المجلة الدولية للهندسة وتقنية المعلومات
journal homepage:www.ijeit.misuratau.edu.ly

دراسة فاعلية مبادل حراري من نوع الصفائحي

(حالة دراسية لمبادل تبريد اللبن بمصنع النسيم نوعFront 8_RM)

أ.علي البدوي أحمد حقيق
جامعة مصراتة، هندسة ميكانيكية
Ali.hegaig@eng.misuratau.edu.ly

م.حنين عبد السلام الجبو
جامعة مصراتة، هندسة ميكانيكية
h.aljabo@eng.misuratau.edu.ly

م.هناء منتصر بن غزي
جامعة مصراتة، هندسة ميكانيكية
hanaa.bengozzi@eng.misuratau.edu.ly

الملخص: **إن الغاية الأساسية من هذه الدارسة هي معرفة أنواع المبادلات الحرارية، وأسس تصنيفها، وأهميتها في التطبيقات الهندسية والصناعية من الناحية الحرارية، والتركيز على المبادلات الحرارية الصفائحية بصفة خاصة؛ وذلك لاهميتها واستخدامها الواسع خصوصا بالمصانع الغذائية، لذلك أخذت حالة دراسية بمصنع النسيم للصناعات الغذائية(مبادل تبريد اللبن) ،حيث هدفت هذه الدراسة إلى حساب فاعلية هذا المبادل الحراري الصفائحي، ودراسة بعض العوامل المؤثرة على فاعليته مثل معدلات التدفق الداخلة،وكذلك درجات حرارة الدخول، وسمك الصفيحة، وقد احتسبت كمية الحرارة المنتقلة خلاله، حيث كانت600kw، ومعامل انتقال الحرارة الكلي كان 50w/m²K، وعدد الوحدات المنتقلة NTU=18.ولقد تركزت الدراسة على التحليل الحراري لحساب الفاعلية؛ لذلك اختيرت المعادلات الحسابية المناسبة التي تتماشى معا الحالة الدراسية مثل نوع الانسياب، حيث كان مضطربا، والموائع المستخدمة(سائل وسائل) أحادية الطور،حيث كان اللبن (المائع الساخن)المراد تبريده من 45°c إلى 12°c بالماء(المائع البارد)، واستخدمت طريقة عدد الوحدات المنقولة (NTU)لحساب الفاعلية؛ لدقتها العالية وحسبً للظروف التشغيلية للمبادل، ولتسهيل وزيادة دقة هذه الحسابات فقد أعد برنامج بلغة(Mathlab)، ونوقشت وحللت النتائج المتحصل عليها.**

خلُصت هذه الدراسة إلى أنه: لزيادة فاعلية المبادل الصفائحي يجب زيادة المساحة الفعالة لانتقال الحرارة إلى الصفائح، وذلك بالتحكم بعدة عوامل تصميمية، وذلك من خلال الاطلاع عليها عند الاختيار للموديل مثل زاوية الميول β (Chevron angle)، وعدد وترتيب المسارات، وأيضا تزداد الفاعلية بزيادة الاضطراب لانسياب الناتج من زيادة انحدار تموج الصفائح، وكذلك بزيادة معدل تدفق المائع البارد، وأيضا بزيادة عدد وحدات الحرارة المنقولة NTU ، ولقد بلغت قيمة الفاعلية المتحصل عليها 97.8 %؛ وذلك لأن سعة المبادل المستخدم أكبر من الحمل الحراري الفعلي، وأيضا لإهمال مقاومة الاتساخ نظرً لإجراء عمليات التنظيف حسب متطلبات سلامة الغذاء.

الكلمات المفتاحية : **المبادلات الحرارية، المبادل الصفائحي، فاعلية المبادل الحراري، العوامل المؤثرة على المبادل.**

1. المقدمة

التبادل الحراري هو عملية انتقال الحرارة من وسط لآخر من خلال أجهزة تُعرف بالمبادلات الحرارية، وهي عبارة عن أجهزة لانتقال الحرارة تستخدم لنقل الطاقة الحرارية الداخلية بين سائلين أو أكثر بدرجات حرارة مختلفة.

