - t_{c_2}}\right\}}$$

بتعويض القيَّم في المعادلة عاليه، نحصل على

$$Q = 250 \times 20\left[\frac{175 - \left(t_{h_2} - t_{c_2}\right)}{\ln\left\{\frac{175}{t_{h_2} - t_{c_2}}\right\}}\right] \quad \text{(iv)}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

$$Q = 5000\left[\frac{175 - \left\{t_{h_2} - \left(4025 - 20t_{h_2}\right)\right\}}{\ln\left\{\frac{175}{t_{h_2} - \left(4025 - 20t_{h_2}\right)}\right\}}\right]$$

$$Q = 5000\left[\frac{175 - \left\{t_{h_2} - 4025 + 20t_{h_2}\right\}}{\ln\left\{\frac{175}{\left(t_{h_2} - 4025 + 20t_{h_2}\right)}\right\}}\right] = 5000\left[\frac{175 - \left(21t_{h_2} - 4025\right)}{\ln\left\{\frac{175}{21t_{h_2} - 4025}\right\}}\right] \quad \text{(v)}$$

بمساواة المعادلتين (i) و (v) نحصل على،

$$5560\left(200-t_{h_2}\right)=5000\left[\frac{175-\left(21t_{h_2}-4025\right)}{\ln\left\{\frac{175}{21t_{h_2}-4025}\right\}}\right]$$

باستخدام أسلوب المحاولة والخطأ يمكن إيجاد t_{h_2} .

2.6 المسألة (6): مساحة إنتقال الحرارة المطلوبة والفاعلية

(Required Heat Transfer Area and Effectiveness)

في مبادل حراري مزدوج الماسورة (الأنبوب) ينساب الماء بمعدَّل 50,000kg/h ويتم تبريده من 95°C إلي 65°C. في نفس الوقت فإنَّ 50,000kg/h من ماء التبريد عند 30°C يدخل إلي المبادل الحراري. من شروط السريان أنَّ معامل إنتقال الحرارة الإجمالي يظل ثابتاً عند 2270W/m^{2}K. حدَّد مساحة إنتقال الحرارة المطلوبة والفاعلية، إفترض سريان متوازي. إفترض لكلا السريانان c = 4.2kj/kgK.

FOR AUTHOR USE ONLY

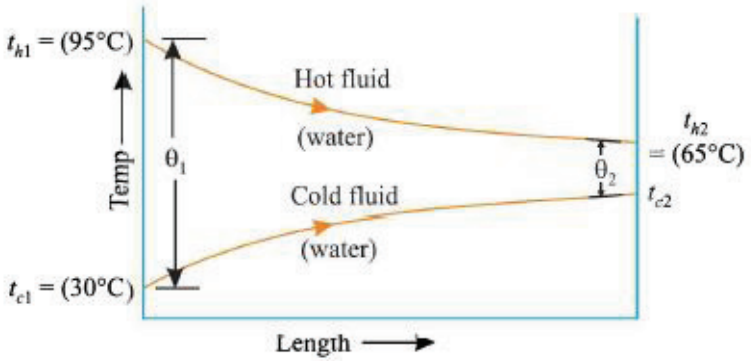
الحل:-

معطي: $t_{h_1}=95°C$ ؛ $\dot{m}_h=\frac{50000}{3600}=13.89kg/s$ ؛ $t_{h_2}=65°C$ ؛ $t_{c_1}=30°C$ ؛

$\dot{m}_c=\frac{50000}{3600}=13.894kg/s$ ؛ $C_h=C_c=4.2kj/kgK$ ؛ U = 2270W/m^{2}K.

يتم توضيح المبادل الحراري في الشكل (5) أدناه.

الحرارة المكتسبة بواسطة الماء البارد = الحرارة المفقودة بواسطة المائع الساخن = Q



شكل (5)

$$\dot{m}_h \times c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c \times c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

$$13.89 \times 4.2 \times 10^3 (95 - 65) = 13.89 \times 4.2 \times 10^3 \times \left(t_{c_2} - 30\right)$$

$$\therefore \qquad \Rightarrow t_{c_2} = \underline{60}\,°C$$

$$(LMTD), \theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \dfrac{\theta_1}{\theta_2}} = \frac{\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right) - \left(t_{h_2} - t_{c_2}\right)}{\ln\left\{\dfrac{t_{h_1} - t_{c_1}}{t_{h_2} - t_{c_2}}\right\}}$$

$$= \frac{(95 - 30) - (65 - 60)}{\ln\left\{\dfrac{95 - 30}{65 - 60}\right\}} = \underline{23.4}\,°C$$

FOR AUTHOR USE ONLY

أيضاً ، $Q = UA\theta_m$

أو $13.89 \times 4200(95 - 65) = 2270 \times A \times 23.4$

مساحة إنتقال الحرارة ، $A = \underline{\underline{32.95}}\,m^2$

فاعلية المبادل الحراري $= \dfrac{Q_{actual}}{Q_{\max.}}$

$$Q_{act.} = \dot{m}_h \times C_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) \;\; and \;\; Q_{\max} = \dot{m}_h \times C_h \left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)$$

$$\in = \frac{Q_{act.}}{Q_{\max}} = \frac{\dot{m}_h \times c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)}{\dot{m}_h \times c_h \left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} = \frac{95-65}{95-30} = \underline{\underline{0.461}}$$

2.7 المسألة (7): معدَّل إنتقال الحرارة، معدَّل سريان كتلة الماء ومساحة سطح المبادل الحراري (Rate of Heat Transfer, Water Mass Flow Rate and Heat Exchanger Surface Area)

في مبادل حراري مزدوج الأنبوب متعاكس السريان، يتم تسخين الماء من 25°C إلي 65°C بواسطة زيت بحرارة نوعية 1.45kj/kgK وبمعدَّل سريان كتلة مقداره 0.9kg/s. يتم تبريد الزيت من 230°C إلي 160°C. إذا كان معامل إنتقال الحرارة الإجمالي هو 420W/m^2°C، أحسب الآتي:-

i/ معدَّل إنتقال الحرارة.

ii/ معدَّل سريان كتلة الماء.

iii/ مساحة سطح المبادل الحراري.

FOR AUTHOR USE ONLY

الحل:-

معطي: $t_{c_1} = 25°C$ ؛ $t_{c_2} = 65°C$ ؛ $c_h = 1.45kj/kgK$ ؛ $\dot{m}_h = 0.9kg/s$ ؛

$t_{h_1} = 230°C$ ؛ $t_{h_2} = 160°C$ ؛ U = 420W/m^{2}K.

الشكل (6) أدناه يوضِّح ترتيبة المبادل الحراري.

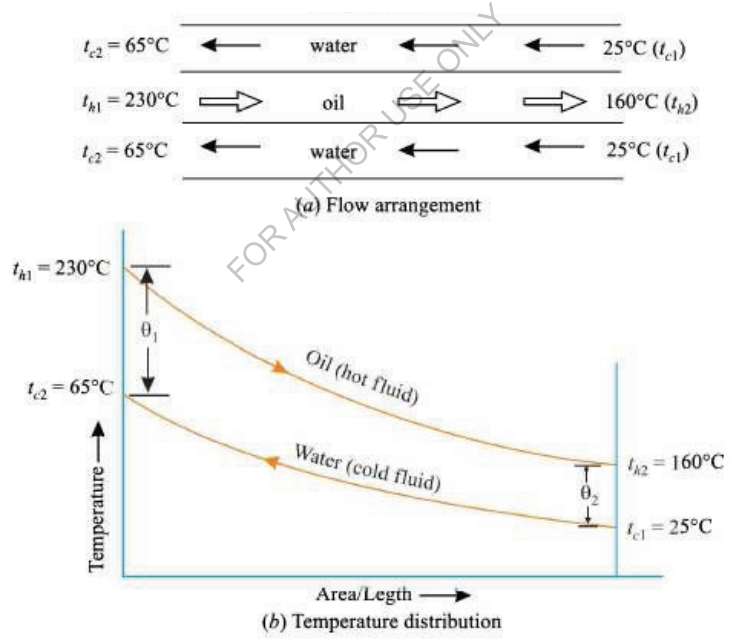
i/ معدَّل إنتقال الحرارة،

$$Q = \dot{m}_h \times c_h \times dt_h$$
$$= \dot{m}_h \times c_h \times \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)$$
$$= 0.9 \times 1.45 \times (230 - 160) = \underline{\underline{91.35}}\ kj/s$$

ii/ معدَّل سريان كتلة الماء، $\dot{m}_c$

الحرارة المكتسبة بواسطة الماء (المائع البارد) = الحرارة المفقودة بواسطة الزيت (المائع الساخن)

$$\dot{m}_h \times c_h \times \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c \times c_c \times \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$
$$91.35 = \dot{m}_c \times 4.187 \times (65 - 25)$$
$$\Rightarrow \qquad \dot{m}_c = \underline{\underline{0.545}}\ kg/s$$



شكل (6)

iii/ مساحة سطح المبادل الحراري، A

FOR AUTHOR USE ONLY

$$(LMTD), \theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} = \frac{(t_{h_1} - t_{c_2}) - (t_{h_2} - t_{c_1})}{\ln\left\{\frac{t_{h_1} - t_{c_2}}{t_{h_2} - t_{c_1}}\right\}} = \frac{(230-65)-(160-25)}{\ln\left\{\frac{230-65}{160-25}\right\}}$$

أو $$\theta_m = \frac{165-135}{\ln\left\{\frac{165}{135}\right\}} = \underline{149.5}\ ^\circ C$$

أيضاً ، $$Q = UA\theta_m$$

أو $$A = \frac{Q}{UA\theta_m} = \frac{91.35\times10^3}{420\times149.5} = \underline{\underline{1.45}} m^2$$

2.8 المسألة (8): إختيار المبادل الحراري المناسب

(Selection of a Suitable Heat Exchanger)

مبرِّد زيت لنظام تزليق يقوم بتبريد 1000kg/h من الزيت (c=2.09kj/kg°C) من 80°C إلي 40°C بإستخدام ماء تبريد مقداره 1000kg/h عند 30°C. إعط إختيارك إما لمبادل حراري ذو سريان متوازي أو ذو سريان متعاكس مع ذكر الأسباب. أحسب مساحة سطح المبادل الحراري، إذا كان معامل إنتقال الحرارة الإجمالي هو 24W/m²°C.

خذ c للماء = 4.18kj/kg°C.

الحل:-

يتم توضيح المبادل الحراري في الشكل (7) أدناه.

معطي: $\dot{m}_h = \frac{1000}{3600} kg/s$ ؛ $C_h = 2.09 kj/kg^o C$ ؛ $C_c = 4.18 kj/kg^o C$ ؛

$\dot{m}_c = \frac{1000}{3600} kg/s$ ؛ $t_{h_1} = 80°C$ ؛ $t_{h_2} = 40°C$ ؛ $t_{c_1} = 30°C$ ؛ $U = 24 W/m^{2o}C$.

FOR AUTHOR USE ONLY

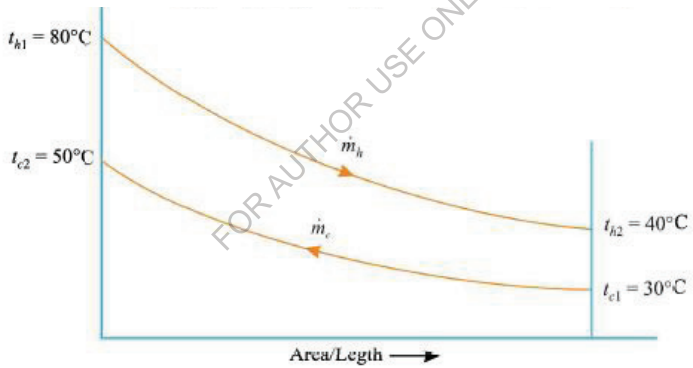
معدَّل إنتقال الحرارة ، $Q = \dot{m}_h \times c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c \times c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$

$$\frac{1000}{3600} \times 2.09 \times (80-40) = \frac{1000}{3600} \times 4.18 \times \left(t_{c_2} - 30\right) \quad \text{أو}$$

$$\therefore t_{c_2} = \underline{50}°C \quad \Rightarrow \quad \text{أو}$$

مرة ثانية ، $\theta_m = \dfrac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \dfrac{\theta_1}{\theta_2}}$

$$= \frac{\left(t_{h_1} - t_{c_2}\right) - \left(t_{h_2} - t_{c_1}\right)}{\ln\left(t_{h_1} - t_{c_2}\right)/\left(t_{h_2} - t_{c_1}\right)} = \frac{(80-50)-(40-30)}{\ln[(80-50)-(40-30)]}$$



FOR AUTHOR USE ONLY

شكل (7)

$$\theta_m = \frac{30-10}{\ln(30/10)} = \underline{18.2}°C$$

أيضاً ، $Q = UA\theta_m$

$$\frac{1000}{360} \times \left(2.09 \times 10^3\right)(80-40) = 24 \times A \times 18.2$$

$$or \quad \Rightarrow A = \underline{\underline{53.16}} m^2$$

2.9 المسألة (9): مبادل حراري مزدوج الأنبوب متعاكس السريان

(Double Tube Counter Flow Heat Exchanger)

وضِّح أنَّه لمبادل حراري مزدوج الأنبوب متعاكس السريان إذا كان $\dot{m}_h C_h = \dot{m}_c C_c$ فإنَّ خطوط درجة الحرارة للمائعين على إمتداد طول المبادل الحراري هما خطوط مستقيمة متوازية.

الحل:-

لمبادل حراري،

$$dQ = -\dot{m}_h c_h dt_h = \dot{m}_c c_c dt_c$$
$$= -C_h dt_h = C_c dt_c$$

تنخفض درجة حرارة المائع الساخن بمقدار dt_h

تزيد درجة حرارة المائع البارد بمقدار dt_c

معطي،

$$\dot{m}_h C_h = \dot{m}_c C_c$$

أو $$C_h = C_c$$

حيث C_h = السعة الحرارية للمائع الساخن

C_c = السعة الحرارية للمائع البارد.

في مبادل حراري متعاكس السريان تنخفض درجة حرارة كل من المائعين في إتجاه طول المبادل الحراري، عليه ،

$$dQ = -C_h dt_h = -C_c dt_c$$
$$dt_h = -\frac{dQ}{C_h} \quad and \quad dt_c = -\frac{dQ}{C_c}$$

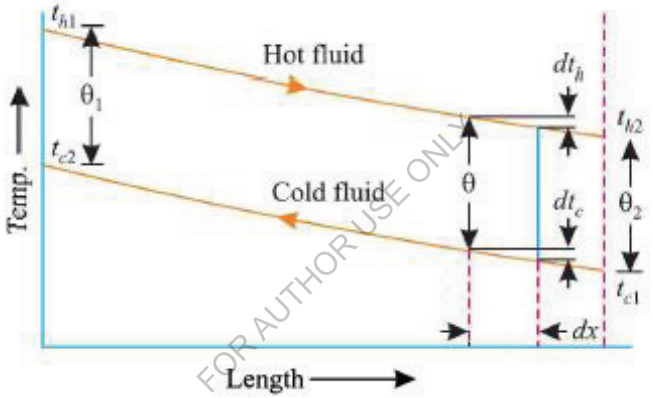
FOR AUTHOR USE ONLY

$$\text{أو} \quad dt_h - dt_c = d\theta = -dQ\left[\frac{1}{C_h} - \frac{1}{C_c}\right]$$

$$C_h = C_c \qquad \text{بما أنَّ ،}$$

$$d\theta = 0 \quad \text{or} \quad \theta = \text{constant}$$

بالتالي، كلا الخطان المستقيمان اللذان يوضِّحان تفاوت درجات الحرارة بطول المبادل الحراري هما خطان مستقيمان كما هو واضح في الشكل (8) أدناه.



FOR AUTHOR USE ONLY

شكل (8)

2.10 المسألة (10): مساحة إنتقال الحرارة لمبادل حراري متعاكس السريان و لمبادل حراري متواز السريان

(Surface Area for Counter Flow and Parallel Flow Heat Exchangers)

مبادل حراري متعاكس السريان مزدوج الأنبوب يستخدم بخار محمَّص يتم إستخدامه لتسخين ماء بمعدَّل 10,500kg/h. يدخل البخار إلي المبادل الحراري عند 180°C ويغادر عند 130°C. درجات حرارة مدخل ومخرج الماء هي 30°C و80°C على الترتيب. إذا كان معامل إنتقال

الحرارة الإجمالي من البخار إلي الماء هو $814 W/m^{2}°C$، أحسب مساحة إنتقال الحرارة. كم ستكون الزيادة المئوية في المساحة إذا كان السريان متوازياً؟

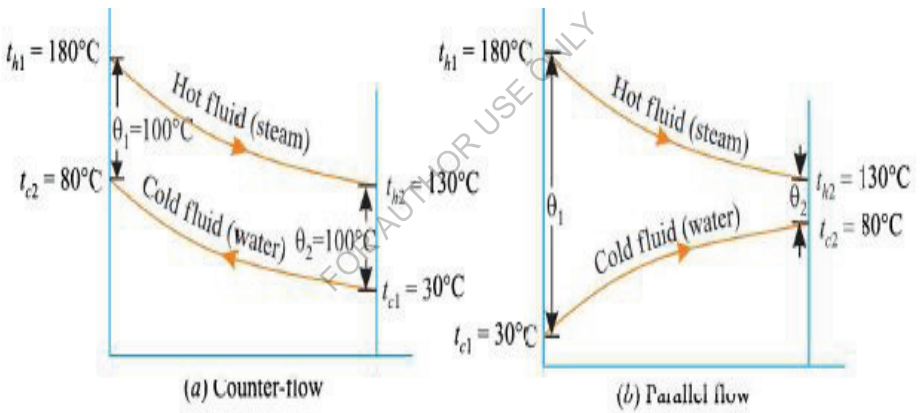
الحل:-

معطي: $\dot{m}_w = \dot{m}_c = \frac{10500}{3600} = 2.917 kg/s$ ؛ $t_{h_1} = 180°C$ ؛ $t_{h_2} = 130°C$ ؛

$t_{c_1} = 30°C$ ؛ $t_{c_2} = 80°C$ ؛ $U = 814 W/m^{2}°C$.

الشكل (9) أدناه يوضِّح ترتيبتي السريان المتعاكس والمتوازي لمبادل حراري.

i/ عندما يكون السريان متعاكساً،



شكل (9)

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)}$$

في هذه الحالة ،

$$\theta_m = \frac{0}{0} \qquad (indefinite value) \qquad \text{بما أنَّ } \theta_1 = \theta_2 = 100°C$$

معدَّل إنتقال الحرارة يُعطي بـ

$$Q = UA\theta_m$$

أو $\dot{m}_c \times c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right) = UA\theta_m$

أو $2.917 \times 4.187 \times 10^3 (80-20) = 814 \times A \times 100$

$$\Rightarrow \quad A = \underline{\underline{7.5}} m^2$$

ii/ عندما السريان متوازياً،

$$(LMTD), \theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} = \frac{\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right) - \left(t_{h_2} - t_{c_2}\right)}{\ln\left\{\frac{t_{h_1} - t_{c_1}}{t_{h_2} - t_{c_2}}\right\}} = \frac{150-50}{\ln\left\{\frac{150}{50}\right\}}$$

$$= \frac{100}{\ln\{3\}} = \underline{91}°C$$

FOR AUTHOR USE ONLY

مرة أخري، $Q = UA\theta_m$

أو $2.917 \times \left(4.187 \times 10^3\right)(80-30) = 814 \times A \times 91$

$$\Rightarrow A = \underline{\underline{8.24}} m^2$$

الزيادة المئوية في المساحة $= \frac{8.24 - 7.5}{7.5} = 0.0987 \; or \; \underline{\underline{9.87}} \; \%$

2.11 المسألة (11): طول الأنبوب المطلوب لمبادل حراري متعاكس السريان

(Length of the Tube Required for Counter Flow Heat Exchanger)

مبادل حراري متعاكس السريان، يمر من خلاله هواء بمعدَّل 12.5kg/s ليتم تبريده من 540°C إلي 146°C، يحتوي المبادل الحراري على 4200 أنبوب، قطر كلٍ منها 30mm. درجات حرارة مدخل ومخرج ماء التبريد هما 25°C و 75°C على الترتيب. إذا تم تجاهل مقاومة السريان على جانب الماء، أحسب طول الأنبوب المطلوب لهذه الخدمة.

لسريان مضطرب داخل الأنابيب:- $\mathrm{Nu} = 0.023\ \mathrm{Re}^{0.8}\ \mathrm{Pr}^{0.4}$

خواص الهواء عند متوسط درجة الحرارة تكون كما يلي:-

$\rho = 1.009 kg/m^3$ ؛ $c_p = 1.0082 kj/kg°C$ ؛ $\mu = 2.075\times10^{-5} kg/ms\left(Ns/m^2\right)$ ،

$k = 3.003\times10^{-2} W/m^2°C$.

الحل:-

معطي: $\dot{m}_h = 12.5 kg/s$ ؛ $t_{h_1} = 540°C$ ؛ $t_{h_2} = 146°C$ ؛ $t_{c_1} = 25°C$ ؛ $t_{c_2} = 75°C$ ؛

n = 4200 ؛ d = 30mm = 0.03m.

$\mathrm{Re} = \dfrac{\rho v d}{\mu}$ ، رقم رينولد

$\dot{m} = \rho Q = \rho A v n$ ، معدَّل سريان الكتلة

$$\rho v = \frac{\dot{m}}{nA}$$

$$\therefore \mathrm{Re} = \frac{\dot{m}d}{nA\mu} = \frac{12.5\times0.03}{4200\times\frac{\pi}{4}\times(0.03)^2\times2.075\times10^{-5}} = \underline{6087.4}$$

$\mathrm{Pr} = \dfrac{\mu c_p}{k} = \dfrac{2.075\times10^{-5}\times1.0082\times10^3}{3.003\times10^{-2}} = \underline{0.6966}$ ، رقم براندتل

$Nu = \dfrac{hd}{k} = 0.023\mathrm{Re}^{0.8}\ \mathrm{Pr}^{0.4}$ ، رقم نسيلت

$$= 0.023\times(6087.4)^{0.8}\times(0.6966)^{0.4} = \underline{21.2}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\therefore h = \frac{Nu.k}{d} = \frac{21.2 \times 3.003 \times 10^{-2}}{0.03} = \underline{21.22} W/m^2 °C$$

بما أنَّ مقاومة جانب الماء للسريان يتم تجاهلها

$$\therefore \frac{1}{U} = \frac{1}{h} = \frac{1}{21.22} \qquad or\ U = \underline{21.22} W/m^2 °C$$

$$LMTD, \theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left\{\frac{\theta_1}{\theta_2}\right\}} = \frac{(t_{h_1} - t_{c_2}) - (t_{h_2} - t_{c_1})}{\ln\left\{\frac{t_{h_1} - t_{c_2}}{t_{h_2} - t_{c_1}}\right\}} = \frac{(540-75)-(146-25)}{\ln\left\{\frac{540-75}{146-25}\right\}}$$

$$= \frac{(465-121)}{\ln\left\{\frac{465}{121}\right\}} = \underline{255.5} °C$$

معدّل إنتقال الحرارة ، $Q = \dot{m}_h \times C_h \times (t_{h_1} - t_{h_2}) = UA\theta_m = U \times (n\pi dL) \times \theta_m$

أو $$L = \frac{\dot{m}_h \times C_h \times (t_{h_1} - t_{h_2})}{U \times n\pi d \times \theta_m} = \frac{12.5 \times (1.0082 \times 10^3) \times (540-146)}{21.22 \times 4200 \times \pi \times 0.03 \times 255.5}$$

$$= \underline{\underline{2.31}} m$$

FOR AUTHOR USE ONLY

2.12 المسألة (12): عدد الأنابيب المطلوبة لمبادل حراري متعاكس السريان

(Number of Tubes Required for Counter Flow Heat Exchanger)

يدخل بخار إلي مبادل حراري متعاكس السريان، جاف مشبَّع عند 10bar ويغادر عند 350°C. معدل سريان كتلة البخار 800kg/min. يدخل الغاز المبادل الحراري عند 650°C وبمعدَّل سريان كتلة 1350kg/min. إذا كانت الأنابيب بقطر 30mm وبطول 3m، حدِّد عدد الأنابيب المطلوبة. تجاهل مقاومة الأنابيب المعدنية. إستخدم البيانات التالية:-

للبخَّار:- $t_{sat.} = 18°C$ عند 10bar؛ $c_s = 2.71 kj/kg°C$؛ $h_s = 600 W/m^2°C$.

للغاز :- $c_g = 1kj/kg°C$ ؛ $h_g = 250W/m^2°C$.

الحل:-

الشكل (10) أدناه يوضِّح ترتيبة المبادل الحراري.

معطي: $\dot{m}_s = \dot{m}_c = \frac{800}{60} = 13.33kg/s$ ؛ $\dot{m}_g = \dot{m}_h = \frac{1350}{60} = 22.5kg/s$ ؛

$t_{h_1} = 650°C$ ؛ $t_{c_1} = t_{sat.} = 180°C$ ؛ $t_{c_2} = 350°C$ ؛ d = 30mm = 0.3m ؛

L=3m.

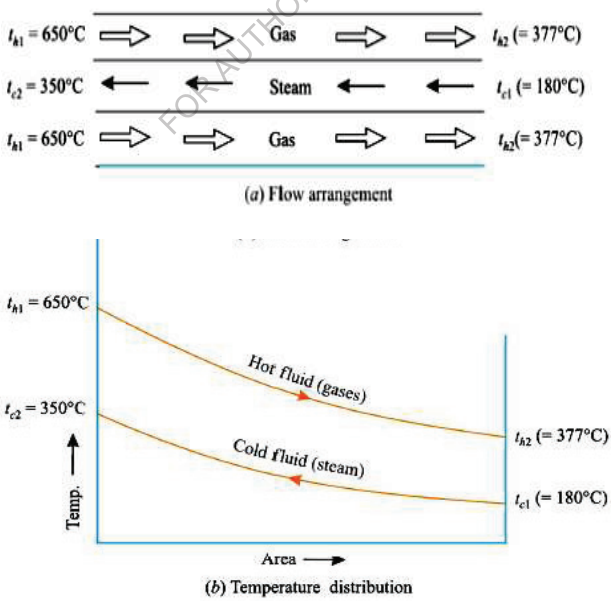
الحرارة المكتسبة بواسطة البخار = الحرارة المفقودة بواسطة الغاز

$$\dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

$$22.5 \times 1 \times \left(650 - t_{h_2}\right) = 13.33 \times 2.71 \times (350 - 180)$$

$$\Rightarrow \quad \therefore t_{h_2} = \underline{377}°C$$

FOR AUTHOR USE ONLY



شكل (10)

معامل إنتقال الحرارة الإجمالي يُعطي بـ،

$$\frac{1}{UA_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{A_o}{A_i} \cdot \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

بما أن $d_i \approx d_o$ ،

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{600} + \frac{1}{250} = \underline{5.667 \times 10^{-3}}$$

$$U = \underline{176.5}\ W/m^2 °C$$

معدَّل إنتقال الحرارة الكلي يُعطي بـ،

$$Q = UA\theta_m \qquad \text{(i)}$$

حيث،

$$A = n\pi dL = n\pi \times 0.03 \times 3 = 0.2827n\ m^2$$

$$Q = 22.5 \times 1 \times 10^3 (650 - 377) = 6142.5 \times 10^3 W$$

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)} = \frac{\left(t_{h_1} - t_{c_2}\right) - \left(t_{h_2} - t_{c_1}\right)}{\ln\left\{\frac{t_{h_1} - t_{c_2}}{t_{h_2} - t_{c_1}}\right\}} =$$

$$= \frac{(650-350)-(377-180)}{\ln\left\{\frac{(650-350)}{(377-180)}\right\}} = \frac{300-197}{\ln\left\{\frac{300}{197}\right\}}$$

$$= \underline{244.9}\,°C$$

بتعويض القيم في المعادلة (i)، نحصل على

$$6142.5 \times 10^3 = 176.5 \times 0.2827n \times 244.9$$

أو $\Rightarrow$ $n = \underline{\underline{503}}\ tubes$

FOR AUTHOR USE ONLY

2.13 المسألة (13): معامل إنتقال الحرارة الإجمالي و معدَّل إنتقال الحرارة

(Overall Heat Transfer Coefficient and Rate of Heat Transfer)

في مبادل حراري ذو غلاف وأنابيب متعاكس السريان ينساب ماء خلال أنبوب نحاسي بقطر داخلي 20mm وقطر خارجي 23mm، بينما يدخل الزيت عند 75°C ويغادر عند 60°C. معاملات إنتقال الحرارة للماء والزيت هما 4500W/m²°C و 1250W/m²°C على الترتيب. الموصلية الحرارية لجدار الأنبوب هي 355W/m°C. عوامل الإتساخ على جانبي الماء والزيت يمكن أخذهما كـ 0.0004 و 0.001 على الترتيب. إذا كان طول الأنبوب هو 2.4m، أحسب الآتي:-

i/ معامل إنتقال الحرارة الإجمالي.

ii/ معدَّل إنتقال الحرارة.

FOR AUTHOR USE ONLY

الحل:-

معطي:- d_o=23mm=0.023m ؛ d_i=20mm=0.02m ؛ $t_{c_1} = 20°C$ ؛ $t_{c_2} = 30°C$ ؛

$t_{h_1} = 75°C$ ؛ $t_{h_2} = 60°C$ ؛ $h_i = 4500 W/m^2°C$ ؛ $h_o = 1250 W/m^2°C$ ؛

$k = 355 W/m°C$ ؛ $R_{f_i} = 0.0004$ ؛ $R_{f_o} = 0.001$ ؛ L = 2.4m.

$$\frac{1}{UA_o} = \frac{1}{h_i A_i} + R_{f_i}\frac{1}{A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + R_{f_o}\frac{1}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}$$

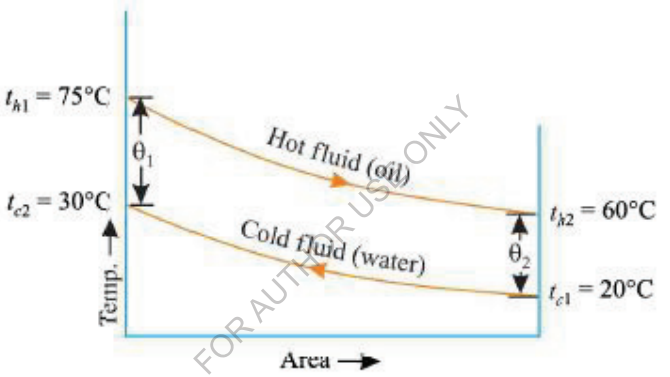
$$\frac{1}{U} = \frac{A_o}{A_i}\frac{1}{h_i} + R_{f_i}\frac{A_o}{A_i} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + R_{f_o} + \frac{1}{h_o}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{2\pi r_o}{2\pi r_i}\frac{1}{h_i} + R_{f_i}\frac{2\pi r_o L}{2\pi r_i L} + \frac{2\pi r_o L \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + R_{f_o} + \frac{1}{h_o}$$

$$\frac{1}{U}=\frac{r_o}{r_i}\frac{1}{h_i}+R_{f_i}\frac{r_o}{r_i}+\frac{r_o}{k}\ln(r_o/r_i)+R_{f_o}+\frac{1}{h_o}$$

$$\frac{1}{U}=\left[\frac{(0.023/2)}{(0.02/2)}\right]\times\frac{1}{4500}+\left[\frac{(0.023/2)}{(0.02/2)}\right]\times 0.0004$$
$$+\frac{(0.023/2)}{355}\ln\left[\frac{(0.023/2)}{(0.02/2)}\right]+0.001+\frac{1}{1250}$$
$$=\underline{0.00252}$$
$$\therefore U=\underline{\underline{396.8}}\ W/m^2{}^\circ C$$

يتم توضيح المبادل الحراري في الشكل (11) أدناه.



شكل (11)

مساحة التبادل الحراري ، $A=\pi d_o L$

$$=\pi\times 0.023\times 2.4$$
$$=\underline{0.1734}\ m^2$$

$$LMTD,\theta_m=\frac{\theta_1-\theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)}$$
$$=\frac{(75-30)-(60-20)}{\ln\left[\frac{75-30}{60-20}\right]}=\frac{45-40}{\ln\left[\frac{45}{40}\right]}=\underline{42.45}°C$$

$$Q = UA\theta_m$$
$$= 396.8 \times 0.1734 \times 42.45 = \underline{\underline{2920.78W}}$$ ، معدَّل إنتقال الحرارة

2.14 المسألة (14): طول الأنبوب المطلوب

(The Required Length of the Tube)

في مبادل حراري متعاكس السريان مزدوج الأنبوب يسري ماء خلال أنبوب نحاسي بقطر خارجي 19mm وقطر داخلي 16mm بمعدَّل سريان 1.48m/s. يسري الزيت خلال الفجوة أو الحلقة الخارجية المكوّنة من أنبوب النحاس الداخلي وأنبوب الفولاذ الخارجي الذي قطره الخارجي 30mm وقطره الداخلي 26mm. يتم عزل أنبوب الفولاذ من الخارج. يدخل الزيت بمعدَّل 0.4kg/s ويتم تبريده من 65°C إلي 50°C بينما يدخل الماء عند 32°C. بتجاهل المقاومة الحرارية لجدار أنبوب النحاس، أحسب طول الأنبوب المطلوب.

FOR AUTHOR USE ONLY

البيانات المعطاة:-

$$Nu = 0.023\ (Re)^{0.8}\ (Pr)^{0.4}$$

عامل الإتساخ على جانب الماء. $= 0.0005 m^2K/W$

عامل الإتساخ على جانب الزيت. $= 0.0008 m^2K/W$

خواص الماء والزيت:-

الخاصية	الزيت	الماء
$\rho\ (kg/m^3)$	850	995
$c_p\ (kj/kgK)$	1.89	4.187
$k\ (W/mK)$	0.138	0.615
$\nu(m^2/s)$	7.44×10^{-6}	$\times 10^{-7}$ 4.18

الحل:-

الشكل (12) أدناه يوضِّح ترتيبة المبادل الحراري.