فكرة التبادل الحراري خلال المبادلات الحرارية تنتقل الحرارة عادة من المواد الحارة إلى المواد الباردة، ويؤدي ذلك إلى انخفاض درجة حرارة المواد الحارة وارتفاع درجة حرارة المواد الباردة، ويكون مقدار الحرارة المفقودة مساويًا للحرارة المكتسبة مضافًا إليه الحرارة المتسربة إلى الجو.

الحرارة المفقودة = الحرارة المكتسبة + الحرارة المتسربة إلى الجو

استلمت الورقة بالكامل في 30 يوليو 2022 وروجعت في 15 اغسطس 2022
وقبلت للنشر في 30 سبتمبر 2022

ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 1 ديسمبر 2022.

2. تحليل المبادل الحراري:

من القانون الأول لديناميكا الحرارة مع إهمال التغير في طاقة الوضع وطاقة الحركة وإهمال الشغل، وتحت ظروف تكون فيها الحرارة المنتقلة من المائع الساخن إلى المائع البارد متساوية [1]:

$$Q_h = Q_c \qquad (1)$$

$$Q_h = A[\dot{m}\, C_p]_h\,(T_{h1} - T_{h2}) \qquad (2)$$

$$\mathrm{Q_c = A[\,\dot{m}C_p]_C(T_{c2} - T_{c1})} \qquad (3)$$

إن الفرق في درجات الحرارة بين المائع البارد والمائع الساخن يختلف على طول المبادل الحراري، عليه فإنه من المناسب اقتراح فرق في درجات الحرارة بين المائعين يسمى متوسط فرق درجات الحرارة ΔT_m؛ وعليه فإن معدل انتقال الحرارة بين المائعين Q يمكن أن يعطى بالعلاقة التالية[1] :

$$Q = UA\Delta T_{\mathrm{m}} \qquad (4)$$

وفيما يلي توضيح لكيفية إيجاد معامل انتقال الحرارة الكلي.

$$\frac{1}{\mathrm{U\,A}} = \mathrm{R_{convi} + R_{cond} + R_{convo}} \qquad (5)$$

أو بصورة أخرى:

$$\frac{1}{\mathrm{U}} = \frac{1}{\mathrm{h_i}} + \frac{\Delta \mathrm{X}}{\mathrm{K}} + \frac{1}{\mathrm{h_o}} \qquad (6)$$

وفيما يلي توضيح كيفية إيجاد معامل انتقال الحرارة بالحمل للمائع الداخلي والخارجي $\mathrm{h_o, h_i}$ المطلوبة لحساب معامل انتقال الحرارة الكلي U من بعض الصيغ الترابطية لأرقام نسلت لأنواع مختلفة من الانسياب [1].

يعتمد رقم نسلت على كل من:

$$\mathrm{Nu = f(Re, Pr, \mu\,, Dh)} \qquad (7)$$

حيث :

Re: رقم رينولدز هو رقم يحدد نوعية سريان السائل يوجد له قيمةحرجة لسريان الداخلي، ومنها تحدد ما إذا كان السريان مضطرب أو طبقي(رقائقي).

$$\mathrm{Re} = \frac{Gc.Dh}{\mu} \qquad (8)$$

القوانين الموضحة لمبادل من نوع صفائحي [2]

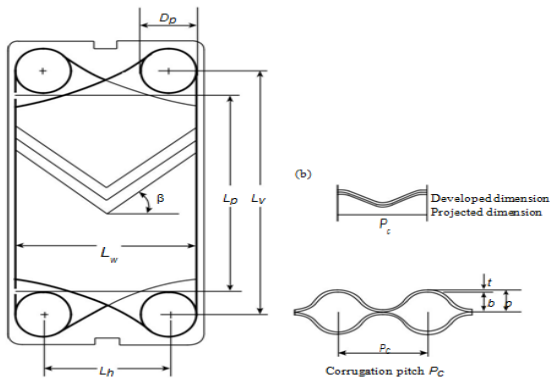
$$Gc = \frac{\dot{m}}{Ncp * b * Lw} \quad (9)$$

$$Ncp = \frac{Nt - 1}{2 * Np} = \frac{1 - \text{العدد الكلي للصفائح}}{2 * \left(one \frac{pass}{one} pass\right)} \quad (10)$$

$$b = (p - t) \quad (11)$$

$$p = \frac{Lc}{Nt} \quad (12)$$

الشكل رقم (1) يوضح أبعاد صفيحة المبادل الحراري من النوع الصفائحي:



الشكل (1) أبعاد صفيحة المبادل الحراري (1)[3].