معطي:- القطر الداخلي لأنبوب النحاس $(d_i)_c = 16mm = 0.016m$

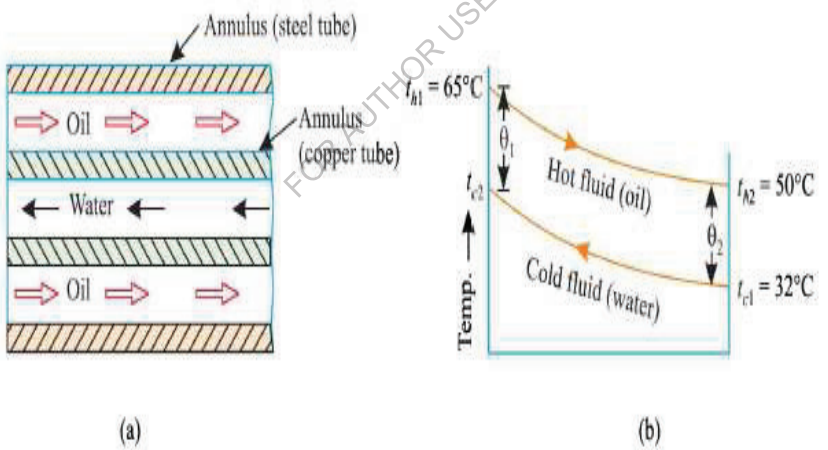
القطر الخارجي لأنبوب النحاس $(d_o)_c = 19mm = 0.019m$

القطـــر الداخلي لأنبوب الـــفولاذ $(d_i)_s = 26mm = 0.026m$

القطر الخارجي لأنبوب الـــفولاذ $(d_o)_s = 30mm = 0.03m$

$$t_{h_2} = 50°C \;\; ؛ t_{h_1} = 65°C \;\; ؛ t_{c_1} = 30°C$$

$$\dot{m}_c = \rho A v = 995 \times \frac{\pi}{4} \times 0.016^2 \times 1.48 = \underline{0.296}\ kg/s \; ; \; \dot{m}_h = 0.4 kg/s$$



FOR AUTHOR USE ONLY

شكل (12)

معدَّل إنتقال الحرارة، $Q = \dot{m}_h C_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c C_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$

$$= 0.4 \times 1.89 \times (65 - 50) = 0.296 \times 4.178 \times \left(t_{c_2} - 32\right)$$

$$\Rightarrow \qquad \therefore t_{c_2} = \underline{41}°C$$

$$Q = 0.4 \times 0.189 \times (65 - 50) = \underline{11.34} kW \quad ، \text{أيضاً}$$

خذ رقم رينولد لسريان ماء خلال أنبوب نحاسي،

$$\mathrm{Re} = \frac{4\dot{m}}{\pi (d_i)\mu}$$

$$\therefore \mathrm{Re} = \frac{4 \times 0.296}{\pi \times 0.016 \left(995 \times 4.18 \times 10^{-7}\right)} = \underline{56826} \quad ، \because (\mu = \rho\nu)$$

$$\text{أو} \quad \mathrm{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu} = \frac{1.48 \times 0.016}{4.18 \times 10^{-6}} = \underline{56826}$$

$$\mathrm{Nu} = 0.023 (\mathrm{Re})^{0.8} (\mathrm{Pr})^{0.4} \quad ، \text{الأن} \qquad \text{(معطي)}$$

$$Nu = 0.023 (56826)^{0.8} \left[\frac{\mu c_p}{k} \right]^{0.4}$$

$$= 0.023 (56826)^{0.8} \left[\frac{995 \times 4.18 \times 10^{-7} \times 4.187 \times 10^{3}}{0.615} \right] = 14$$

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\text{(بما أنَّ} \quad \mathrm{Pr} = \frac{\mu c_p}{k} \quad \text{ويتم تسخين الماء)}$$

$$Nu = \frac{h_i (d_i)_c}{k} = 14 \quad ، \text{أيضاً}$$

$$\text{أو} \quad h_i = \frac{14 \times 0.615}{0.016} = \underline{538.1} W / m^2 K$$

يسري الزيت خلال قطر حلقي، بالتالي القطر الهايدروليكي

$$d_h = (d_i)_s - (d_i)_c = 0.026 - 0.019 = \underline{0.007}\ m$$

رقم رينولد خلال الحلقة،

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v d_h}{\mu} = \frac{\rho\left[(d_i)_s - (d_o)_c\right]}{\mu} \times \frac{\dot{m}_h}{\frac{\pi}{4}\left[(d_i)_s^2 - (d_o)_c^2\right]\rho}$$

$$= \frac{4\dot{m}_h}{\pi\left[(d_i)_s + (d_o)_c\right]\mu} = \frac{4 \times 0.4}{\pi\left[(0.026 + 0.019)\right] \times 850 \times 7.44 \times 10^{-6}}$$

$$\approx \underline{1790}$$

بما أنَّ Re < 2500، بالتالي يكون السريان في الحلقة رقائقياً،

معامل إنتقال الحرارة عند السطح الداخلي للحلقة،

$$Nu = \frac{h_o d_h}{k} = 0.023(\mathrm{Re})^{0.8}(\mathrm{Pr})^{0.4}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu c_p}{k} = \frac{\left(850 \times 7.44 \times 10^{-6}\right) \times 1.89}{0.138} = \underline{0.0866}$$

$$\therefore \frac{h_o \times 0.007}{0.138} = 0.023(1790)^{0.8}(0.0866)^{0.4} = 3.46$$

أو $$h_o = \frac{3.46 \times 0.138}{0.007} = \underline{68.2}\ W/m^2K$$

معامل إنتقال الحرارة الإجمالي المؤسس على القطر الخارجي للأنبوب الداخلي يعطي بـ:-

$$U = \frac{1}{\frac{(r_o)_c}{(r_i)_c} \cdot \frac{1}{h_i} + \frac{(r_o)_c}{(r_i)_c} R_{f_i} + \frac{(r_o)_c}{k} \ln\left[\frac{(r_o)_c}{(r_i)_c}\right] + R_{f_o} + \frac{1}{h_o}}$$

$$= \frac{1}{\left[\frac{0.019}{0.016}\right] \times \frac{1}{538.1} + \left[\frac{0.019}{0.016}\right] \times 0.0005 + \frac{0.019}{0.615} \ln\left[\frac{0.019}{0.016}\right] + 0.0008 + \frac{1}{68.2}}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

$$= \frac{1}{0.00203 + 0.000594 + 0.005309 + 0.0008 + 0.01466}$$
$$= \underline{42.43}\ W/m^2K$$

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)} = \frac{\left(t_{h_1} - t_{c_2}\right) - \left(t_{h_2} - t_{c_1}\right)}{\ln\left[\frac{t_{h_1} - t_{c_2}}{t_{h_2} - t_{c_1}}\right]} =$$

$$= \frac{(65-41)-(50-32)}{\ln\left[\frac{65-41}{50-32}\right]} = \frac{24-18}{\ln\left[\frac{24}{18}\right]} = \underline{20.86}\,°C$$

معدَّل إنتقال الحرارة يعطي بـ،

$$Q = UA\theta_m = 42.43 \times (\pi \times 0.019 \times L) \times 20.86 = \underline{11.34 \times 10^3}\,W$$

$$\therefore L = \frac{Q}{A\theta_m} = \frac{11.34 \times 10^3}{42.43 \times (\pi \times 0.019) \times 20.86} = \underline{\underline{214.6}}\,m$$

FOR AUTHOR USE ONLY

2.15 المسألة (15): معدَّل تكثُّف البخار، متوسط معامل إنتقال الحرارة الإجمالي مؤسساً على مساحة السطح الداخلي ، عدد وحدات إنتقال الحرارة و فاعلية المكثِّف

(Rate of Vapor Condensation, Mean Overall Heat Transfer Coefficient based on Inside Surface Area, Number of Heat Transfer Units and Condenser Effectiveness)

بخار يتكثَّف عند الضغط الجوي على السطح الخارجي لأنابيب مكثِّف بخار. عدد الأنابيب 12 وكُلٍ منها بقطر 30mm و بطول 10m. درجات حرارة مدخل ومخرج ماء التبريد المنساب داخل الأنابيب هما 25°C و 60°C على الترتيب. إذا كان معدل السريان هو 1.1kg/s، أحسب الآتي:-

i/ معدَّل تكثُّف البخار.

ii/ متوسط معامل إنتقال الحرارة الإجمالي مؤسساً على مساحة السطح الداخلي.

iii/ عدد وحدات إنتقال الحرارة.

iv/ فاعلية المكثِّف.

الحل:-

معطي:- n = 12 ؛ d_i=30mm=0.03m ؛L = 10m ؛ $t_{c_1} = 25°C$ ؛ $t_{c_2} = 60°C$ ؛

$\dot{m}_w = \dot{m}_c = 1.1kg/s$ ؛ $t_{h_1} = t_{h_2} = 100°C$.

i/ الحرارة المكتسبة بواسطة الماء = الحرارة المفقودة من البخار

$$\dot{m}_s \times h_{fg} = \dot{m}_c \times c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

حيث h_{fg} هي الحرارة الكامنة للبخار عند الضغط الجوي = 2257 kj/kg. بتعويض القيَّم نحصل على:-

$$\dot{m}_s \times 2257 = 1.1 \times 4.187 \times (60 - 25)$$

أو $\dot{m}_s = \underline{0.0714} kg/s = \underline{\underline{257}} kg/h$

ii/ معدَّل إنتقال الحرارة الكلي يُعطي بـ،

$$Q = \dot{m}_c \times c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$
$$= 1.1 \times 4.187 \times 10^3 \times (60 - 25) = \underline{161199.5} J/s$$

أيضاً ، $Q = UA\theta_m$

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)}$$ ، حيث

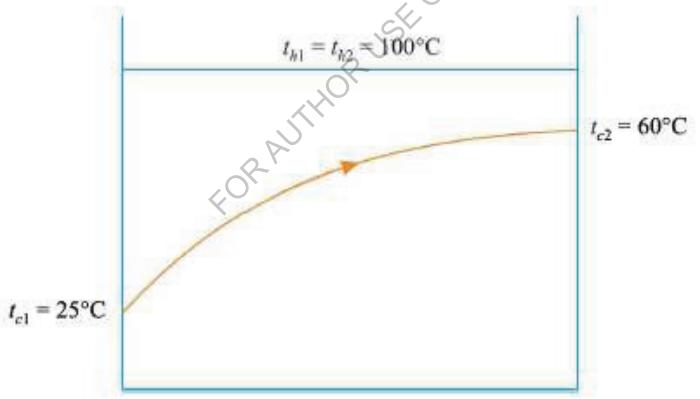
$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)} = \frac{(100-25)-(100-60)}{\ln\left[\frac{100-25}{100-60}\right]}$$

$$= \frac{75-40}{\ln\left[\frac{75}{40}\right]} = \underline{55.68}°C$$

و $A = \pi dLn = \pi \times 0.03 \times 10 \times 12 = \underline{11.31}\, m^2$

الشكل (13) أدناه يوضِّح تفاوت درجة الحرارة خلال المبادل الحراري.

FOR AUTHOR USE ONLY



شكل (13)

بالتعويض في المعادلة عاليه، نحصل على،

$$161199.5 = U \times 11.31 \times 55.68$$

أو $U = \underline{\underline{255.9}} W/m^2 °C$

iii/ عدد وحدات إنتقال الحرارة، NTU:

في مكثَّف، C_{max} ترجع إلي المائع الساخن الذي يبقي عند درجة حرارة ثابتة. بالتالي، C_{min} ترجع إلي الماء.

$$C_{\min} = \dot{m}c_c = 1.1 \times \left(4.187 \times 10^3\right) = \underline{4605.7} W/°C$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{255.9 \times 11.31}{4605.7} = \underline{\underline{0.628}}$$

iv/ فاعلية المكثَّف، $\in$:-

لمكثَّف ، $\in = 1 - e^{-NTU}$

أو $\in = 1 - e^{-0.628} = \underline{\underline{0.47}}$

FOR AUTHOR USE ONLY

2.16 المسألة (16): فاعلية المبادل الحراري، طول الأنبوب ومعدَّل تكثُّف البخار

(Heat Exchanger Effectiveness, Length of the Tube and Rate of Vapor Condensation)

بخار عند ضغط جوي يدخل غلاف مكثَّف سطحي يسري فيه ماء خلال مجموعة من أنابيب بقطر 25mm وبمعدَّل 0.05kg/s. درجات الحرارة لمدخل ومخرج الماء هما 15°C و 70°C على الترتيب. يحدث التكثُّف على السطح الخارجي للأنابيب. إذا كان معامل إنتقال الحرارة الإجمالي هو 230W/m^2°C، أحسب الآتي مستخدماً أسلوب عدد وحدات إنتقال الحرارة (NTU):-

i/ فاعلية المبادل الحراري.

ii/ طول الأنبوب.

iii/ معدَّل تكثُّف البخار.

خذ الحرارة الكامنة للتبخُّر عند 100°C = 2257kj/kg.

الحل:-

معطي:- d=25mm=0.025m؛ $\dot{m}_w = \dot{m}_c = 0.05kg/s$ ؛ $t_{c_1} = 15°C$ ؛

$U = 230W/m^2°C$ ؛ $t_{h_1} = 100°C$ ؛ $t_{c_2} = 70°C$

i/ فاعلية المبادل الحراري، ∈:-

خلال المكثَّف يبقي المائع الساخن(البخار) عند درجة حرارة ثابتة. بالتالي C_{max} قيمتها لا نهائية وعليه تكون C_{min} للمائع البارد (i.e. Water). عليه

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = 0$$

عندما $C_h > C_c$، بالتالي تُعطي الفاعلية بـ

$$\in = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{t_{c_2} - t_{c_1}}{t_{h_1} - t_{c_1}} = \frac{70-15}{100-15} = \underline{\underline{0.647}}$$

ii/ طول الأنبوب، L:-

$$C_{\min} = \dot{m}_c c_c = 0.05 \times 4.18 = \underline{0.209} kj/K$$

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = R = 0 \text{ ،}$$

$$\in = 1 - e^{-NTU}$$

أو $0.647 = 1 - e^{-NTU}$

FOR AUTHOR USE ONLY

$$e^{-NTU} = 1 - 0.647 = 0.353$$

$$-NTU \ln e = \ln 0.353$$

$$\therefore NTU = \frac{\ln 0.353}{-1} = \underline{1.04}$$

لكن ، $NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{U \times \pi dL}{C_{\min}}$

$$\text{Or} \quad L = \frac{NTU \times C_{\min}}{U \pi d} = \frac{1.04 \times \left(2.09 \times 10^3\right)}{230 \times \pi \times 0.025} = \underline{\underline{12}} m$$

iii/ معدَّل تكثُّف البخار، $\dot{m}_h$:-

مستخدماً موازنة الطاقة الإجمالية، نحصل على

$$\dot{m}_h . h_{fg} = \dot{m}_c \times c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

$$\dot{m}_h \times 2257 = 0.05 \times 4.18 (70 - 15)$$

$$or \ \dot{m}_h = \underline{0.00509} kg/s \quad or \ \underline{\underline{18.32}} \ kg/h$$

FOR AUTHOR USE ONLY

2.17 المسألة (17): معدَّل سريان كتلة الماء، فاعلية المبادل الحراري و مساحة السطح المطلوبة

(Water Mass Flow Rate, Heat Exchanger Effectiveness and the Required Surface Area)

يتم إستخدام مبادل حراري متعاكس السريان لتبريد 0.55kg/s (c_p = 2.45kj/kg°C) من الزيت من 115°C إلي 40°C بإستخدام الماء. درجات حرارة مدخل ومخرج ماء التبريد هما 15°C و

75°C على الترتيب. يتوقع أن يكون معامل إنتقال الحرارة الإجمالي مكافئاً لـ 1450W/m^2°C.

مستخدماً أسلوب عدد وحدات إنتقال الحرارة (NTU)، أحسب الآتي:-

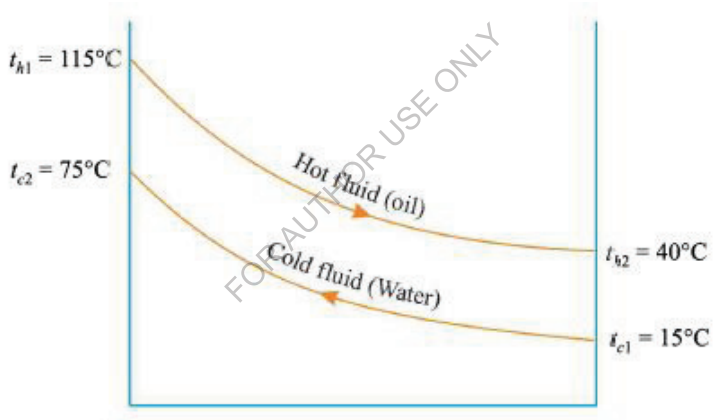
i/ معدَّل سريان كتلة الماء.

ii/ فاعلية المبادل الحراري.

iii/ مساحة السطح المطلوبة.

الحل:-

ترتيبة المبادل الحراري متعاكس السريان موضحة في الشكل (14) أدناه.



FOR AUTHOR USE ONLY

شكل (14)

معطي: $\dot{m}_{oil} = \dot{m}_h = 0.55kg/s$ ؛ $c_h = 2.45kj/kg°C$ ؛ $t_{h_1} = 115°C$ ؛

$t_{h_2} = 40°C$ ؛ $t_{c_1} = 15°C$ ؛ $t_{c_2} = 75°C$ ؛ $U = 1450W/m^2°C$.

i/ معدَّل سريان كتلة الماء، $\left(\dot{m}_c = \dot{m}_w\right)$:-

يمكن إيجاد معدَّل سريان كتلة الماء باستخدام موازنة الطاقة الإجمالية

$$\dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

$$0.55 \times 2.45(115 - 40) = \dot{m}_c \times 4.18(75 - 15)$$

$$\therefore \Rightarrow \dot{m}_c = \underline{\underline{0.4}}\, kg/s$$

ii/ فاعلية المبادل الحراري، $\in$:-

السعة الحرارية للسريان البارد (ماء)،

$$C_C = \dot{m}_c c_C = 0.4 \times 4.18 = \underline{1.672}\, kW$$

السعة الحرارية للسريان الساخن (زيت)،

$$C_h = \dot{m}_h c_h = 0.55 \times 2.45 = \underline{1.347}\, kW$$

بما أنَّ $C_c > C_h$، بالتالي فإنَّ فاعلية المبادل الحراري تُعطي بـ

$$\epsilon = \frac{Q_{act}}{Q_{max}} \frac{\text{الحرارة المنتقلة الفعلية}}{\text{الحرارة المنتقلة القصوى الممكنة}} = \frac{t_{h_1} - t_{h_2}}{t_{h_1} - t_{c_1}}$$

$$\therefore \in = \frac{115 - 40}{115 - 15} = \underline{\underline{0.75}}$$

iii/ مساحة السطح المطلوبة، A:-

$C_{max}=C_c=1.672kW$ و $C_{min}=C_h=1.347kW$

بالتالي،

$$R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{1.347}{1.672} = \underline{0.806}$$

لمبادل حراري متعاكس السريان،

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\in = \frac{1 - e^{-NTU(1-R)}}{1 - \mathrm{Re}^{-NTU(1-R)}}$$

بعد إعادة الترتيب، نحصل على،

$$\frac{\in -1}{(\in R - 1)} = e^{-NTU(1-R)}$$

أو $$\frac{0.75 - 1}{(0.75 \times 0.806 - 1)} = e^{-NTU(1-0.806)}$$

أو $$0.632 = e^{-0.194NTU}$$

أو $$\ln 0.632 = -NTU \times 0.194 \ln e$$

$$\therefore NTU = \underline{2.365}$$

أيضاً، $$NTU = \frac{UA}{C_{\min}}$$

أو $$2.365 = \frac{1450 \times A}{1.347 \times 10^3}$$

أو $$\Rightarrow A = \underline{\underline{2.197}}\ m^2$$

FOR AUTHOR USE ONLY

2.18 المسألة (18): درجة حرارة مخرج الماء لترتيبة سريان متعاكس وترتيبة سريان متوازي

(Exit Water Temperature for Counter Flow and Parallel Flow Heat Exchangers)

16.5kg/s من منتج عند 650°C (c_p=3.55kj/kg°C)، في محطة كيميائية يتم إستخدامه لتسخين 20.5kg/s من مائع داخل إلي المحطة عند 100°C(c_p=4.2kj/kg°C). إذا كان

معامل إنتقال الحرارة الإجمالي هو $0.95kW/m^2°C$ ومساحة سطح إنتقال الحرارة هي $44m^2$،

أحسب درجة حرارة مخرج الماء لترتيبة سريان متعاكس وترتيبة سريان متوازي.