في حالة المبادلات الأنبوبية يأخذ قطر أنبوب المبادل الحراري مباشرةً، أما المبادلات الصفائحية يحسب القطر الهيدروليكي لمبادل صفائحي من المعادلات التالية[2]:

$$Dh = \frac{4\ Lw\ b}{2(Lw + b)} = \frac{4 * \text{المساحة المقطعية}}{\text{المحيط}} \quad (13)$$

$$Dh \approx \frac{2b}{\theta} \quad (14)$$

$$\theta = \frac{A1}{A1p} = \frac{\text{المساحة المطورة}}{\text{المساحة الفعلية(المسطحة)}} \quad (15)$$

$$A1 = \frac{At}{Ne} \quad (16)$$

وهي المساحة الكلية لعدد الصفائح بالنسبة إلى عدد الصفائح التي تحدث بها عملية التبادل الحراري [2].

$$Ne = Nt - 2 \quad (17)$$

$$A1p = Lp * wp \quad (18)$$

$$Pr = \frac{C_p . \mu}{k} \quad (19)$$

بحيث يكون رقم نسلت في حالة الانسياب الداخلي للمبادل الصفائحي على النحو التالي:

$$Nu = 0.26 * Re^{0.65} * Pr^{n} \quad (20)$$

$n = 0.4$ في حالة التسخين.

$n = 0.3$ في حالة التبريد.

وبالتالي يمكن إيجاد معامل انتقال الحرارة بالحمل بدلالة رقم نسلت من المعادلة التالية [2]:

$$h = \frac{K * Nu}{Dh} \quad (21)$$

احتسبت الفاعلية باستخدام طريقة الوحدات المنتقلة طريقة الفاعلية تستخدم هذه الطريقة للمبادلات الحراري المدمجة (المبادل الصفائحي).

$$\varepsilon = \frac{\left(1 - \exp^{-NTU*(1-C^*)}\right)}{\left(1 - C^* \exp^{-NTU*(1-C^*)}\right)} \quad (22)$$

حيث C^* هي نسبة معدل السعة الحرارية، معدل السعة الحرارية الأصغر $Cmin$ إلى معدل السعة الحراريالأكبر $Cmax$

$$C^* = \frac{Cmin}{Cmax} = \frac{(\dot{m}c_p)_{min}}{(\dot{m}c_p)_{max}} \quad (23)$$

NTU: عدد الوحدات المنقولة هي كمية لا بعدية (Dimensionless)، أي حاصل ضرب معامل انتقال الحرارة الكلي في مساحة سطح المبادل الحراري مقسوما على أقل سعة حرارية للمائعين[4].

$$NTU = \frac{U * A}{(\dot{m}c_p)_{min}} = \int U\, dA \quad (24)$$

3. المناقشة والنتائج

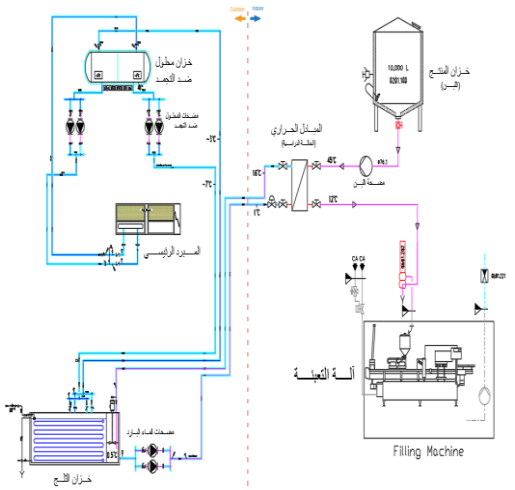
أ. *الحالة الدراسية*

نظراً لامتلاك شركة النسيم للصناعات الغذائية مبادل حراري من نوع الصفائحي داخل أروقة مصنعها تم اختيار هذا المبادل لإجراء حالة الدراسة مبادل حراري صفائحي من نوع(Front 8_RM).ساهمت الشركة في توفير المواصفات التصنيعية للمبادل الحراري الصفائحي المستخدم في المصنع، والجدول التالي يوضح هذه المواصفات.