الحل:-

معطي: $\dot{m}_h = 16.5kg/s$ ؛ $t_{h_1} = 650°C$ ؛ c_h=3.55kj/kg°C ؛ $\dot{m}_c = 20.5kg/s$

$t_{c_1} = 100°C$ ؛ $c_c = 4.2kj/kg°C$ ؛ $U = 0.95kW/m^2°C$ ؛ $A = 44m^2$.

درجات حرارة مخرج المائع:-

الحالة (1)، ترتيبة السريان المتعاكس:-

$C_h = \dot{m}_h \times c_h = 16.5 \times 3.55 = \underline{58.6}\ kW/K$ ، السعة الحرارية للمائع الساخن

$C_c = \dot{m}_c \times c_c = 20.5 \times 4.2 = \underline{86.1}\ kW/K$ ، السعة الحرارية للمائع البارد

$$R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{58.6}{86.1} = \underline{0.68}$$

$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{0.95 \times 44}{58.6} = \underline{0.71}$ ، عدد وحدات إنتقال الحرارة

قيمة $\in$ (الفاعلية) لترتيبة سريان متعاكس تُعطي بـ

$$\in = \frac{1 - e^{-NTU(1-R)}}{1 - \mathrm{Re}^{-NTU(1-R)}} = \frac{1 - e^{-0.71(1-0.68)}}{1 - 0.68 \times e^{-0.71(1-0.68)}} = \frac{0.2032}{0.4582} = \underline{0.443}$$

$$\in = \frac{C_h\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}$$ ، أيضاً

بما أنَّ السعة الحرارية للمائع الساخن هي الأدنى، نحصل على

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\in = \frac{t_{h_1} - t_{h_2}}{t_{h_1} - t_{c_1}} = \frac{650 - t_{h_2}}{650 - 100} = \underline{0.443}$$

أو $t_{h_2} = 650 - 0.443(650 - 100) = \underline{406.35}°C$

أيضاً ، $\in = \frac{C_c\left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}$

$$0.443 = \frac{86.1(t_{c_2} - 100)}{58.6(650 - 100)} = 0.002671(t_{c_2} - 100)$$

$$\therefore t_{c_2} = \underline{\underline{265.8}}°C$$

الحالة (2):- ترتيبة السريان المتوازي:-

قيمة $\in$ لترتيبة السريان المتوازي تُعطي بـ

$$\in = \frac{1 - e^{-NTU(1+R)}}{1 + R}$$

$$= \frac{1 - e^{-0.71(1+0.68)}}{1 + 0.68} = \frac{1 - e^{-1.1928}}{1.68} = \underline{0.415}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

أيضاً ، $\in = \frac{C_c\left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}$

أو $0.415 = \frac{86.1(t_{c_2} - 100)}{58.6(650 - 100)} = 0.002671(t_{c_2} - 100)$

أو $\therefore t_{c_2} = \underline{\underline{255.4}}°C$

2.19 المسألة (19): درجة حرارة مخرج الزيت والماء، و درجة الحرارة القصوى الممكنة لمخرج الماء

(Exit Temperature and Maximum Possible Temperature of Exit)

زيت (c_p=3.6kj/kg°C) عند 100°C يسري بمعدَّل 30,000kg/h ويدخل إلي مبادل حراري متوازي السريان. ماء تبريد(c_p=4.2kj/kg°C) يدخل المبادل الحراري عند 30°C بمعدَّل 50,000kg/h. مساحة إنتقال الحرارة هي $10m^2$ و $U=1000W/m^{2}°C$.

أحسب الآتي:-

i/ درجة حرارة مخرج الزيت والماء.

ii/ درجة الحرارة القصوى الممكنة لمخرج الماء.

الحل:-

الشكل (15) أدناه يوضِّح ترتيبة التوازي للحالتين.

معطي: $\dot{m}_{oil} = \dot{m}_h = \frac{30{,}000}{3600} = 8.333 kg/s$ ؛ c_h=3.6kj/kg°C ؛ $t_{h_1} = 100°C$ ؛

$\dot{m}_{water} = \dot{m}_c = \frac{50{,}000}{3600} = 13.89 kg/s$ ؛ c_c = 4.2kj/kg°C ؛ $t_{c_1} = 10°C$ ؛

$A = 10m^2$ ؛ $U = 100W/m^{2}°C$.

i/ درجات حرارة مخرج الزيت والماء، t_{h_2} ، t_{c_2} :-

$$C_h = \dot{m}_h c_h = 8.333 \times \left(3.6 \times 10^3\right) = 30 \times 10^3 \quad = C_{\min}$$

$$C_c = \dot{m}_c c_c = 13.89 \times \left(4.2 \times 10^3\right) = 58.34 \times 10^3 = C$$

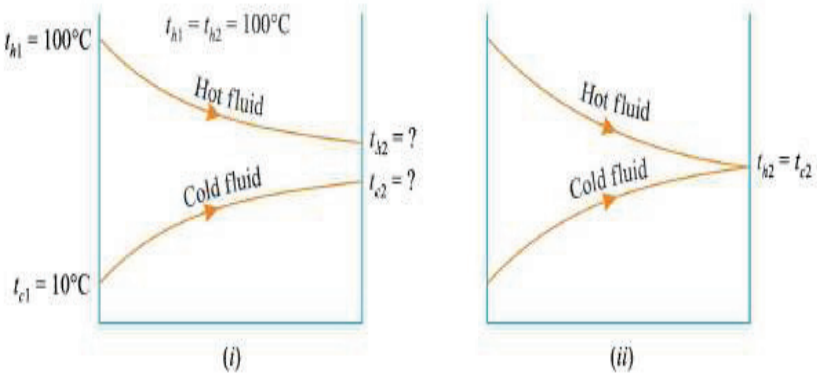
$$R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{30 \times 10^3}{58.34 \times 10^3} = \underline{0.514}$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{1000 \times 10^3}{30 \times 10^3} = \underline{0.33}$$

لمبادل حراري متوازي السريان،

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\in = \frac{1-e^{-NTU(1+R)}}{1+R} = \frac{1-e^{-0.33(1+0.514)}}{1+0.514} = \frac{1-e^{-0.33\times1.514}}{1.514} = \underline{0.26}$$



شكل (15)

FOR AUTHOR USE ONLY

أيضاً ، $\in = \frac{C_h\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} = \frac{C_c\left(t_{c_2} - t_{c1}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}$

أو $0.26 = \frac{30\times10^3\left(100 - t_{h_2}\right)}{30\times10^3\left(100-10\right)} = \frac{58.34\times10^3\left(t_{c_2} - 10\right)}{30\times10^3\left(100-10\right)}$

أو $0.26 = \left[\frac{100 - t_{h_2}}{100-10}\right] = 1.945\left[\frac{t_{c_2} - 10}{100-10}\right]$

$$\therefore t_{h_2} = 100 - 0.26\times90 = \underline{\underline{76.6}}°C$$

و $$\therefore t_{c_2} = \frac{0.26\times90}{1.945} + 10 = \underline{\underline{22}}°C$$

ii/ درجة الحرارة القصوى الممكنة لمخرج الماء، t_{c_2} :-

عندما يمتلك الماء أقصى درجة حرارة ممكنة فإنَّ،

$$t_{h_2} = t_{c_2}$$

$$\dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{c_2}\right) = \dot{m}_c c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right) \quad \because t_{h_2} = t_{c_2}$$

أو $30\times10^3 \times \left(100 - t_{c_2}\right) = 58.34\times10^3 \times \left(t_{c_2} - 10\right)$

أو $100 - t_{c_2} = 1.945\times\left(t_{c_2} - 10\right) = 1.945 t_{c_2} - 19.45$

$\Rightarrow t_{c_2} = \underline{\underline{40.5}}\,°C$

2.20 المسألة (20): درجات حرارة مخرج المائع الساخن ومدخل المائع البارد

(Temperatures of Exit Hot Fluid and Inlet Cold Fluid)

يتم إعطاء البيانات التالية لمبادل حراري متعاكس السريان:-

$\dot{m}_h = 1kg/s$ ؛ $\dot{m}_c = 0.25kg/s$

c_h=1.045kj/kg°C ؛ c_c = 4.18kj/kg°C

$t_{h_1} = 1000°C$ ؛ $t_{c_2} = 850°C$

U = 88.5W/m²°C ؛ A = 10m²

أحسب t_{h_2} و t_{c_1}

الحل:-

الشكل (16) أدناه يوضِح ترتيبة السريان المتعاكس.

$$C_h = \dot{m}_h c_h = 1\times\left(1.045\times10^3\right) = \underline{1045}\,W/°C$$
$$C_c = \dot{m}_c c_c = 0.25\times\left(4.18\times10^3\right) = \underline{1045}W/°C$$

$$\therefore C_{\min} = C_{\max} = C_h = C_c = \underline{1045}W/°C$$

تعطي الفعالية ∈ بالعلاقة،

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\in = \frac{C_c\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} = \frac{C_c\left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}$$

$$\text{or } \in = \frac{t_{h_1} - t_{h_2}}{t_{h_1} - t_{c_1}} = \frac{t_{c_2} - t_{c_1}}{t_{h_1} - t_{c_1}} \qquad \text{(i)}$$

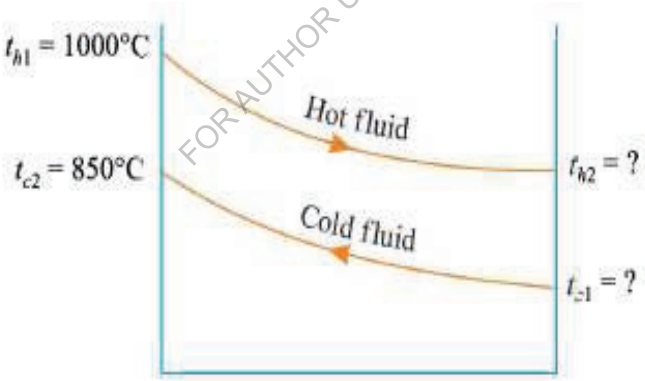
$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{88.5 \times 10}{1045} = \underline{0.85}$$

$$R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = 1$$

عندما R =1 ،

$$\in = \frac{NTU}{1 + NTU} = \frac{0.85}{1.85} = \underline{0.46}$$

FOR AUTHOR USE ONLY



شكل (16)

بتعويض هذه القيمة في المعادلة (i) نحصل على

$$0.46 = \frac{1000 - t_{h_2}}{1000 - t_{c_1}} = \frac{850 - t_{c_1}}{1000 - t_{c_1}}$$

$$\text{Or} \quad 0.46 = \frac{850 - t_{c_1}}{1000 - t_{c_1}}$$

$$0.46(1000 - t_{c_1}) = 850 - t_{c_1}$$

$$460 - 0.46t_{c_1} = 850 - t_{c_1}$$

$$0.54t_{c_1} = 390 \qquad \therefore t_{c_1} \approx \underline{\underline{722}}°C$$

$$or \quad 0.46 = \frac{1000 - t_{h_2}}{1000 - 722}$$

$$or \Rightarrow t_{h_2} = \underline{\underline{872}}°C$$

2.21 المسألة (21): معدَّل إنتقال الحرارة الكلي

(Total Rate of Heat Transfer)

FOR AUTHOR USE ONLY

ماء (c_p=4200J/kg°C) يدخل إلي مبادل حراري مزدوج الأنبوب متعاكس السريان عند 38°C بمعَّدل 0.075kg/s. يتم تسخينه بزيت (c_p=1880J/kg°C) يسري بمعَّدل 0.152kg/s من درجة حرارة مدخل مقدارها 116°C. لمساحة مقدارها $1m^2$ و $U=340W/m^2°C$، حدَّد معدَّل إنتقال الحرارة الكلي.

الحل:-

معطي: $\dot{m}_w = \dot{m}_c = 0.076kg/s$ ؛ $c_c = 4200J/kg°C$ ؛ $t_{c_1} = 38°C$ ؛

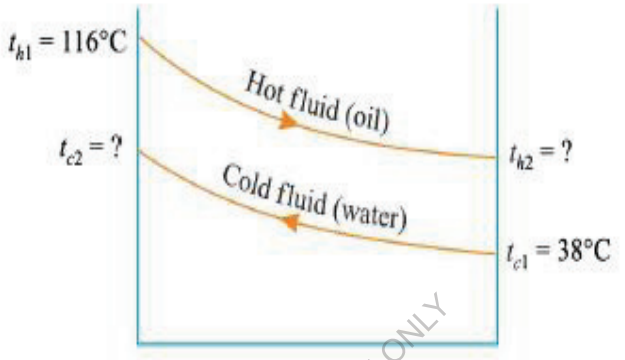
$\dot{m}_{oil} = \dot{m}_h = 0.152kg/s$ ؛ $c_h = 1880J/kg°C$ ؛ $t_{h_1} = 116°C$ ؛ $A = 1m^2$ ؛

$U = 340W/m^2°C$ ؛

معدَّل إنتقال الحرارة الكلي، Q:-

بما أن درجات حرارة مخرج كلا المائعين غير معلومة بالتالي يجب إستخدام أسلوب عدد وحدات إنتقال الحرارة لحل هذه المسألة.

الشكل (17) أدناه يوضِّح ترتيبة المبادل الحراري.



شكل (17)

FOR AUTHOR USE ONLY

الفاعلية $\in$ لمبادل حراري تُعطي بـ

$$\in = \frac{C_c\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} = \frac{C_c\left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} \qquad \text{(i)}$$

$$C_h = \dot{m}_h c_h = 0.152 \times 1880 = \underline{285.8}\ W/°C = C_{\min}$$

$$C_c = \dot{m}_c c_c = 0.076 \times 4200 = \underline{319.2} W/°C = C_{\max}$$

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = R = \frac{285.8}{319.2} = \underline{0.895}$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{340 \times 1}{285.8} = \underline{1.19}$$

لمبادل حراري متعاكس السريان،

$$\in = \frac{1-e^{-NTU(1-R)}}{1-\mathrm{Re}^{-NTU(1-R)}} = \frac{1-e^{-1.19(1-0.895)}}{1-0.895e^{-1.19(1-0.895)}} = \frac{0.117459}{0.210126} = \underline{0.56}$$

بتعويض القيَّم في المعادلة (i) نحصل على

$$0.56 = \frac{285.8(116-t_{h_2})}{285.8(116-38)} = \frac{319.2(t_{c_2}-38)}{285.8(116-38)}$$

أو $$0.56 = \frac{116-t_{h_2}}{116-38} = 1.117\left[\frac{t_{c_2}-38}{116-38}\right]$$

$$\therefore -t_{h_2} = (116-38)0.56-116 = -72.23$$

$$\therefore t_{h_2} = \underline{\underline{72.23}}°C \approx 75\ °C$$

و$$t_{c_2} = \frac{0.56(116-38)}{1.117} + 38 = \underline{\underline{77.1}}°C \approx 75°C$$

معدَّل إنتقال الحرارة الكلي يُعطي بـ

$$Q = UA\theta_m$$

$$\theta_m = \frac{\theta_1-\theta_2}{\ln(\theta_1/\theta_2)} = \frac{(t_{h_1}-t_{c_2})-(t_{h_2}-t_{c_1})}{\ln[(t_{h_1}-t_{c_2})/(t_{h_2}-t_{c_1})]}$$

$$= \frac{(116-75)-(75-38)}{\ln[(116-75)/(75-38)]} = \frac{41-37}{\ln[41/37]} \approx \underline{39}°C$$

$$Q = 340\times1\times39 = 13260W = \underline{\underline{13.26}}\ kW$$

2.22 المسألة (22): معدَّل إنتقال الحرارة في حالة أنَّ المائعان غير مختلطان

(Rate of Heat Transfer in Case of Unmixed Fluids)

FOR AUTHOR USE ONLY

إرتفاع درجة الحرارة الكلي للمائع البارد في مبادل حراري متعاكس السريان هو 20°C وهبوط درجة الحرارة الكلي للمائع هو 30°C. فاعلية المبادل الحراري هي 0.6. مساحة المبادل الحراري $1m^2$ ومعامل إنتقال الحرارة الإجمالي هو $60W/m^2°C$. أوجد معدَّل إنتقال الحرارة. إفترض أنَّ المائعان غير مختلطان.

الحل:-

معطي: $t_{c_2} - t_{c_1} = 20°C$ ؛ $t_{h_1} - t_{h_2} = 30°C$ ، $\in = 0.6$ ؛ $A = 1m^2$ ؛

$U = 60W/m^2°C$.

معدَّل إنتقال الحرارة، Q:-

الحرارة المكتسبة بواسطة المائع البارد = الحرارة المفقودة بواسطة المائع الساخن

$$\dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

$$\therefore \frac{\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)}{\left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)} = \frac{\dot{m}_c c_c}{\dot{m}_h c_h} = \frac{30}{20} = \underline{1.5}$$

$$\therefore \dot{m}_h c_h = C_{\min}\text{، } \dot{m}_c c_c = C_{\max}$$

$$R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{1}{1.5} = \underline{0.67}$$

لمبادل حراري متعاكس السريان،

$$\in = \frac{1 - e^{-NTU(1-R)}}{1 - \mathrm{Re}^{-NTU(1-R)}}$$

$$0.6 = \frac{1 - e^{-NTU(1-0.67)}}{1 - 0.67e^{-NTU(1-0.67)}} = \frac{1 - e^{-NTU(0.33)}}{1 - 0.67e^{-NTU(0.33)}}$$

$$0.6 - 0.402e^{-0.33NTU} = 1 - e^{-0.33NTU}$$

FOR DISTRIBUTION USE ONLY

$$-0.4 = -0.598e^{-0.33NTU}$$

$$0.4 = 0.598e^{-0.33NTU}$$

$$e^{-0.33NTU} = \frac{0.4}{0.598} = 0.6689$$

$$-0.33NTU \ln e = \ln 0.6689$$

$$NTU = \frac{\ln 0.6689}{-0.33} \approx \underline{1.22}$$

لكن ، $NTU = \dfrac{UA}{C_{\min}}$

$$\therefore C_{\min} = \frac{UA}{NTU} = \frac{60 \times 1}{1.22} = \underline{49.18} = C_h;$$

$$C_{\max} = \frac{C_{\min}}{0.67} = \frac{49.18}{0.67} = \underline{73.4} = C_c;$$

$$\therefore Q = \dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = C_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)$$

$$= 49.18 \times (30) = \underline{\underline{1475.4}} W$$

FOR AUTHOR USE ONLY

2.23 المسألة (23): إشتقاق تعبير لفاعلية المبادل الحراري متعاكس السريان

(Derivation of a Mathematical Expression for Counter Flow Heat Exchanger)

عرَّف المصطلحات الآتية:- عدد وحدات إنتقال الحرارة والفاعلية.