الجدول (1): مواصفات المبادل الحراري

1	المساحة السطحية للصفيحة	0.374m2
2	نوع معدن الصفيحة	Stainless steel alloy 316
3	المساحة الكلية	45.6m2
4	سمك الصفيحة	0.5mm
5	عدد الصفائح	122 Plates
6	طول الصفيحة	1m
7	عرض الصفيحة	0.272m
8	طول الصفائح المضغوط	0.076m

المبادل الحراري يكون ضـــمن منظومة متكاملة كي يتمكن من أداء وظيفته بفاعلية ممتازة؛ وذلك بواســطة أجهزة تبريد ومضــخات وأنابيب، والشــكل (2) يوضح مكان المبادل الحراري.



الشكل (2) منظومة تبريد اللبن بالمصنع

تنجز عمليـة التبريـد بـإعطـاء أمر من غرفـة التحكم بطريقـة أوتوماتيكية،فيقوم المبرد الرئيسي بتبريد محلول ضد التجمد مكون من(الماء والمونوتيلين) يخرج بدرجة حرارة 7C- يضـــخ المحلول إلى مبادل داخل خزان الثلج الذي بدوره يعمل على تبريد الماء إلى درجة حرارة 1C، يضخ الماء البارد إلى المبادل بواســطة مضــخات؛ وذلك لتبريد اللبن الذي يدخل بدرجة حرارة43C،يدخل المنتج بشكل متواصل من جانب ودخول الماء من الجـانـب الآخر،فيخرج المنتج من الجهـة الأخرى من المبـادل إلى خزان التعبئة،وتراقب هذه العملية من منظومة التحكم عن طريق مراقبة درجات الحرارة، والضـغط والتدفق في حال حدوث أي خلل في الشـروط المذكورة توقف العملية أوتوماتيكيا.

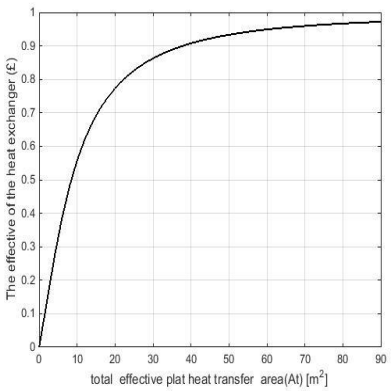
وقد اختبر أداء المبادل الحراري الصفائحي عند شروط عمله، حيث تستخدم شـركة النسـيم المبادل الحراري في تغيير درجة حرارة اللبن، كما اسـتُعين بقيم واقعية مرصـودة من الشـركة لخواص الموائع المسـتخدمة عند درجات الحرارة المسـتخدمة من المصـنع، الجدول (2)يوضـح خواص هذه الموائع، حيث أسـفرت عملية المحاكاة بأن المبادل الحراري بالشـركة يشـتغل بفاعلة 97.8% عند الظروف المرصودة من المصنع.

الجدول (2): خواص الموائع المستخدمة في المبادل الحراري.

خواص المائع	المائع البارد (الماء)	المائع الساخن (اللبن)
الكثافة	999.76Kg/m^3	940 Kg/m^3
اللزوجة	Cp1.3	Cp3.5
الحرارة النوعية	4180 J/Kg. c	3851.85 J/Kg. c
معدل التدفق الحجمي	19650 L/H	19650 L/H
درجة حرارة الدخول	1	44
درجة حرارة الخروج	16	12

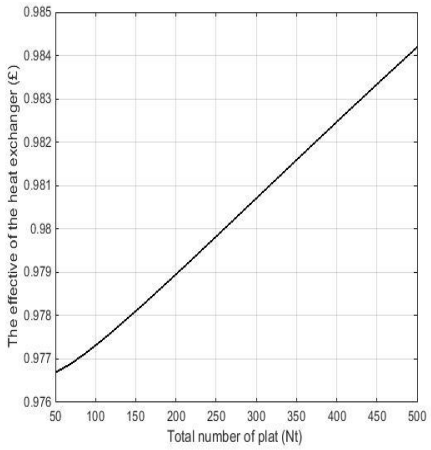
ب. النتائج

الشكل (3) يوضح العلاقة بين فاعلية المبادل الحراري الصفائحي والمساحة الكلية الفعالة لصفائحه، والتي يتضح من الشكل أنها علاقة طردية تزايدية، فكلما كانت المسـاحة الفعالة للصـفائح أكبر كان المبادل أكبر فاعلية، إلا أن الفاعلية تتغير بشـكل كبير في بادئ الأمر، ثم يصـبح التغير في الفاعلية طفيف، مقارنة بالتغير في المسـاحة؛ ما يجعل الزيادة في المسـاحة عند حد معين غير مُجدٍ مقارنة بتكاليف التصنيع.



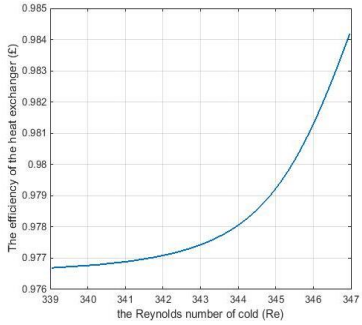
الشكل (3) العلاقة بين فاعلية المبادل الحراري الصفائحي والمساحة الكلية الفعالة للصفائح.

كما تتأثر فاعلية المبادل الحراري بعدد الصـــفائح المســـتخدمة في المبادل، الشـكل (4) يوضـح أثر هذه العلاقة، حيث يتضـح من الشـكل كونها علاقة طردية تزايدية، تزداد فيها قيمة الفاعلية بازدياد عدد الصـــفائح، إلا أن هذه الزيادة محكومة بتكاليف التصنيع، والمساحة المخصصة للمبادل في أروقة مكان العمل.

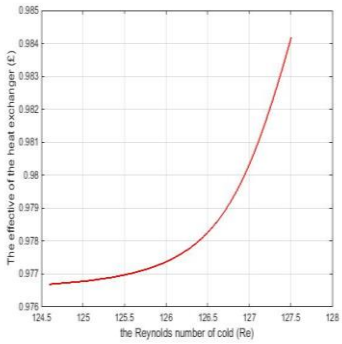


الشكل (4) العلاقة بين فاعلية المبادل الحراري الصفائحي وعدد الصفائح.

يعبر رقم رينولدز عن مدى اضـــطراب المائع، والذي يؤثر بشـــكل مباشر على معدل الحرارة المنتقلة، حيث يتضح من الشكل (5) أن تأثير رقم رينولدز للمائع البارد على فاعلية المبادل الحراري الصـــفائحي المســـتخدم طردي تزايدي، وهذا ما يؤكد منطقية النتائج المتحصـــل عليها، حيث يزداد معدل انتقال الحرارة بازدياد الاضـــطراب، والذي يســـبب في ازدياد فاعلية المبادل، وهذا ماناه أيضا في الشكل (6) والذي يوضح العلاقة تزايدية بين كل من رقم رينولدز لمائع الساخن مع الفاعلية

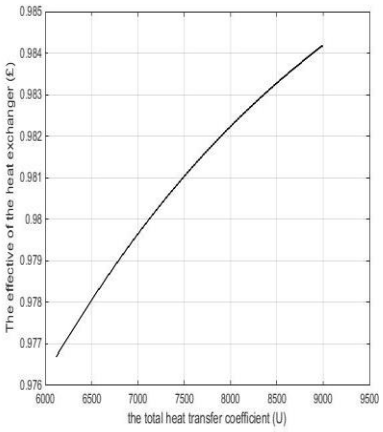


الشكل (5): تأثير رقم رينولدز للمائع البارد على فاعلية المبادل الحراري الصفائحي المستخدم طردي تزايدي



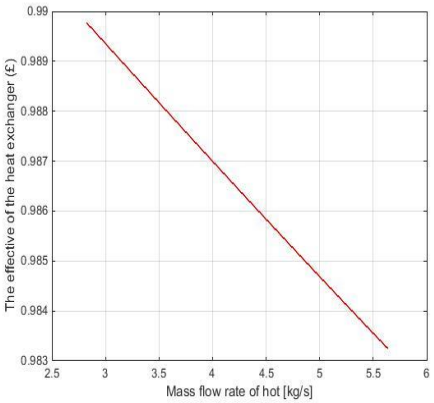
الشكل (6): يوضح العلاقة التزا يدية بين كل من رقم رينولدز للمائع الساخن مع الفاعلية.