إشتق تعبيراً لفاعلية مبادل حراري متعاكس السريان بدلالات NTU ونسبة السعة R .

2.24 المسألة (24): معدَّل إنتقال الحرارة و درجة حرارة مخرج المائع

(Rate of Heat Transfer and Fluid Exit Temperature)

مائعان A و B يتبادلان حرارة في مبادل حراري متعاكس السريان. يدخل المائع A عند 420°C وله معدَّل سريان كتلة مقداره 1kg/s. يدخل المائع B عند 20°C وله معدَّل سريان كتلة مقداره 1kg/s. فاعلية المبادل الحراري هي 75%. حدِّد:-

i/ معدَّل إنتقال الحرارة.

ii/ درجة حرارة مخرج المائع B.

الحرارة النوعية للمائع A هي 1kj/kgK وتلك للمائع B هي 4kj/kgK.

الحل:-

معطي: $\dot{m}_h = 1kg/s \; ; t_{h_1} = 420°C$

$\dot{m}_c = 1kg/s \; ; t_{c_1} = 20°C$

$c_c = 4kj/kgK \; ; c_h = 1kj/kgK \; ; \in = 0.75$

i/ معدَّل إنتقال الحرارة، Q:-

الفاعلية ، $\in = \dfrac{C_h\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} = \dfrac{t_{h_1} - t_{h_2}}{t_{h_1} - t_{c_1}} \left(\because C_h = \dot{m}_h c_h = 1\times 1 = 1 = C_{\min}\right)$

أو $0.75 = \dfrac{420 - t_{h_2}}{420 - 20}$

أو $\Rightarrow t_{h_2} = \underline{120}°C$

$\in = \dfrac{Q_{act}}{Q_{\max}}; \quad Q_{act} = \in Q_{\max} = \in C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)$

$= 0.75 \times \dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)$

FOR AUTHOR USE ONLY

$$= 0.75 \times 1 \times 1 \times (420 - 20)$$

$$= \underline{\underline{300}}\ kJ$$

ii/ درجة حرارة مخرج المائع B، t_{c_2} :-

$$Q = \dot{m}_c c_c \left(t_{c_2} - t_{c_2}\right)$$

أو $\quad 300 = 1 \times 4 \left(t_{c_2} - 20\right)$

أو $\quad \Rightarrow t_{c_2} = \underline{\underline{95}}\,°C$

2.25 المسألة (25): درجة حرارة مخرج الماء

(Exit Water Temperature)

FOR AUTHOR USE ONLY

ماء بمعدَّل 0.5kg/s يتم دفعه قسرياً خلال أنبوب ناعم بقطر داخلي 25mm وبطول 15m. درجة حرارة مدخل الماء هي 10°C ويكون جدار الأنبوب عند درجة حرارة ثابتة مقدارها 40°C. ما هي درجة حرارة مخرج الماء؟

القيَّم المتوسطة لخواص الماء هي:-

$$k = 0.57 W/m°C \ ؛\ \mu = 0.8 \times 10^{-3}\ Pas \ ؛\ c_p = 4180 J/kg°C .$$

الحل:-

معطي: t_s=40°C ؛ t_i=10°C ؛ L=15m ؛d=25mm=0.025m ؛ $\dot{m}_w = 0.5kg/s$

$$k = 0.57 W/m°C \ ؛\ \mu = 0.8 \times 10^{-3}\ Pas \ ؛\ c_p = 4180 J/kg°C .$$

درجة حرارة مخرج الماء، t_o:-

نعلم أنَّ $\quad \dot{m} = \rho Q$

أو $\dot{m} = \rho A v$

$$\therefore v = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{0.5}{10^3 \times \frac{\pi}{4}(0.025)^2} = \underline{1.068} m/s$$

$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{10^3 \times 1.086 \times 0.025}{0.8 \times 10^{-3}} = \underline{3.183 \times 10^4}$ ، رقم رينولد

i.e.، يكون السريان مضطرباً بما أنَّ (Re > 2300).

بإستخدام العلاقة،

$$Nu = 0.023(\text{Re})^{0.8}(\text{Pr})^{1/3}$$

For ($t_s > t_f$)

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{k} = \frac{0.8 \times 10^{-3} \times 4180}{0.57} = \underline{5.867}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

بتعويض القيَّم في المعادلة عاليه، نحصل على

$$Nu = \frac{hd}{k} = 0.023(3.183 \times 10^4)^{0.8} \times (5.867)^{1/3} = \underline{165.9}$$

أو $h = \frac{Nu.k}{d} = \frac{165.9 \times 0.57}{0.025} = \underline{3785} W/m^2 °C$

$A = \pi dL = \pi \times 0.025 \times 15 = \underline{1.1781} m^2$ ، مساحة إنتقال الحرارة

بما أنَّ درجة حرارة السطح ثابتة،

$$C_{\min} = C_{water} = \dot{m}_w c_w = 0.5 \times 4180 = \underline{2090} W/°C$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{hA}{C_{\min}} = \frac{3785 \times 1.1781}{2090} = \underline{2.133}$$

الفاعلية ، $\in = 1 - e^{-NTU}$

$$= 1 - e^{-2.133} = \underline{0.8815}$$

الآن ، $\in = \left[\frac{t_o - t_i}{t_s - t_i}\right] = \frac{t_o - 10}{40 - 10}, \therefore \Rightarrow t_o = \underline{\underline{36.44}}°C$

2.26 المسألة (26): مساحة إنتقال الحرارة المطلوبة و عدد وحدات إنتقال الحرارة

(Required Heat Transfer Surface Area and Number of Heat Transfer Units)

مبادل حراري متعاكس السريان يقوم بتسخين هواء يدخل عند 400°C بمعدَّل سريان 6kg/s عن طريق غاز عادم يدخل عند 800°C بمعدَّل سريان 4kg/s. معامل إنتقال الحرارة الإجمالي هو 100W/m^{2}K ودرجة حرارة مخرج الهواء هي 551.5°C. الحرارة النوعية عند ضغط ثابت لكل من الهواء وغاز العادم يمكن أخذها كـ 1100J/kgK. أحسب:

i/ مساحة إنتقال الحرارة المطلوبة.

ii/ عدد وحدات إنتقال الحرارة.

FOR AUTHOR USE ONLY

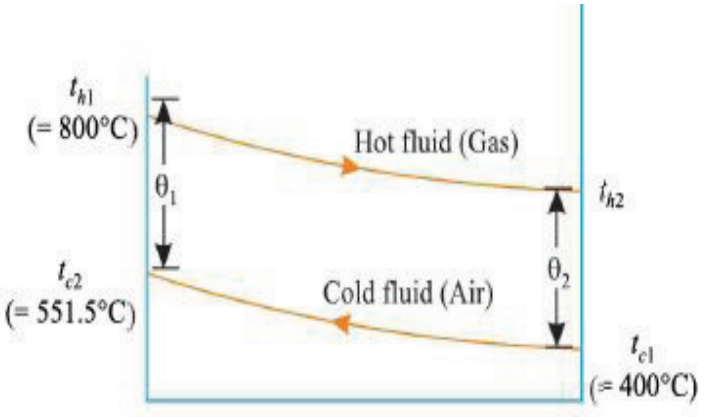
الحل:-

معطي:-

$\dot{m}_c = 6kg/s$ ؛ $t_{c_1} = 400°C$ ؛ $t_{c_2} = 551.5°C$ ؛ $t_{h_1} = 800°C$ ؛ $\dot{m}_h = 4kg/s$ ؛

U = 100W/m^{2}K ؛ $c_c = 1100J/kgK$.

الشكل (18) أدناه يوضِّح ترتيبة المبادل الحراري.



شكل (18)

الآن،

$$C_c = \dot{m}_c c_c = 6 \times 1100 = 6600$$

$$C_h = \dot{m}_h c_h = 4 \times 1100 = 4400$$

عليه، بما أنَّ $C_h < C_c$

$$\therefore C_{\min} = C_h = 4400$$

FOR AUTHOR USE ONLY

الآن، الحرارة المنتقلة إلي الماء البارد = الحرارة المنتقلة من الغازات الساخنة

$$\therefore Q = \dot{m}_c c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right) = \dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)$$
$$= 6600(551.5 - 400) = 4400(800 - t_{h_2})$$
$$\Rightarrow Q = 999{,}900J \quad \text{و} \quad t_{h_2} = \underline{572.75}°C$$

i/ مساحة الحرارة المطلوبة، A:-

$$Q = UA\theta_m$$

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)} = \frac{\left(t_{h_1} - t_{c_2}\right) - \left(t_{h_2} - t_{c_1}\right)}{\ln\left\{\frac{\left(t_{h_1} - t_{c_2}\right)}{\left(t_{h_2} - t_{c_1}\right)}\right\}} =$$

$$= \frac{(800-551.5)-(572.75-400)}{\ln\left[\frac{800-551.5}{572.75-400}\right]} = \frac{75.75}{0.3636} = \underline{208.33}°C$$

بتعويض القيم المختلفة نحصل على،

$$999900 = 100 \times A \times 208.33$$
$$\therefore \Rightarrow A = \underline{\underline{48}} m^2$$

ii/ عدد وحدات إنتقال الحرارة، (NTU):-

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{100 \times 48}{4400} = \underline{\underline{1.09}}$$

2.27 المسألة (27): فاعلية المبادل الحراري و درجة حرارة مخرج الماء والمادة الكيميائية (Heat Exchanger Effectiveness and Exit Temperatures of Water and Chemical Material)

FOR AUTHOR USE ONLY

مادة كيميائية بحرارة نوعية مقدارها 3.3kj/kgK تسري بمعدَّل 20,000kg/h لتدخل مبادل حراري متوازي السريان عند 120°C. معدَّل سريان كتلة ماء التبريد هو 50,000kg/h بدرجة حرارة مدخل مقدارها 20°C. مساحة إنتقال الحرارة هي $10m^2$ ومعامل إنتقال الحرارة الإجمالي هو $1050W/m^2K$.

أوجد:-

i/ فاعلية المبادل الحراري.

ii/ درجة حرارة مخرج الماء والمادة الكيميائية.

الحل:-

الشكل (19) أدناه يوضِّح توزيع درجات الحرارة على امتداد طول المبادل الحراري.

معطي:- $C_h = 3.3kj/kgK$ ؛ $\dot{m}_h = \frac{20{,}000}{3600} = 5.56kg/s$ ؛ $t_{h_1} = 120°C$ ؛

A=10 m^2 ؛ $t_{c_1} = 20°C$ ؛ $C_c = 4.18kj/kgK$ ؛ $\dot{m}_c = \frac{50{,}000}{3600} = 13.89kg/s$ ؛

.U = 1050W/m^2K

i/ فاعلية المبادل الحراري، ∈:-

$C_h = \dot{m}_h c_h = 5.56 \times 3.3 = \underline{18.36}$ ، السعة الحرارية للمائع الساخن.

$C_c = \dot{m}_c c_c = 13.89 \times 4.186 = \underline{58.14}$ ، السعة الحرارية للمائع البارد.

عليه فإنَّ $C_h < C_c$

الحرارة المكتسبة بواسطة المائع البارد = الحرارة المفقودة بواسطة المائع الساخن

$$\therefore 5.56 \times 3.3(120 - t_{h2}) = 13.89 \times 4.186(t_{c2} - 20)$$

أو $(120 - t_{h_2}) = 3.17(t_{c_2} - 20)$ (i)

الآن ، $NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{1050 \times 10}{18.36 \times 10^3} = \underline{0.572}$

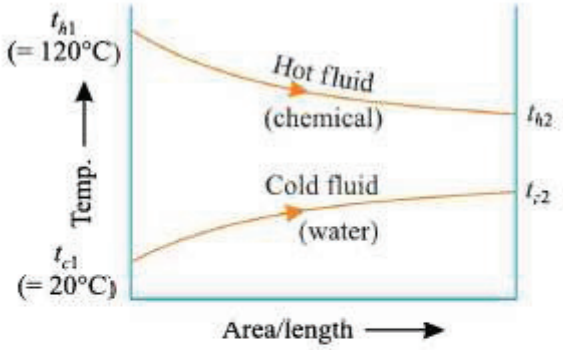
الفاعلية ، $\in = \frac{1 - e^{-NTU(1+R)}}{1+R}$

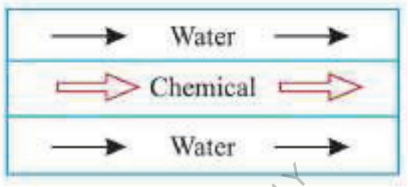
نسبة السعة الحرارية ، $R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{18.36}{58.14} = \underline{0.316}$

$$\in = \frac{1 - e^{-0.572(1+0.316)}}{1+0.316} = \frac{1 - 0.471}{1.316} = \underline{\underline{0.402}}$$

ii/ درجات حرارة مخرج الماء (t_{c2}) ومخرج المادة الكيميائية (t_{h2})

FOR AUTHOR USE ONLY





شكل (19)

FOR AUTHOR USE ONLY

أيضاً ، $\in = \dfrac{C_h\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}$

أو $0.402 = \dfrac{120 - t_{h_2}}{120 - 20}$

أو $t_{h_2} = \underline{\underline{79.8}}\,°C$

بتعويض قيمة $t_{h_2} = 79.8°C$ في المعادلة (i) ، نحصل على

$$(120 - 79.8) = 3.17\left(t_{c_2} - 20\right)$$

$$\therefore t_{c_2} = \underline{\underline{32.7}}\,°C$$

2.28 المسألة (28): مساحة المبادل الحراري، ودرجات حرارة مخرج الموائع الساخنة والباردة إذا تمَّ مضاعفة معدَّل سريان كتلة الماء الساخن

(Heat Exchanger Surface Area, Hot and Cold Fluids Exit Temperatures when the Rate of the Hot Water Mass Flow is doubled)

مبادل حراري متوازي السريان بسريانات ساخنة وباردة تجرى خلاله حسب البيانات التالية:-

$\dot{m}_h = 10kg/\min.$ ؛ $\dot{m}_c = 25kg/\min.$ ؛ $C_h = C_c = 4.18kj/kgK$ ؛ $t_{h_1} = 70°C$ ؛

$t_{c_1} = 25°C$ ؛ $t_{h_2} = 50°C$.

معامل إنتقال الحرارة المفرد على كلا الجانبين = $60W/m^2°C$. أحسب الآتي:-

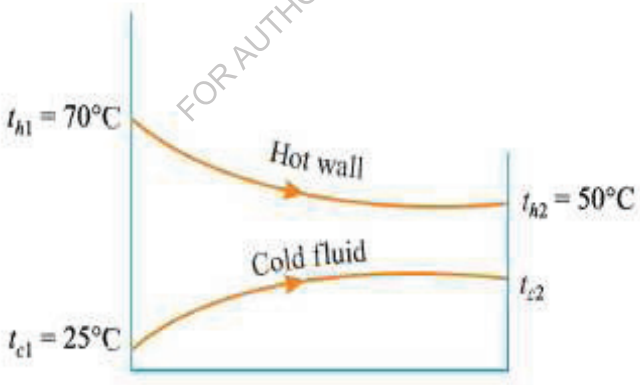
i/ مساحة المبادل الحراري؛

ii/ درجات حرارة مخرج الموائع الساخنة والباردة إذا تمَّ مضاعفة معدَّل سريان كتلة الماء الساخن.

الحل:-

يوضِّح الشكل (20) أدناه ترتيبة المبادل الحراري.

FOR AUTHOR USE ONLY



شكل (20)

i/ مساحة المبادل الحراري، A:-

الحرارة المفقودة بواسطة المائع الساخن = الحرارة المكتسبة بواسطة المائع البارد

$$\therefore \dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

$$10 \times 4.18(70-50) = 25 \times 4.18\left(t_{c_2} - 25\right)$$

$$\text{أو} \quad \Rightarrow t_{c_2} = \underline{33}°C$$

متوسط فرق درجة الحرارة اللوغاريثمي،

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln(\theta_1 / \theta_2)} = \frac{\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right) - \left(t_{h_2} - t_{c_2}\right)}{\ln\left[\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)/\left(t_{h_2} - t_{c_2}\right)\right]}$$

$$= \frac{(70-25)-(50-33)}{\ln[(70-25)/(50-33)]} = \frac{45-17}{\ln[(45/17)]} = \underline{28.8}°C$$

معامل إنتقال الحراري الإجمالي يُعطي بـ،

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} = \frac{h_o + h_i}{h_o h_i}$$

$$\text{أو} \qquad ، U = \frac{h_o h_i}{h_o + h_i} = \frac{60 \times 60}{60+60} = \underline{30} W/m^2 °C$$

$$\text{أيضاً ،} \quad Q = \dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = UA\theta_m$$

$$\text{أو} \qquad \frac{10}{60} \times 4.18 \times (70-50) = 30 \times A \times 28.8$$

$$\therefore A = \frac{10 \times 4.18 \times (70-50)}{60 \times 30 \times 28.8} = \underline{\underline{0.0161}} m^2$$

ii/ درجات حرارة الموائع الساخنة والباردة t_{h_2} و t_{c_2} :-

عندما يتم زيادة $\dot{m}_h$ من 10kg/min إلى h_i 20kg/min ستصبح h'_i (باعتبار أنَّ المائع الساخن بالداخل).