عند دراسة العلاقة المتحصل عليها من عملية المحاكاة بين معامل انتقال الحرارة الكلي مع فاعلية المبادل، والموضحة في الشكل (7)، اتضح أنه كلما زاد معامل انتقال الحرارة الكلي زادت فاعلية المبادل، وتكون الزيادة شبة منتظمة والعكس صحيح عند النقصان.



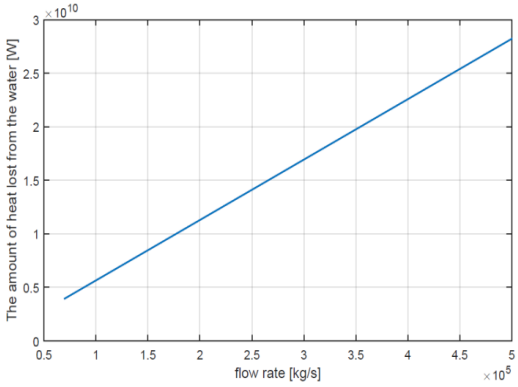
الشكل (7) العلاقة بين فاعلية المبادل الحراري الصفائحي ومعامل انتقال الحرارة الكلي.

العلاقة بين معدل التدفق الكتلي للمائع الساخن مع فاعلية المبادل كما في الشكل (8) عكسية في خط مستقيم، أي (منتظمة)، بحيث أنه كلما زاد معدل التدفق تناقصت الفاعلية، وكلما تناقص معدل التدفق زادت الفاعلية.

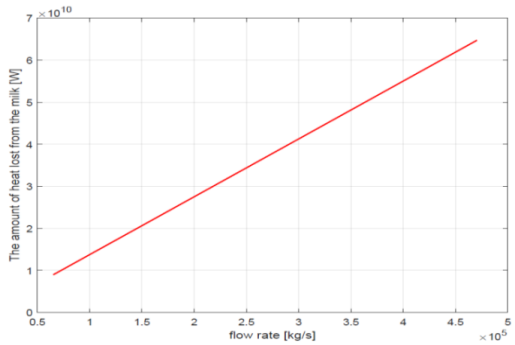


الشكل (8) العلاقة بين فاعلية المبادل الحراري ومعدل التدفق الكتلي للمائع الساخن.

كما يؤثر معدل التدفق الكتلي للمائعين على الحرارة المطرودة والمضافة، وهذا يتضح جلياً من قانون نيوتن للتبريد، كلما زادت قيمة التدفق الكتلي زادت كمية الحرارة، وهذا مايتضح في الشكل (9)، والشكل (10)، حيث تكون العلاقة طردية تزايدية بين معدل الحرارة المنقولة للمائع الساخن والبارد ومعدل التدفق الكتلي، وكلما زادة معدل التدفق تزايد معدل الحرارة المضافة والمطرودة.

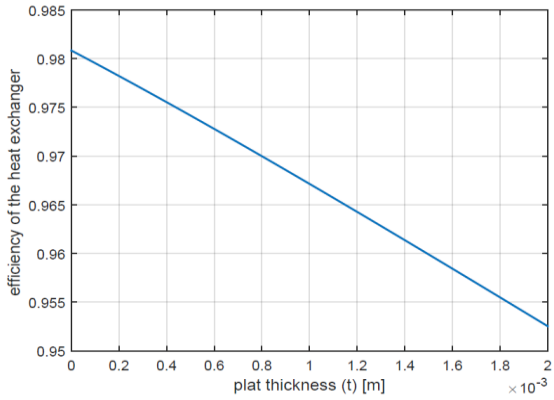


الشكل (9) العلاقة بين كمية الحرارة المطرودة ومعدل التدفق الكتلي للمائع البارد.



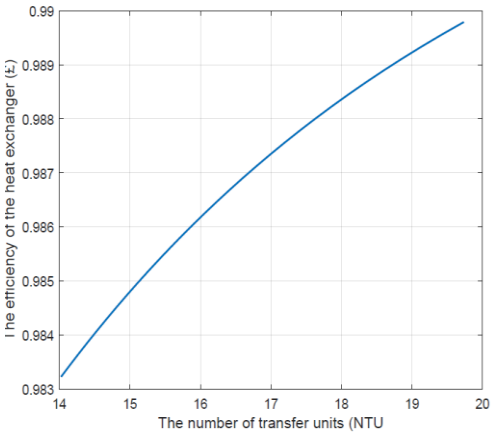
الشكل (10) العلاقة بين كمية الحرارة المضافة ومعدل التدفق الكتلي للمائع الساخن.

عند دراسة العلاقة بين سمك الصفيحة مع فاعلية المبادل الصفائحي يمكن اعتبار العلاقة عكسية (منتظمة) بينهما كما موضح بالشكل(11)؛ فكلما زاد السمك تناقصت فاعلية المبادل،حيث أن الحرارة تنتقل خلال جدار الصفيحة بالتوصيل، ما يجعلها تخضع لقانون فوريير، والذي يؤثر فيه سمك الجدار تأثير عكسي على كمية الحرارة المنتقلة.



الشكل (11)العلاقة بين سمك صفيحة المبادل الحراري وفاعليته.

كما يوضح الشكل (12) العلاقة التزايديه بين عدد وحدات الحرارة المنتقلة وفاعلية المبادل.



الشكل (12) العلاقة بين فاعلية المبادل وعدد وحدات الحرارة المنقولة

4. الاستنتاجات

من خلال النتائج التي توصلت إليها هذه الدراسة يمكن استنتاج الآتي:

1. القيام بمحاكاة مبادل بشركة النسيم، بلغت فاعليته 97.8%.
2. ترتبط الفاعلية بالمساحة الفعالة للصفائح بعلاقة تزايدية؛ حيث أنه كلما كانت المساحة الفعالة للصفائح أكبر كان المبادل أكبر فاعلية عند حد معين من المساحات، وتصبح الزيادة في المساحة غير مجدية مقارنة بتكاليف التصنيع.
3. ترتبط الفاعلية بعدد الصفائح بعلاقة تزايدية؛ نظرا لزيادة أماكن انتقال الحرارة.
4. يرتبط معامل انتقال الحرارة بشدة الاضطراب بعلاقة تزايدية؛ ما يزيد من الفاعلية، حيث كلما زاد انحدار التموجات لصفيحة زاد الاضطراب،ما يزيد من معامل انتقال الحرارة،وبالتالي تزداد الفعالية.
5. بزيادة معدل التدفق تقل فاعلية المبادل؛ لأن عملية انتقال الحرارة تكون بصورة أسرع، ولا تأخذ الوقت الكافي لعملية تبادل الحرارة.
6. تتأثر فاعلية المبادل الحراري بعدد وحدات الحرارة المنقولة NTU؛ ولذلك تزداد فاعلية المبادل الحراري بزيادة عدد وحدات الحرارة المنقولة عند قيم محددة من C^*، وتزداد الفاعلية بانخفاض C^*لقيم محددة من عدد وحدات الحرارة المنتقلة.

ومن خلال الاطلاع على توصيات الشركة المصنعة فمعدل استخدام المساحة بين مدى (1.17-1.25)، وأيضا بعد إجراء العمليات الحسابية اتضح أن نسبة المساحة (1.39) وهذا يعني بأن المبادل المستخدم أكبر من السعة المطلوبة، وبالتالي يؤدي إلى تكلفة زائدة.

5. المراجع

1. التومي صالح & الناري صلاح، **تحليل أداء مبادل حراري من نوع الغلاف والانبوب**. إشراف د. جمال صالح ياسين،سنة 2016م.
2. G.Anusha & P.S.Kishore , Heat Transfer Analysis of Gasketed Plate Heat Exchanger, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering (A), Andhra University, Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India , 1 December 2016
3. Rahul1, Nitin Kumar2, Vinod Sehrawat3, Tarun Gupta4, Ravindra Manju5, Md. Iqbal Ahmad6 1M.tech Scholar,DESIGN ANALYSIS OF GASKETED PLATE HEAT EXCHANGER, NGF College Of Engineering And Technology, Palwal (Haryana),India 2,3,4Assistant Professor, NGF College of Engineering and Technology, Palwal, India 5,6Department of Mechanical Engineering, University Of Engineering and Management, Jaipur (Rajasthan),India, May-2017
4. T. KUPPRN, Southern Railway Madras, India,Heat exchanger design handbook