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\frac{h'_i}{h_i} = \left(\frac{20}{10}\right)^{0.8} = 1.74$$

$$\therefore h'_i = 60 \times 1.74 = \underline{104.4} W/m^2 °C$$

$$C_h = \dot{m}_h c_h = \frac{20}{60} \times 4.18 = \underline{1.39} = C_{\min}$$

$$C_c = \dot{m}_c c_c = \frac{25}{60} \times 4.18 = \underline{1.74} = C_{\max}$$

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{1.39}{1.74} = 0.799$$

$$U = \frac{h_o h'_i}{h_o + h'_i} = \frac{60 \times 104.4}{60 + 104.4} = \underline{38.1} W/m^2 °C$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{38.1 \times 0.0161}{1.39} = \underline{0.44}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

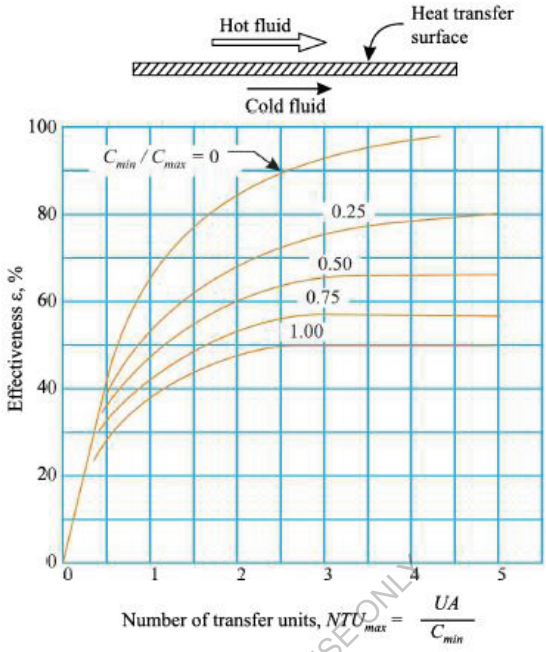
القيمة المحسوبة من $\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = 0.799$ و NTU=44، من الشكل (A)، نحصل على

$$\in \approx 0.3$$

أيضاً, $$\in = \frac{C_h\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} = \frac{C_c\left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}$$

او $$0.31 = \frac{1.39\left(70 - t_{h_2}\right)}{1.39\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} = \frac{1.74\left(t_{c_2} - 25\right)}{1.39\left(70 - 25\right)}$$

أو $$0.31 = \frac{70 - t_{h_2}}{70 - 25} = 1.25\left[\frac{t_{c_2} - 25}{70 - 25}\right]$$



شكل (A)

$$\therefore t_{h_2} = 70 - 0.31(70-25) = \underline{\underline{56.05}}°C$$

و $t_{c_2} = \dfrac{0.31(70-25)}{1.25} + 25 = \underline{\underline{36.16}}°C$

FOR AUTHOR USE ONLY

2.29 المسألة (29): مبادل حراري متلاقي

(Concurrent Heat Exchanger)

زيت يتم تبريده إلي 375K في مبادل حراري متلاقي (concurrent heat exchanger) ينقل حرارته إلي ماء التبريد الذي يغادر المبرِّد عند 300K. على أيَّ حال، من المطلوب تبريد الزيت إلي 350K بزيادة طول المبرِّد بينما تظل معدلات سريان الزيت والماء، ودرجات الحرارة عند

المدخل والأبعاد الأخرى للمبرِّد ثابتة. درجات حرارة مدخل ماء التبريد والزيت هما 288K و 425K. إذا كان طول المبرِّد الأصلي هو 1m، أحسب الآتي:-

i/ درجة حرارة مخرج ماء التبريد للمبرِّد الجديد.

ii/ طول المبرد الجديد.

الحل:-

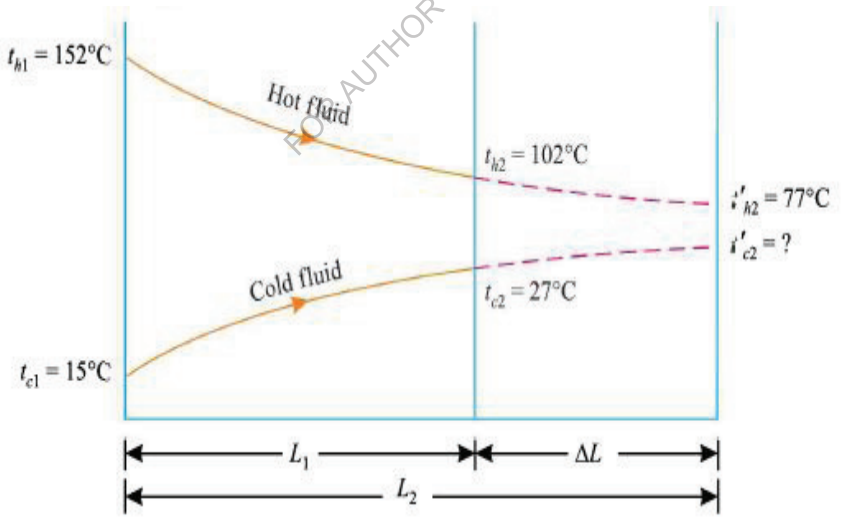
معطي: $t_{h_1} = 425 - 273 = 152°C$ ؛ $t_{h_2} = 375 - 273 = 102°C$ ؛ $L_1 = 1\ m^2$

$t_{c_1} = 288 - 273 = 15°C$ ؛ $t_{c_2} = 300 - 273 = 27°C$ $t'_{h_2} = 350 - 273 = 77°C$ ؛ $t'_{c_2} = ?$ ؛

$L_2 = ?$

الشكل (21) أدناه يوضِّح ترتيبة المبادل الحراري.

FOR AUTHOR USE ONLY



شكل (21)

i/ درجة حرارة مخرج ماء التبريد للمبرِّد الجديد، t'_{c_2} :-

الحالة (I):- (قبل زيادة الطول)

$$\dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

$$\therefore \frac{\dot{m}_h c_h}{\dot{m}_c c_c} = \frac{C_h}{C_c} = \frac{t_{c_2} - t_{c_1}}{t_{h_1} - t_{h_2}} = \frac{27-15}{152-102} = \underline{0.24}$$

$$\therefore C_{\min} = \dot{m}_h C_h \quad and \quad \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = R = \underline{24}$$

معدَّل إنتقال الحرارة يُعطي بـ

$$Q = \dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = UA_1 \left[\frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln(\theta_1/\theta_2)}\right]$$

$$\therefore t_{h_1} - t_{h_2} = \frac{UA_1}{C_{\min}} \left[\frac{(152-15)-(102-27)}{\ln[(152-15)/(102-27)]}\right]$$

أو $(152-102) = (NTU)_1 \left[\frac{137-75}{\ln(137/75)}\right] = (NTU)_1 \times 102.9$

$$or \quad (NTU)_1 = \frac{(152-102)}{102.9} = \underline{0.486}$$

$$(NTU)_1 = \frac{UA_1}{C_{\min}} = \frac{U\pi dL_1}{C_{\min}}$$

$$(NTU)_1 = \frac{U\pi dL_1}{C_{\min}}$$

$$\therefore \frac{U\pi d}{C_{\min}} = \frac{(NTU)_1}{L_1} = \frac{0.486}{1} = \underline{0.486}$$

الحالة (II):- (بعد زيادة الطول)

الفاعلية لمبادل حراري متوازي السريان تُعطي بـ

$$\in = \frac{1 - e^{-NTU_2(1+R)}}{1+R}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\in = \frac{1-e^{-0.486L_2(1+0.24)}}{1+0.24} = \frac{1-e^{-0.6L_2}}{1.24} \qquad \text{(i)}$$

أيضاً تُعطي الفاعلية بـ

$$\in = \frac{C_h\left(t_{h_1} - t'_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} = \frac{C_c\left(t'_{c_2} - t_{c_1}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}$$

$$= \left[\frac{C_h\left(t_{h_1} - t'_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}\right] = \frac{1}{0.24}\left[\frac{t'_{c_2} - t_{c_1}}{t_{h_1} - t_{c_1}}\right]$$

$$\left[\because C_h = C_{\min}; C_c = C_{\max}, \; and \; R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = 0.24\right]$$

أو $$\in = \frac{152-77}{152-15} = \frac{1}{1.24}\left[\frac{t'_{c_2} - 15}{152-15}\right]$$

أو $$t'_{c_2} = \left[\frac{152-77}{152-15}\right] \times 0.24(152-15) + 15 = \underline{\underline{33}}°C$$

FOR AUTHOR USE ONLY

ii/ طول المبرِّد الجديد، L_1:-

بمساواة المعادلتين (i) و (ii)، نحصل على ،

$$\frac{1-e^{-0.6L_2}}{1.24} = \frac{152-77}{152-15}$$

أو $$e^{-0.6L_2} = 1 - 1.24\left[\frac{152-77}{152-15}\right] = \underline{0.321}$$

أو $$e^{0.6L_2} = \frac{1}{0.321} = \underline{3.11}$$

أو $$0.6L_2 \ln e = \ln 3.11 = 1.134$$

أو $$L_2 = \frac{1.134}{0.6} = \underline{\underline{1.98}}m$$

هذا يشير لزيادة طول المبرِّد مقدارها 89%.

2.30 المسألة (30): درجات حرارة المخرج

(Exit Temperatures)

في مبادل حراري بسيط متعاكس السريان يشتغل تحت الظروف التالية:-

مائع A، درجات حرارة المدخل والمخرج 80°C و 40°C؛

مائع B، درجات حرارة المدخل والمخرج 20°C و 40°C؛

يتم نظافة المبرد مما يتسبب في زيادة معامل إنتقال الحرارة الإجمالي بمقدار 10%وتتغير درجة حرارة المدخل للمائع B إلي 30°C. ما هي درجات حرارة المخرج الجديدة للمائع A وللمائع B.

إفترض أنَّ معاملات إنتقال الحرارة والسعات الحرارية لا تتغير بتغير درجة الحرارة.

FOR AUTHOR USE ONLY

الحل:-

معطي: $t_{h_1} = 80°C$ ؛ $t_{h_2} = 40°C$ ؛ $t_{c_1} = 20°C$ ؛ $t_{c_2} = 40°C$ ← الحالة (I)

$t_{h_1} = 80°C$ ؛ $t_{h_2} = ?$ ؛ $t_{c_1} = 30°C$ ؛ $t_{c_2} = ?$ ← الحالة (II)

$U_2 = 1.1\ U_1$.

بما أنَّ درجات حرارة كلا المائعين يتم حسابهما، بالتالي يجب إستخدام أسلوب عدد وحدات إنتقال الحرارة لإيجاد t_{h_2} و t_{c_2} لشروط المدخل الجديدة للمائع البارد بعد تنظيف المبادل.

إضافياً فإنَّ مساحة إنتقال الحرارة ومعدلات سريان الكتلة في كلا الحالتين يظلا ثابتين.

الشكل (22) أدناه يوضِّح ترتيبة المبادل الحراري للحالتين.

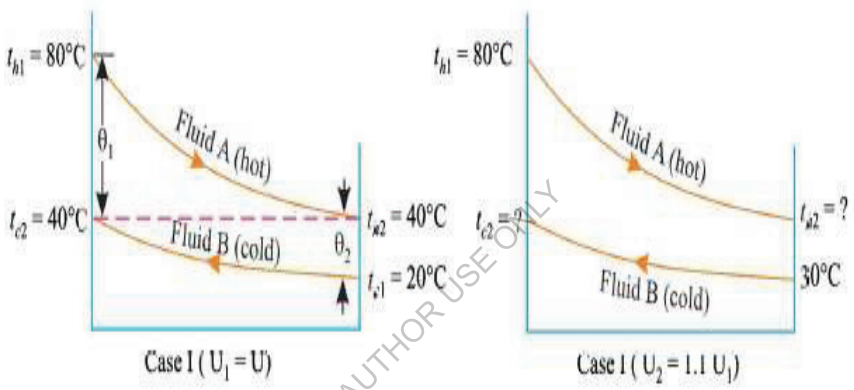
الحالة (I):

$$\dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

$$\therefore \frac{\dot{m}_h c_h}{\dot{m}_c c_c} = \frac{\left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)}{\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)} = \frac{40-20}{80-40} = 0.5 \;\; = R\left(const\tan t\right)$$

Where $\quad R = capacity\ ratio = \dfrac{C_{\min}}{C_{\max}}$

من الواضح أن $\dot{m}_h c_h = C_h = C_{\min}$



FOR AUTHOR USE ONLY

شكل (22)

يمكن أيضاً أنَّ نكتب،

$$Q_1 = \dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = U_1 A \left[\frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\theta_1 / \theta_2\right)}\right]$$

$$\therefore t_{h_1} - t_{h_2} = \frac{U_1 A}{\dot{m}_h c_h}\left[\frac{(80-40)-(40-20)}{\ln[(80-40)/(40-20)]}\right]$$

$$= \left(NTU\right)_1 \times 28.85$$

$$\therefore (80-40) = \left(NTU\right)_1 \times 28.85$$

أو $\qquad \left(NTU\right)_1 = 1.386$

الحالة (II):-

$$(NTU)_2 = \frac{U_2 A}{C_{\min}} = \frac{1.1U_1 A}{C_{\min}} = 1.1(NTU)_1 = 1.1\times 1.386 = 1.52$$

بما أنَّ U_2=1.1 U_1 و كلا المتغيران A و C_{min} يبقيا ثابتين في كلا الحالتين.

فاعلية المبادل الحراري المتعاكس السريان للحالة II تُعطي بـ

$$\in = \frac{1-e^{-NTU(1-R)}}{1-\mathrm{Re}^{-NTU(1-R)}}$$ حيث R = 0.5،

$$= \frac{1-e^{-1.52(1-0.5)}}{1-0.5e^{-1.52(1-0.5)}} = \frac{1-e^{-0.76}}{1-0.5e^{-0.76}} = \underline{0.695}$$

أيضاً تُعطي الفاعلية بـ

$$\in = \frac{C_h\left(t_{h_1}-t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1}-t_{c_1}\right)} = \frac{C_c\left(t_{c_2}-t_{c_1}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1}-t_{h_2}\right)}$$

$$\therefore \in = \frac{C_h\left(t_{h_1}-t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1}-t_{c_1}\right)} = \frac{C_{\min}\left(t_{h_1}-t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1}-t_{c_2}\right)} = \frac{t_{h_1}-t_{h_2}}{t_{h_1}-t_{c_1}} \quad (\because C_h = C_{\min})$$

$$0.696 = \frac{80-t_{h_2}}{80-30} \quad \text{أو}$$

$$t_{h_2} = 80-0.696(80-30) = \underline{\underline{45.2}}\,^{\circ}C \quad \text{أو}$$

مرة ثانية،

$$\in = \frac{C_c\left(t_{c_2}-t_{c_1}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1}-t_{c_1}\right)} = \frac{C_{\max}}{C_{\min}}\left[\frac{t_{c_2}-t_{c_1}}{t_{h_1}-t_{c_1}}\right] = 2\left[\frac{t_{c_2}-t_{c_1}}{t_{h_1}-t_{c_1}}\right]$$

FOR AUTHOR USE ONLY

$$0.696 = 2\left[\frac{t_{c_2} - 30}{80 - 30}\right] \quad \text{أو} \qquad \left[\because \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = R = 0.5\right]$$

$$t_{c_2} = 30 + \frac{0.696}{2}(80 - 30) = \underline{\underline{47.4}}\,°C \quad \text{أو}$$

2.31 المسألة (31): مكثِّف بخار من نوع الغـــلاف والأنبوب

(Shell and Tube Heat Exchanger)

في محطة قدرة بخارية ضخمة، يتم إستخدام مكثِّف بخار من نوع الغـــلاف والأنبوب (shell and tube H. Exchanger) بالبيانات التالية:-

معدَّل إنتقال الحرارة 2100MW

عدد وحدات ممرات الغلاف واحد

عدد الأنابيب (رفيعة الجدار) 31500 كل منها تمتلك ممران.

قطر كل أنبوب 25mm

معدَّل سريان كتلة الماء خلال الأنابيب 3.4×10^4 kg/s

درجة حرارة تكثُّف البخار 50°C

(يتكثَّف البخار على السطح الخارجي للأنابيب)

معامل إنتقال الحرارة على جانب البخار 11400W/m^2°C

درجة حرارة مدخل الماء 50°C

FOR AUTHOR USE ONLY

استخدم أسلوب عامل تصحيح متوسط درجة الحرارة اللوغاريثمي وعدد وحدات إنتقال الحرارة،

أحسب:-

i/ درجة حرارة مخرج ماء التبريد، و

ii/ طول الأنبوب لكل ممر.

خذ الخواص التالية للماء عند (عند $t_b = 27°C$)

$c_p = 4.18 kj/kg°C$؛ $\mu = 855\times10^{-6}\, Ns/m^2$ ؛ $k = 0.613 W/m°C$؛ Pr=5.83

يمكن تجاهل كل من المقاومة الحرارية لمادة الأنبوب وتأثيرات الإتساخ.

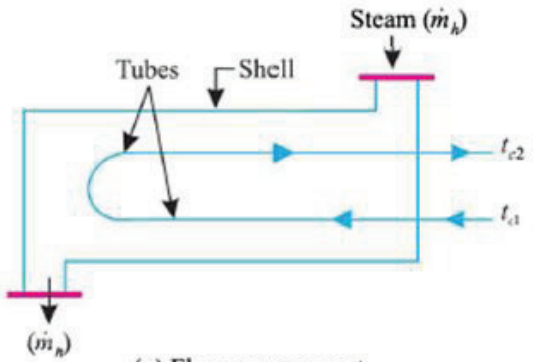
الحل:-

معطي:- $Q = 2300\times10^6 W$ ؛ n_p=31500؛ d=25mm=0.025mm ؛ $t_{c_1} = 20°C$

$\dot{m}_w = \dot{m}_c = 3.4\times10^4 kg/s$ ؛ $t_{h_1} = t_{h_2} = 50°C$ ؛ $h_o = 11400 W/m^2°C$.

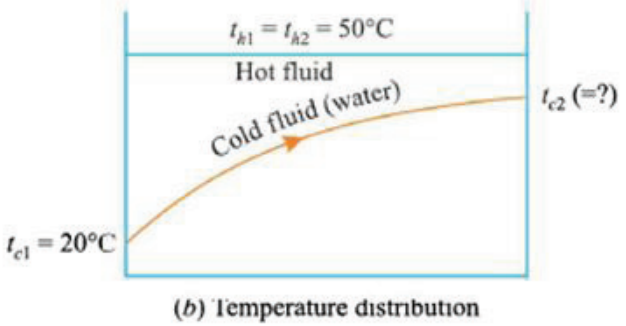
الشكل (23) أدناه يوضِّح ترتيبة مكثف البخار من نوع الغلاف والأنبوب.

i/ درجة حرارة مخرج الماء، t_{c_2} :-



(*a*) Flow arrangement

FOR AUTHOR USE ONLY



(*b*) Temperature distribution

شكل (23)

i/ درجة حرارة مخرج الماء، t_{c_2} :-

لكي يتم الحصول على درجة حرارة مخرج الماء يتم استخدام موازنة الطاقة الإجمالية لكي نحصل على:

$$Q = \dot{m}_c c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

$$2100\times10^6 = 3.4\times10^4\left(4.18\times10^3\right)\left(t_{c_1} - 20\right)$$

$$\therefore \Rightarrow t_{c_1} = \underline{\underline{34.77}}\,°C$$

ii/ طول الأنبوب لكل ممر، L:-

(1) أسلوب عامل تصحيح متوسط فرق درجة الحرارة اللوغاريثمي (LMTD correction factor method)

معدَّل إنتقال الحرارة الكلي يُعطي بـ

$$Q = FUA\theta_m \qquad \text{(i)}$$

حيث F = معامل إنتقال الحرارة الإجمالي.

FOR AUTHOR USE ONLY

$2n_p \pi dL = A$

θ_m = متوسط فرق درجة الحرارة اللوغاريثمي.

لإيجاد F يجب إيجاد p (نسبة درجة الحرارة) و R (نسبة السعة الحرارية)،

$$P = \frac{t_{c_2} - t_{c_1}}{t_{h_2} - t_{c_1}} = \frac{34.77 - 20}{50 - 20} = \underline{0.492}$$

$$R = \frac{t_{h_1} - t_{h_2}}{t_{c_2} - t_{c_1}} = \frac{50 - 50}{37.44 - 20} = \underline{0}$$

بقيَّم P = 0.492 و R = 0، نحصل على F = 1

لإيجاد قيمة U، يجب إيجاد قيمة h_i أولاً

معدَّل سريان الكتلة خلال كل أنبوب، $\dot{m} = \frac{3.4 \times 10^4}{31500} = \underline{1.079} kg/s$

رقم رينولد , $\mathrm{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi d \mu} = \frac{4 \times 1.079}{\pi \times 0.025 \times 855 \times 10^{-6}} = \underline{6.43 \times 10^4}$

بما أنَّ Re > 2300، بالتالي يكون السريان مضطرباً

$$\therefore Nu = \frac{hd}{k} = 0.023(\mathrm{Re})^{0.8}(\mathrm{Pr})^{0.4} = 0.023\left(6.43 \times 10^4\right)^{0.8}(5.83)^{0.4} = 327$$

$$\text{Or} \quad h = \frac{Nuk}{d} = \frac{327 \times 0.613}{0.025} = \underline{8018} W/m^2 °C$$

{ بتجاهل المقاومة الحرارية لمادة الأنبوب وتأثير الإتساخ}

الآن، $\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i}$

FOR AUTHOR USE ONLY

إضافياً، يُعطي LMTD بـ

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln(\theta_1/\theta_2)} = \frac{(t_{h_1} - t_{c_1}) - (t_{h_2} - t_{c_2})}{\ln[(t_{h_1} - t_{c_1})/(t_{h_2} - t_{c_2})]} = \frac{(50-20)-(50-34.77)}{\ln[(50-20)/(50-34.77)]}$$

$$= \frac{30-15.23}{\ln[(30/15.23)]} \approx \underline{21.8}\,°C$$

بتعويض القيَّم في المعادلة (i)، نحصل على

$$Q = FU(2n_p \pi d L)\theta_m$$
$$2100\times10^6 = 1\times4707.2[2\times31500\times\pi\times0.025\times L]\times21.8$$
$$\therefore \Rightarrow L = \underline{\underline{4.136}}m$$

(2) أسلوب عدد وحدات إنتقال الحرارة:- (NTU method)

بما أنَّ المبادل الحراري هو مكثِّف، بالتالي $C_h = C_{max} = \infty$

و $C_{\min} = C_c = \dot{m}_c c_c = 3.4\times10^4 \times (4.18\times10^3) = \underline{14212\times10^4}$

بما أنَّ $C_h > C_c$، بالتالي

$$\in = \frac{t_{c_2} - t_{c_1}}{t_{h_1} - t_{c_1}} = \frac{34.77-20}{50-20} = \underline{0.492}$$

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = 0$$

$$\therefore \in = 1 - e^{-NTU}$$

أو $0.492 = 1 - e^{-NTU}$

أو $e^{-NTU} = 1 - 0.492 = 0.508$

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\text{أو} \quad -NTU\ln e = \ln 0.508 = -0.677$$

$$\text{أو} \quad \text{NTU} = 0.677$$

$$\text{لكن} \quad ، \quad NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{U\left(2n_p \pi dL\right)}{C_{\min}}$$

$$0.677 = \frac{4707.2 \times \left(2 \times 31500 \times \pi \times 0.025 \times L\right)}{14212 \times 10^4}$$

$$\therefore L = \frac{0.677 \times 14212 \times 10^4}{4707.2 \times \left(2 \times 31500 \times \pi \times 0.025\right)} = \underline{\underline{4.131m}}$$

2.32 المسألة (32): نسبة مساحة مبادل حراري متعاكس السريان إلي مساحة مبادل حراري متوازي السريان

(Area Ratio of Counter Flow Heat Exchanger to Parallel Flow Heat Exchanger)

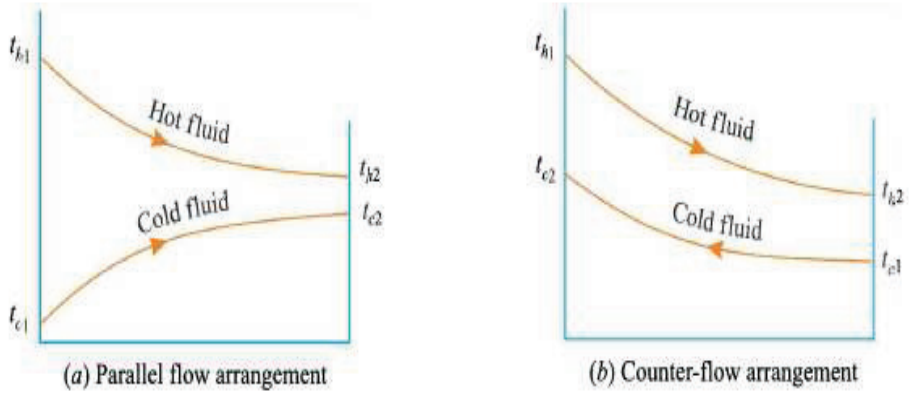
FOR AUTHOR USE ONLY

في مبادل حراري مزدوج الماسورة $\dot{m}_h c_h = 0.5\dot{m}_c c_c$. درجات حرارة مدخل الموائع الساخنة والباردة هما t_{h_1} و t_{c_1} . إشتق تعبيراً بدلالات t_{h_1} ، t_{c_1} و t_{h_2} لنسبة مساحة مبادل حراري متعاكس السريان إلي تلك لمبادل حراري متوازي السريان التي تُعطي نفس درجة حرارة مخرج المائع الساخن t_{h_2} . أوجد هذه النسبة إذا كان

$$t_{h_2} = 90°C \text{ و } t_{c_1} = 30°C \text{ ، } t_{h_1} = 150°C$$

الحل:-

الشكل (24) أدناه يوضِح ترتيبتا التوازي والتعاكس لمبادلات حرارية.



شكل (24)

معطي: $C_h = 0.5C_c$; $\dot{m}_h c_h = 0.5\dot{m}_c c_c$ ؛ $\left(t_{h_2}\right)_{parallel} = \left(t_{h_2}\right)_{counter}$

فاعلية المبادل الحراري $\in$ تُعطي بـ

$$\in = \frac{C_h\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} = \frac{C_c\left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}$$

في هذه الحالة، $C_{min} = C_h$ و $C_h = 0.5C_c$ و $C_c = C_{max} = 2\ C_h$

$$\therefore \in = \frac{C_h\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} = \frac{2C_h}{C_h}\left[\frac{t_{c_2} - t_{c_1}}{t_{h_1} - t_{c_1}}\right]$$

أو $$\in = \left[\frac{t_{h_1} - t_{h_2}}{t_{h_1} - t_{c_1}}\right] = 2\left[\frac{t_{c_2} - t_{c_1}}{t_{h_1} - t_{c_1}}\right] \qquad (1)$$

هذه المعادلة تكون صحيحة لسريان متعاكس كما تكون صحيحة لسريان متوازي

إجعل A_p = مساحة المبادل الحراري متوازي السريان.

A_c = مساحة المبادل الحراري متعاكس السريان.

FOR AUTHOR USE ONLY

بما أنَّ $\left(t_{h_2}\right)_p = \left(t_{h_2}\right)_c$، عليه فإنَّ الحرارة المفقودة بواسطة المائع الساخن في الحالتين هي نفسها.

بما أنَّ U تكون مستقلة عن إتجاه السريان ،

$$\therefore Q = UA_p\left(\theta_m\right)_p = UA_c\left(\theta_m\right)_c$$

$$\therefore \frac{A_c}{A_p} = \frac{\left(\theta_m\right)_p}{\left(\theta_m\right)_c} \qquad (2)$$

من المعادلة (1)، نحصل على t_{c_2} بدلالات t_{h_1}, t_{h_2} و t_{c_1}

$$t_{c_2} = t_{c_1} + 0.5\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)$$

(a) للسريان المتوازي:-

$$\theta_1 = t_{h_1} - t_{c_1}$$

$$\theta_2 = t_{h_2} - t_{c_2} = t_{h_2} - \left[t_{c_1} + 0.5\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)\right]$$

$$= t_{h_2} - t_{c_2} - 0.5t_{h_1} + 0.5t_{h_2}$$

$$= 1.5t_{h_2} - 0.5t_{h_1} - t_{c_1}$$

$$\therefore \theta_1 - \theta_2 = t_{h_1} - t_{c_1} - 1.5t_{h_2} + t_{c_1}$$

$$= 1.5\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)$$

عليه،

FOR AUTHOR USE ONLY

$$(\theta_m)_p = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln[\theta_1/\theta_2]} = \frac{1.5(t_{h_1} - t_{h_2})}{\ln\left[\dfrac{(t_{h_1} - t_{c_1})}{1.5t_{h_2} - 0.5t_{h_1} - t_{c_1}}\right]} \qquad \text{(i)}$$

(b) للسريان المتعاكس:-

$$\theta_1 = t_{h_1} - t_{c_2} = t_{h_1} - \left[t_{c_1} + 0.5(t_{h_1} - t_{h_2})\right]$$

$$= 0.5t_{h_1} + 0.5t_{h_2} - t_{c_1}$$

$$\theta_2 = t_{h_1} - t_{c_1}$$

$$\therefore \theta_1 - \theta_2 = 0.5t_{h_1} + 0.5t_{h_2} - t_{c_1} - t_{h_2} + t_{c_1} = 0.5(t_{h_1} - t_{h_2})$$

عليه،

$$(\theta_m)_c = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln[\theta_1/\theta_2]} = \frac{0.5(t_{h_1} - t_{h_2})}{\ln\left[\dfrac{0.5(t_{h_1} + t_{h_2}) - t_{c_1}}{t_{h_2} - t_{c_1}}\right]} \qquad \text{(ii)}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

بتعويض قيَّم (i) و (ii) في المعادلة (2)، نحصل على

$$\frac{A_c}{A_p} = \frac{1.5(t_{h_1} - t_{h_2})}{\ln\left[\dfrac{(t_{h_1} - t_{c_1})}{1.5t_{h_2} - 0.5t_{h_1} - t_{c_1}}\right]} \times \frac{\ln\left[\dfrac{0.5(t_{h_1} + t_{h_2}) - t_{c_1}}{t_{h_2} - t_{c_1}}\right]}{0.5(t_{h_1} - t_{h_2})}$$

$$= 3\left[\frac{\ln\left[\dfrac{0.5(t_{h_1} + t_{h_2}) - t_{c_1}}{t_{h_2} - t_{c_1}}\right]}{\ln\left[\dfrac{(t_{h_1} - t_{c_1})}{1.5t_{h_2} - 0.5t_{h_1} - t_{c_1}}\right]}\right]$$

البيانات المعطاة هي: $t_{h_2} = 90°C, t_{c_1} = 30°C, t_{h_1} = 150°C$

$$\therefore \frac{A_c}{A_p} = 3\left[\frac{\ln\left[\frac{0.5(150+90)-30}{90-30}\right]}{\ln\left[\frac{150-30}{1.5\times 90-0.5\times 150-30}\right]}\right]$$

$$= 3\left[\frac{\ln(1.5)}{\ln(4)}\right] = \underline{\underline{0.877}}$$

2.33 المسألة (33): تبريد الهواء

(Air Cooling)

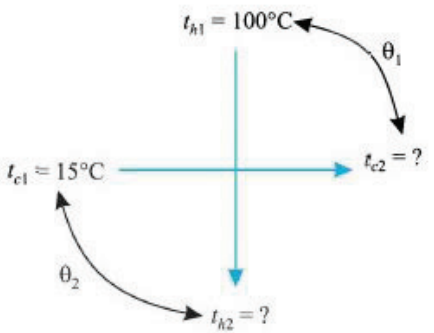
8000kg/h من هواء عند 100°C يتم تبريده بإمراره خلال مبادل حراري متعارض السريان بممر مفرد (a single pass cross-flow H. exchanger). إلي أيَّ درجة حرارة سيتم تبريد الهواء إذا كان الماء الداخل عند 15°C يمر خلال الأنابيب بدون خلط بمعدَّل 7500kg/h؟

FOR AUTHOR USE ONLY

خذ:-

$U=500kj/h\text{-}m^2°C$ ؛ $A=20m^2$ ؛ $c_p\,(air)=1kj/kg°C$ ، $c_p\,(water)=4.2kj/kg°C$ ؛

عامل كلا المائعين كغير مخلوطين.



شكل (25)

الحل:-

معطي: $\dot{m}_h = \frac{8000}{3600} = 2.22kg/s$ ؛ $C_h = 1kj/kg°C$ ؛ $t_{h_1} = 100°C$ ؛

$A = 20m^2$ ؛ $C_c = 4.2kj/kg°C$ ؛ $\dot{m}_c = \frac{7500}{3600} = 2.08kg/s$ ؛

$$U = \frac{500\times10^3}{3600} = 138.9W/m^2°C .$$

$$C_h = \dot{m}_h C_h = 2.22\times\left(1\times10^3\right) = 2220 = C_{\min}$$

$$C_c = \dot{m}_c C_c = 2.08\times\left(4.2\times10^3\right) = 8736 = C_{\max}$$

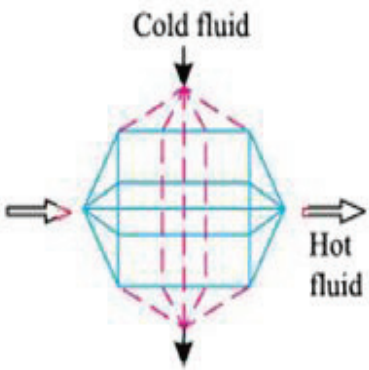
$$\therefore \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{2220}{8736} = \underline{0.254}$$

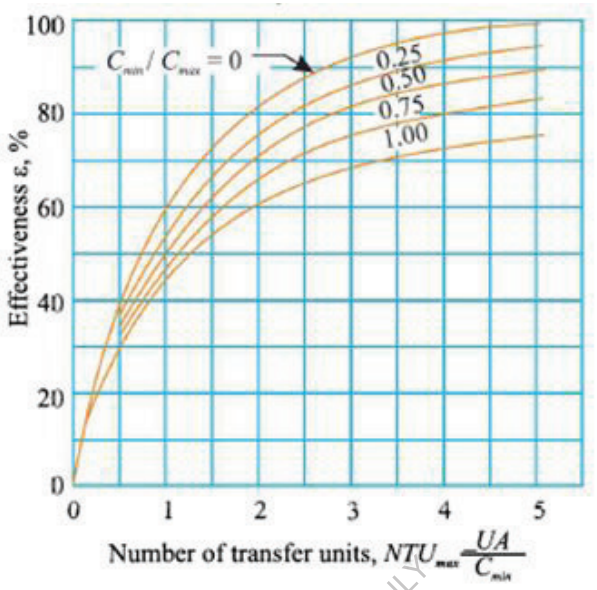
$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{138.9\times20}{2220} = \underline{1.25}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

للقيَّم المحسوبة لـ $\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \underline{0.254}$ و NTU = 1.25، من الشكل (B)، نحصل على

$$\in \approx 0.63$$





شكل (B)

FOR AUTHOR USE ONLY

الفاعلية ε تعطى بـ

$$\in = \frac{C_h\left(t_{h_1}-t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1}-t_{c_1}\right)} = \frac{C_c\left(t_{c_2}-t_{c_1}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1}-t_{c_1}\right)}$$

أو $0.63 = \dfrac{2220(100-t_{h_2})}{2220(100-15)} = \dfrac{8736(t_{c_2}-15)}{2220(100-15)}$

أو $0.63 = \dfrac{100-t_{h_2}}{100-15} = 3.935\left[\dfrac{t_{c_2}-15}{100-15}\right]$

$$\therefore t_{h_2} = 100-0.36(100-15) = \underline{46.45}\,°C$$

و $t_{c_2} = \dfrac{0.63(100-15)}{3.935}+15 = \underline{28.6}\,°C$

يتم تبريد الهواء إلي درجة حرارة دنيا مقدارها $\underline{\underline{46.45}}\,°C$.

2.34 المسألة (34): الفاعلية و مساحة السطح

(Effectiveness and Surface Area)

من المطلوب تصميم مبادل حراري متعارض السريان بأنبوب ذو زعانف لتسخين ماء تحت ضغط بواسطة غازات عادم ساخنة تدخل إلي المبادل الحراري عند 310°C وتغادره عند 110°C، على الترتيب. الماء المنساب بمعدَّل 1.4kg/s يدخل إلى المبادل الحراري عند 30°C ويغادر عند 130°C . عامل إنتقال الحرارة لغازات العادم الساخنة المؤسسة على جانب الغاز هي $105W/m^2°C$. مستخدماً أسلوب عدد وحدات إنتقال الحرارة، أحسب الآتي:-

i/ الفاعلية.

ii/ مساحة سطح جانب الغاز .

FOR AUTHOR USE ONLY

خذ الخواص التالية:-

غاز العادم: $c_p = 1kj/kg°C$؛

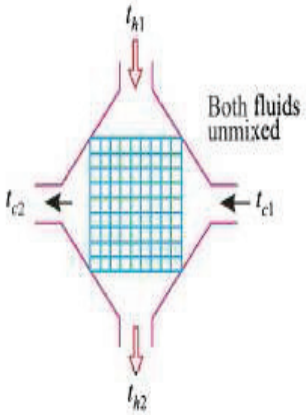
الماء عند $t_b = 80°C$:$c_p = 4.2kj/kg°C$.

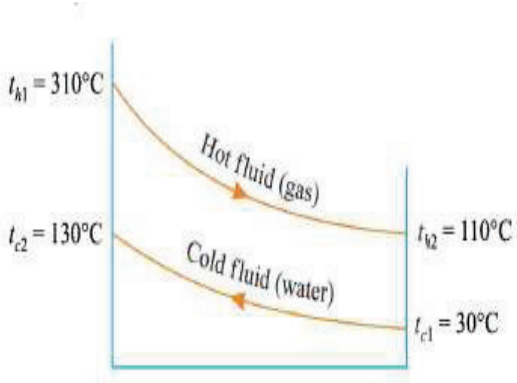
الحل:-

معطي:- $\dot{m}_w = \dot{m}_c = 1.4kg/s$ ، $t_{c_1} = 30°C$ ؛ $t_{c_2} = 130°C$ ؛ $c_c = 4.2kj/kg°C$

$t_{h_1} = 310°C$ ؛ $t_{h_2} = 110°C$ ؛ $c_h = 1kj/kg°C$ ؛ $U_h = 105W/m^2°C$.

الشكل (26) أدناه يوضِّح ترتيبة المبادل الحراري.





شكل (26)

(i) الفاعلية، ∈:-

السعة الحرارية للمائع البارد،

$$C_c = \dot{m}_c c_c = 1.4 \times 4.2 = \underline{5.88} kW/°C$$

قيمة C_h (السعة الحرارية للمائع الساخن) يمكن الحصول عليها من معادلة موازنة الطاقة الإجمالية، بالتالي

$$\dot{m}_h c_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = \dot{m}_c c_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

$$C_h \left(t_{h_1} - t_{h_2}\right) = C_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)$$

$$C_h = \frac{C_c \left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)}{\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)} = \frac{5.88(130-30)}{310-110} = \underline{2.94} kW/°C$$

بالتالي $C_{\max} = C_c = 5.88 kW/°C$ و $C_{\min} = C_h = 2.94 kW/°C$

عندما $C_c > C_h$، بالتالي فإنَّ الفاعلية ∈ تُعطي بـ

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\in = \frac{t_{h_1} - t_{h_2}}{t_{h_1} - t_{c_1}} = \frac{310-110}{310-30} = \underline{\underline{0.714}}$$

(ii) مساحة جانب سطح الغاز، A_h:-

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{2.94}{5.88} = 0.5$$

بإعتبار $\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = 0.5$ و $\in = 0.741$ ومن الشكل (B)، نحصل على

$$NTU \approx 1.8$$

$$NTU = \frac{U_h A_h}{C_{\min}} \text{ ، لكن}$$

$$1.8 = \frac{105 \times A_h}{2.94 \times 1000}$$

$$\therefore A_h = \frac{1.8 \times 2.94 \times 1000}{105} = \underline{\underline{50.4\, m^2}}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

2.35 المسألة (35): محطة قدرة غاز توربينية

(Gas Turbine Power Plant)

في محطة قدرة غاز توربينية يتم إنتقال الحرارة في مبادل حراري من الغازات الساخنة المغادرة للتوربينة عند 450°C إلي الهواء المغادر للضاغط عند 170°C. معدَّل سريان الهواء 5000kg/h ونسبة الوقود إلي الهواء هي 1.015kg/kg. معامل إنتقال الحرارة الإجمالي للمبادل الحراري هي $52.33 W/m^2°C$. مساحة السطح هي $50 m^2$ وتكون ترتيبة السريان متعارضة بحيث أن المائعان لا يختلطان. أحسب الآتي:-

i/ درجات حرارة المخرج على جانبي الهواء والغاز.

ii/ معدَّل إنتقال الحرارة في المبادل.

خذ $c_h = c_c = 1.05 kj/kg°C$.

الحل:-

معطي: $t_{h_1} = 450\,°C$ ؛ $t_{c_1} = 170\,°C$ ؛ $A = 50 m^2$.

(i) درجات حرارة المخرج على جانبي الهواء والغاز، t_{c_2} و t_{h_2} :-

$$\dot{m}_c = \frac{5000}{3600} = \underline{1.388} kg/s$$

$$C_c = \dot{m}_c c_c = 1.388 \times \left(1.05 \times 10^3\right) = \underline{1457.4}$$

(بما أنَّ 1.015kg من الغازات يتم تكوينه بـ 1kg من الهواء)

$$\dot{m}_h = \frac{5000 \times 1.015}{3600} = \underline{1.41} kg/s$$

$$C_h = \dot{m}_h c_h = 1.41 \times \left(1.05 \times 10^3\right) = \underline{1480.5}$$

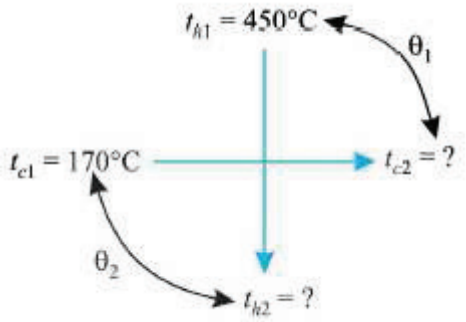
$$\therefore \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{1457.4}{1480.5} = \underline{0.984}$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{52.33 \times 50}{1457.4} = \underline{\underline{1.795}}$$

للقيَّم المحسوبة لـ $\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = 0.984$ و $NTU = 1.795$ ومن الشكل (B)، نحصل على

$$\in \approx \underline{0.52}$$

FOR AUTHOR USE ONLY



شكل (27)

تُعطي الفاعلية ∈ بـ

$$\in = \frac{C_h\left(t_{h_1} - t_{h_2}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)} = \frac{C_c\left(t_{c_2} - t_{c_1}\right)}{C_{\min}\left(t_{h_1} - t_{c_1}\right)}$$

$$\therefore 0.52 = \frac{1480.5\left(450 - t_{h_2}\right)}{1457.4\left(450 - 170\right)}$$

أو $$\Rightarrow t_{h_2} = \underline{\underline{306.6}}°C$$

و $$0.52 = \frac{t_{c_2} - t_{c_1}}{t_{h_1} - t_{c_1}} = \frac{t_{c_2} - 170}{450 - 170}$$

$$\therefore \Rightarrow t_{c_2} = \underline{\underline{315.6}}°C$$

ii/ معدَّل إنتقال الحرارة في المبادل، Q:-

$$Q = UA\left(\theta_m\right)_{counter} = FUA\left(\theta_m\right)_{counter} \qquad \text{(i)}$$

حيث F = عامل التصحيح.

$$\left(\theta_m\right)_{counter} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\theta_1 / \theta_2\right)} = \frac{\left(t_{h_1} - t_{c_2}\right) - \left(t_{h_2} - t_{c_1}\right)}{\ln\left[\left(t_{h_1} - t_{c_2}\right) / \left(t_{h_2} - t_{c_1}\right)\right]}$$

FOR AUTHOR USE ONLY

$$= \frac{(450-315.6)0-(306.6-170)}{\ln[(450-315.6)/(306.6-170)]} = \frac{134.4-136.6}{\ln[(134.4/136.6)]}$$

$$= \underline{135.5}°C$$

نسبة درجة الحرارة , $P = \frac{t_{c_2} - t_{c_1}}{t_{h_1} - t_{c_1}} = \frac{315.6-170}{450-170} = \underline{0.52}$

نسبة السعة الحرارية , $R = \frac{t_{h_1} - t_{h_2}}{t_{c_2} - t_{c_1}} = \frac{450-306.6}{315.6-170} = \underline{0.985}$

بإستخدام القيَّم P و R ، من الشكل (B) ، نحصل على

$$F = 0.76$$

بتعويض القيَّم في المعادلة (i)، نحصل على

$$Q = 0.76 \times 52.33 \times 50 \times 135.5 = \underline{269447}W \quad or \quad \underline{\underline{269.45}}\ kW$$

FOR AUTHOR USE ONLY

الفصل الثالث

ملخص

(Summary)

1/ المبادل الحراري هو جهاز يقوم بنقل الطاقة من مائع ساخن إلي مائع بارد بمعدَّل أقصى وبتكاليف إستثمار وتشغيل أدني.

2/ متوسط فرق درجة الحرارة اللوغاريثمي لسريان متوازي أو لسريان متعاكس يُعطي بـ

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln[\theta_1 / \theta_2]}$$

θ_m لوحدة سريان متعاكس تكون دائماً أكبر من تلك لوحدة سريان متوازي، بالتالي فإنَّ المبادل الحراري متعاكس السريان يمكن أن ينقل حرارة أكثر من المبادل الحراري متوازي السريان؛ بمعني آخر فإنَّ المبادل الحراري متعاكس السريان يحتاج لمساحة سطح تسخين أصغر لنفس معدَّل إنتقال الحرارة. لهذا السبب، دائماً ما يتم إستخدام ترتيبة السريان المتعاكس.

FOR AUTHOR USE ONLY

3/ الإتساخ أو الصدأ (Fouling or Scaling):- ظاهرة تكوُّن الصدأ وتراكم شوائب المائع في أنابيب مبادل حراري أثناء تشغيله الإعتيادي تُسمي بالإتساخ.

مقلوب معامل إنتقال الحرارة h_s يُسمي بعامل الإتساخ، R_f

$$R_f = \frac{1}{h_s} m^2 °C/W \qquad \text{(i)}$$

$$R_f = \frac{1}{U_{dirty}} - \frac{1}{U_{clean}} \qquad \text{(ii)}$$

إنتقال الحرارة بإعتبار المقاومة الحرارية نتيجة لتكوُّن الصدأ يُعطي بـ

$$Q = \frac{t_i - t_o}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{A_i h_{s_i}} + \frac{1}{2\pi L k}\ln(r_o / r_i) + \frac{1}{A_o h_{s_o}} + \frac{1}{A_o h_o}} \qquad \text{(iii)}$$

معاملات إنتقال الحرارة الإجمالي، U المؤسسة على الأسطح الداخلية والخارجية للأنبوب الداخلي تُعطي بـ

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + R_{f_i} + \frac{r_i}{k}\ln(r_o / r_i) + \left(\frac{r_i}{r_o}\right)R_{f_o} + \left(\frac{r_i}{r_o}\right)\frac{1}{h_o}} \qquad \text{(iv)}$$

$$U_o = \frac{1}{(r_o / r_i)\frac{1}{h_i} + \left(\frac{r_i}{r_o}\right)R_{f_i} + \frac{r_o}{k}\ln(r_o / r_i) + R_{f_o} + \frac{1}{h_o}} \qquad \text{(v)}$$

بتجاهل عامل الإتساخ ،

$$U_o = \frac{1}{(r_o / r_i)\frac{1}{h_i} + \frac{r_o}{k}\ln(r_o / r_i) + \frac{1}{h_o}} \qquad \text{(vi)}$$

عندما يكون الأنبوب رفيع الجدار ويتم تجاهل المقاومات الحرارية الناتجة من سمك جدار الأنبوب والإتساخ المتكوِّن.

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}}$$

4/ فاعلية المبادل الحراري $\{\in\}$ يتم تعريفها كنسبة الحرارة المنتقلة الفعلية إلي الحرارة المنتقلة القصوى الممكنة. عليه ،

FOR AUTHOR USE ONLY

$$\epsilon = \frac{\text{الحرارة المنتقلة الفعلية } (Q)}{\text{الحرارة المنتقلة القصوى الممكنة } (Q_{max})} \quad (i)$$

$$\{\in\}_{parallel\ flow} = \frac{1 - e^{-NTU(1+R)}}{1+R} \qquad \text{(ii)}$$

$$\{\in\}_{counter\ flow} = \frac{1 - e^{-NTU(1-R)}}{1 - \mathrm{Re}^{-NTU(1-R)}} \qquad \text{(iii)}$$

حيث، $R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$ = نسبة السعة الحرارية R

NTU = عدد وحدات إنتقال الحرارة.

NTU هو مقياس الفاعلية للمبادل الحراري.

FOR AUTHOR USE ONLY

الكتب والمراجع

الكتب والمراجع العربية:

1. دكتور مهندس أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال الحرارة الجزء الأول، الثاني والثالث" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2000م).

2. دكتور مهندس أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال الكتلة بالانتشار والحمل الجزء الأول، الثاني" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2005م).

3. دكتور مهندس أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال ديناميكا حرارية(1) و ديناميكا حرارية(2)" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2007م).

4. برهان محمود العلي ، أحمد نجم الصبحة ، بهجت مجيد مصطفى ، " ترجمة كتاب أساسيات انتقال الحرارة" ، مديرية دار الكتب للطباعة والنشر ، جامعة لموصل ، الجمهورية العراقية ،(1988م).

FOR AUTHOR USE ONLY

الكتب والمراجع الإنجليزية:

1. Eastop and McConkey, “Applied Thermodynamics for Engineering Technologists”, Longman Singapore Publishers LTD., Singapore, (1994).

2. Eastop T. D. and Croft D. R.,"Energy Efficiency", Longman Publisher, (1990).

3. Rogers and Mayhew," Engineering Thermodynamics Work and Heat Transfer”, Longman Group Limited London and New York, Third Edition, (1980).

4. Bruges E. A.," Available Energy and second Law Analysis ", Academic Press, (1959).

5. Kauzmann W., "Kinetic Theory of Gases", Benjamin, (1966).

6. Schneider P. J.,"Temperature Response Charts", Wiley, (1963).

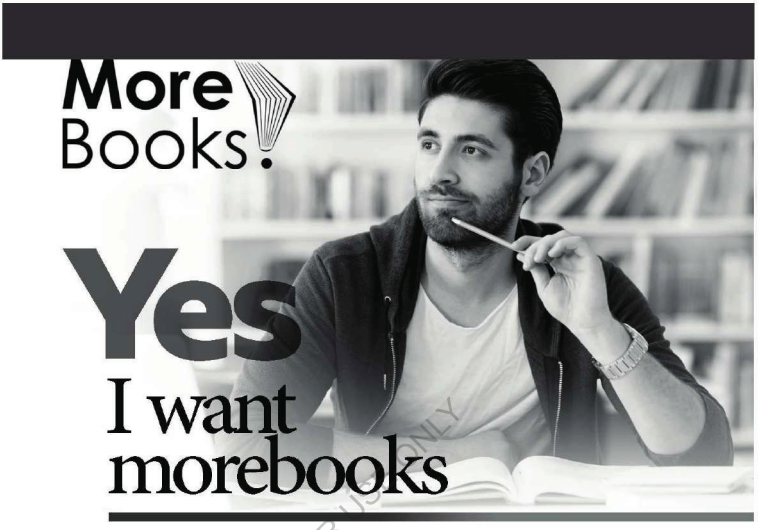
7. R. K. Rajput, "Heat and Mass Transfer", S. Chand and Company LTD., New Delhi, (2003).

FOR AUTHOR USE ONLY

نبذة عن المؤلف:

دكتور أسامة محمد المرضي سليمان خيال وُلِدَ بمدينة عطبرة بالسودان في العام 1966م. حاز على دبلوم هندسة ميكانيكية من كلية الهندسة الميكانيكية – عطبرة في العام 1990م. تحصَّل أيضاً على درجة البكالوريوس في الهندسة الميكانيكية من جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا – الخرطوم في العام 1998م ، كما حاز على درجة الماجستير في تخصص ميكانيكا المواد من جامعة وادي النيل – عطبرة في العام 2003م ودرجة الدكتوراه من جامعة وادي النيل في العام 2017م. قام بالتدريس في العديد من الجامعات داخل السودان، بالإضافة لتأليفه لأكثر من أربعين كتابا باللغة العربية ولعشرين كتابا باللغة الإنجليزية بالإضافة لمائة ورقة علمية منشورة في دور نشر ومجلات عالمية إلى جانب إشرافه على أكثر من ثلاثمائة بحث تخرج لكل من طلاب الماجستير، الدبلوم العالي، البكالوريوس، والدبلوم العام. يشغِل الآن وظيفة أستاذ مشارك بقسم الميكانيكا بكلية الهندسة والتقنية – جامعة وادي النيل وأيضا عميدا لكلية الهندسة. بالإضافة لعمله كاستشاري لبعض الورش الهندسية بالمنطقة الصناعية عطبرة. هذا بجانب عمله كمدير فني لمجموعة ورش الكمالي الهندسية لخراطة أعمدة المرافق واسطوانات السيارات والخراطة العامة وكبس خراطيش الهيدروليك.

FOR AUTHOR USE ONLY



اشتري كتبك سريعا و مباشرة من الأنترنيت, على أسرع متاجر الكتب الالكترونية في العالم
بفضل تقنية الطباعة عند الطلب, فكتبنا صديقة للبيئة

اشتري كتبك على الأنترنيت
www.morebooks.shop

FOR AUTHOR USE ONLY

Kaufen Sie Ihre Bücher schnell und unkompliziert online – auf einer der am schnellsten wachsenden Buchhandelsplattformen weltweit! Dank Print-On-Demand umwelt- und ressourcenschonend produziert.

Bücher schneller online kaufen
www.morebooks.shop

KS OmniScriptum Publishing
Brivibas gatve 197
LV-1039 Riga, Latvia
Telefax: +371 686 204 55

info@omniscriptum.com
www.omniscriptum.com

OMNIScriptum

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY