



الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم الميكانيك العام (الهندسة الحرارية)

تصميم واختبار مبادل حراري صفائحي متعدد الممرات

Design and Experimental Test of A multi-passages

Plate Heat Exchanger

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في الهندسة الحرارية

إعداد الطالبة: مرح مال الله

إشراف: أ. د. م. نصر ياسين

العام الدراسي

2023

قرار لجنة الحكم على بحث الماجستير

استناداً الى اللائحة التنفيذية لقانون تنظيم الجامعات الصادرة بالمرسوم الجمهوري رقم /250/ لعام 2006، وقرار مجلس جامعة دمشق رقم 2411/15 ص تاريخ 2022/05/10 بشأن إجراءات القيد والمناقشة العلنية ومنح الدرجات العلمية في جامعة دمشق، وقرار مجلس جامعة دمشق رقم /840/ ص تاريخ 2019/3/13 بشأن الموافقة على تسجيل رسالة الماجستير لطالبة الدراسات العليا مرح مال الله، لنيل درجة الماجستير في الهندسة الحرارية بعنوان:

" تصميم واختبار مبادل حراري صفائحي متعدد الممرات "

وتسمية الدكتور نصر ياسين مشرفاً، واستناداً إلى أحكام المادتين 163 و 164 من اللائحة التنفيذية لقانون تنظيم الجامعات الصادرة بالمرسوم الجمهوري رقم /250/ تاريخ 2006/7/10، وإشارةً إلى قرار مجلس الكلية رقم /1193/ تاريخ 2023/1/29 باقتراح تشكيل لجنة الحكم والمصادق عليه بقرار مجلس البحث العلمي والدراسات العليا رقم /2481/ م. ب. د المتخذ في الجلسة رقم /11/ المنعقدة بتاريخ 2023/2/27، المتضمن تشكيل لجنة الحكم من السادة :

الدكتور نصر ياسين: أستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام - جامعة دمشق عضواً ومشرفاً

الدكتور أيمن الخباز: أستاذ المساعد في قسم هندسة الميكانيك العام - جامعة دمشق عضواً

الدكتورة براءة حمادي : مدرسة في قسم هندسة الميكانيك العام -جامعة دمشق عضواً

وبعد أن قامت لجنة الحكم بمناقشة رسالة الماجستير التي تقدمت بها طالبة الدراسات العليا المهندسة مرح مال الله في جلسة علنية في تمام الساعة الثانية عشرة ظهراً من يوم /الأربعاء/ الموافق 2023/4/26، فقد قامت الباحثة بالتعديلات المطلوبة من اللجنة على الرسالة وأصبحت جاهزة .

الدكتور	الدكتور	الدكتورة
نصر ياسين	أيمن الخباز	براءة حمادي

أعضاء لجنة الحكم والقرار الناظم لذلك

الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

قرار مجلس البحث العلمي والدراسات العليا رقم /2481/ المتخذ بالجلسة رقم /11/ تاريخ

2023/2/27

اطلع مجلس البحث العلمي والدراسات العليا على قرار مجلس كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية رقم /1193/ تاريخ 2023/1/29 وبعد الرجوع إلى اللائحة التنفيذية لقانون تنظيم الجامعات الصادرة بالمرسوم /250/ لعام 2006.

قرار مجلس جامعة دمشق رقم /1535/ ص. م تاريخ 2022/4/20 بشأن الموافقة على تمديد تسجيل رسالة

الطالبة لمدة سنة اعتباراً من 2022/3/13 لغاية 2023/3/13

-يضاف إلى نهاية المدة المستحقة للتسجيل (78يوم) من تاريخ 2023/3/14 لغاية 2023/5/31 استناداً إلى المادة /3/ الفقرة -أ- من قرار وزارة التعليم العالي رقم /324/ تاريخ 2020/7/16.

وبنتيجة المذاكرة قرر مجلس البحث العلمي والدراسات العليا:

الموافقة على تأليف لجنة الحكم على رسالة الماجستير في قسم هندسة الميكانيك العام التي أعدها الطالبة **مرح مال الله**، بعنوان " تصميم واختبار مبادل حراري صفائحي متعدد الممرات " بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية من السادة الأساتذة:

د.نصر ياسين الأستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

جامعة دمشق الاختصاص: الترموديناميك عضواً ومشرفاً

د.أيمن الخباز الأستاذ المساعد في قسم هندسة الميكانيك العام كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

جامعة دمشق الاختصاص: آلات حرارية عنفية عضواً

د.براءة حمادي مدرس في قسم هندسة الميكانيك العام كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

جامعة دمشق الاختصاص: الطاقة الشمسية اقتصاديات نظم الطاقة عضواً

تصريح خطي

أنا الموقع أدناه أصرح بعلمي الكامل وقبولي:

1. أن كل ما ينتج عن البحث والأطروحة هو ملكية فكرية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنني التزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتي بنشر البحث أو الأطروحة أو جزء منها نصاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكنتبات أو مواقع الكترونية وغيرها من وسائل النشر).

2. انه لا يوجد أي جزء من هذه الأطروحة تم اقتباسه من عمل علمي آخر أو انجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أية جامعة أو معهد تعليمي داخل أو خارج الجمهورية العربية السورية.

الاسم والتوقيع

سُبْحَانَكَ يَا قُدُّوسُ

"رَبِّ أَوْزِعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَىٰ وَالِدَيَّ وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا تَرْضَاهُ وَأَدْخِلْنِي بِرَحْمَتِكَ

فِي عِبَادِكَ الصَّالِحِينَ"

لَكَ الْحَمْدُ حَمْدًا نَسْتَلْذُ بِهِ ذِكْرًا وَإِنْ كُنْتُ لَا أَحْصِي ثَنَاءً وَلَا شُكْرًا

لَكَ الْحَمْدُ حَمْدًا طَيِّبًا يَمَلَأُ السَّمَاءَ وَأَقْطَارَهَا وَالْأَرْضَ وَالْبَرَّ وَالْبَحْرَ

أَهْدِيكَ يَا إِلَهِي عَمَلِي خَالصًا لَوَجْهِكَ الْكَرِيمِ عَسَى أَنْ تَمَنَّ عَلَيَّ بِجُودِكَ وَكَرَمِكَ وَتَقْبَلَهُ مِنِّي

إِلَى مُعَلِّمِي الْأَوَّلِ . .

إِلَى طَبِيبِ الرُّوحِ وَكُلِّ مَنْنَى إِلَى مَنْ كَانَتْ رُوحِي وَأَبِي وَأُمِّي لَهُ فِدَا . . .

حَبِيبِي وَشَفِيعِي مُحَمَّدٌ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ

أدري بأنك مذ ولدت وأنت يغمرك التعب . . أدري بأنك لست تظهره حتى وإن ظهر الغضب . .
 والله لو وقع الغبار على قميصك لانشئ قلبي عليك واضطرب . . ما زلت أمشي خلف خطوك واثقةً أنني حظيت بخير
 أب . . . إليك والدي . . سندي وعزي وأماني . .

والدي محمد مال الله

إلى سيدة النساء . . . إلى مهجة الروح وضياء البصر . . .
 والله ما خططت حرفاً إلا وكان بفضل الله وفضل دعائك . . .
 حبيبة الروح . . . لو سجدت شكراً لكونك أُمي لمضى عمري وأنا ساجدة . . .

والدتي هناء شاكر

إلى رفيق الدرب وصديق الأيام مجلوها ومرها . . . من هودائم الثقة بنجاحي . . . ومن اخذ بيدي نحو ما أريد . . .
 إلى من وقف بجانبني لاحتق طموحي العلمي . . . إلى نصيبي الاجمل من الدنيا زوجي الغالي

محمد عروس

إلى زينة حياتي وبهجتها . . . إلى من حلت بركة وجودهم في حياتي . . . إلى الطفولة التي ملأت عالمي وابهجت
 جوارحي . . . ومن ملأت ضحكاتهم الجميلة عمري . . . إلى الابتسامات التي تغدق علي الأمل . . .
 إلى من استمر بالتقدم لاجلهم راجية الله أن أكون خير قدوة وموجه لهم . . . ابنائي

نسيب وحمزة وعمر

فهرس المحتويات

17	الإطار العام للبحث
17	مقدمة:
17	مشكلة البحث:
17	الهدف من البحث:
17	أهمية البحث:
17	مسوغات البحث:
17	محددات البحث:
18	حدود البحث:
18	منهج البحث وأدواته:
19	الفصل الأول
19	1- الدراسات المرجعية:
19	1.1. الدراسة الأولى:
20	2.1. الدراسة الثانية:
21	3.1. الدراسة الثالثة:
23	4.1. الدراسة الرابعة:
25	5.1. الدراسة الخامسة:
27	6.1. الدراسة السادسة:
30	7.1. الخلاصة من الدراسات السابقة:
31	الفصل الثاني
31	المبادلات الحرارية
31	1-2- مقدمة:
31	2-2- آلية التبادل الحراري خلال المبادلات الحرارية:
31	2-3- الغرض الرئيسي والوظائف الأساسية للمبادل الحراري:
32	2-4- تصنف المبادلات الحرارية وفقاً للمعايير الرئيسية التالية:
32	2-4-1 عمليات النقل الحراري:
32	المبادلات الحرارية من نوع النقل المباشر (المزجية):
32	المبادلات الحرارية ذات النقل غير المباشر (السطحية):
33	المبادلات الحرارية الإرجاعية:
33	2-4-2- هندسة البناء:
33	1- المبادلات الحرارية الأنبوبية:
33	2- المبادلات الحرارية الصفائحية:
33	3- المبادلات الحرارية السطحية الممتدة:
34	2-4-3- آليات نقل الحرارة:
34	2-4-4- أشكال الجريان:
36	2-5- التطبيقات:
38	الفصل الثالث
38	المبادلات الحرارية الصفائحية
38	مقدمة:
38	3-1- الميزات الميكانيكية (MECHANICAL FEATURES):

40	1-1-3- أبعاد الصفائح والمواد المستخدمة (plates dimensions and materials):
41	1-2-3- أنواع الصفائح (Plates Types):
43	2-3- الخصائص التشغيلية (OPERATIONAL CHARACTERISTICS):
43	1-2-3- المزايا الرئيسية (main advantages):
43	2-2-3- متغيرات الأداء للمبادلات الحرارية الصفائحية:
44	3-2-3- حدود الأداء للمبادلات الحرارية الصفائحية (Performance Limit):
45	3-3- أنماط التدفق (FLOW ARRANGEMENTS):
45	1-3-3- التدفق داخل القناة الواحدة:
45	2-3-3- التدفق عبر القنوات:
45	نظام تدفق أحادي الممر:
47	نظام تدفق متعدد الممرات:
50	4-3- تطبيقات المبادل الحراري الصفائحي (APPLICATIONS):
50	المبرد البيني في التبريد المركزي:
51	مبادل برج التبريد:
51	أنظمة التدفئة المركزية:
52	التسخين بالطاقة الشمسية:
52	5-3- التآكل في المبادلات الحرارية الصفائحية:
54	الفصل الرابع.....
54	معادلات تصميم المبادل الحراري الصفائحي.....
54	1-1- المعادلة التفاضلية والشروط الحدية:
55	2-1- المعادلات الأساسية لتصميم المبادل الحراري الصفائحي:
55	1-2-1- بارامترات الصفحة الموجة:
56	2-2-1- قناة التدفق:
57	3-2-1- القطر الهيدروليكي للقناة:
57	4-2-1- معامل انتقال الحرارة:
59	5-2-1- انتقال الحرارة في الصفائح:
60	6-2-1- حساب عدد القنوات لكل ممر:
60	7-2-1- انخفاض الضغط في مبادل حراري صفائحي:
62	3-1- طريقة E-NTU لتحليل المبادل الحراري [19]:
63	الفصل الخامس.....
63	الدراسة التحليلية.....
63	1-2- الدراسة التحليلية على MATLAB:
65	2-2- دراسة حالة:
66	3-2- دراسة أثر المتغيرات الهندسية على أداء المبادل الحراري:
67	1-3-2- دراسة أداء المبادل الحراري الصفائحي عند زاوية تموج ($\beta = 30$):
68	2-3-2- دراسة أداء المبادل الحراري الصفائحي عند زاوية تموج ($\beta = 50$):
69	3-3-2- دراسة أداء المبادل الحراري الصفائحي عند زاوية تموج ($\beta = 60$):
71	4-3-2- تأثير زوايا الشيفرون على فعالية المبادل الحراري:
73	5-3-2- تأثير زوايا الشيفرون على انخفاض الضغط:
75	3-2- دراسة تغيير عدد رينولدز وانخفاض الضغط مع زيادة عدد الممرات للمائع الساخن:
77	4-2- تغيير عدد رينولدز وانخفاض الضغط مع زيادة عدد ممرات المائع البارد:
79	الفصل السادس.....

79	المحاكاة الحاسوبية
79	الاختبار الحاسوبي:
79	دراسة مبادل حراري صفائحي باستخدام ANSYS WORKBENCH
96	إيجاد درجة حرارة خروج الماء الساخن من المبادل تحليليا:
98	إيجاد درجة حرارة خروج الماء البارد من المبادل تحليليا:
100	النتائج:
101	المراجع:

فهرس الأشكال التوضيحية

- شكل (1) علاقة B بعدد الصفائح وأداء المبادل الحراري للدراسة المرجعية الأولى 20
- شكل (2) الاختبار التجريبي لمبادل نمط U للدراسة المرجعية الثالثة 21
- شكل (3) انخفاض ضغط القناة مع رقم رينولدز للدراسة المرجعية الثالثة 22
- شكل (4) انخفاض ضغط القناة مع عدد القنوات للدراسة المرجعية الثالثة 22
- شكل (5) تغير الفعالية مع معدل التدفق الكتلي للدراسة المرجعية الثالثة 23
- شكل (6) نتائج الاختبار الحاسوبي للدراسة المرجعية الرابعة 24
- شكل (7) انخفاض الضغط مع تغير H_o, λ, B للدراسة المرجعية الرابعة 24
- شكل (8) انخفاض الضغط مع تغير زاوية التمدج B للدراسة المرجعية الخامسة 25
- شكل (9) تغير الاستطاعة الحرارية مع التدفق الحجمي للدراسة المرجعية الخامسة 26
- شكل (10) تغير معامل انتقال الحرارة مع التدفق الحجمي للدراسة المرجعية الخامسة 26
- شكل (11) اختبار التدرج الحراري للصفائح للدراسة المرجعية الخامسة 27
- شكل (12) تغير الفعالية مع تغير التدفق الكتلي للدراسة المرجعية السادسة 28
- شكل (13) تغير الفعالية مع عدد رينولدز للدراسة المرجعية السادسة 29
- شكل (14) الجريان المتوازي 35
- شكل (15) الجريان المتعاكس 35
- شكل (16) مبادل حراري ذو جريان متعامد غير مختلط 36
- شكل (17) مبادل حراري ذو جريان متعامد مختلط 36
- شكل (18) تطبيقات المبادلات الحرارية 37
- شكل (19) عناصر الإطار للمبادل الحراري الصفائحي (COURTESY OF ALFA LAVAL THERMAL AB.) 38
- شكل (20) تجميع المبادل الحراري الصفائحي 39
- شكل (21) الفئات النموذجية لتموجات الصفائح 41
- شكل (22) الأبعاد الرئيسية لصفحة الشيفرون 42
- شكل (23) أنماط التدفق داخل القناة الواحدة 45
- شكل (24) نمط تدفق U للمبادل الصفائحي 46
- شكل (25) نمط تدفق Z للمبادل الصفائحي 46
- شكل (26) نظام تدفق متعدد الممرات 47
- شكل (27) مبادل حراري من نوع أسطوانة والغلاف متعدد الممرات 47
- شكل (28) رسم تخطيطي لمبادل حراري صفائحي متعدد الممرات 48
- شكل (29) مخطط توضيحي لترتيب تمريرة واحدة/تمريرتان ($8 \times 1/4 \times 2$) 48
- شكل (30) مخطط توضيحي لترتيب ثنائي الممرات لكلا المائعين ($3 \times 2/3 \times 2$) 49

- شكل (31) مخطط توضيحي لترتيب ثنائي الممرات للمانع الأول وثلاثة ممرات للمانع الثاني..... 49
- شكل (32) نظام تبريد الدائرة المغلقة [15]..... 50
- شكل (33) تطبيق مبادل برج التبريد..... 51
- شكل (34) تطبيق مبادل في نظام التدفئة المركزية..... 51
- شكل (35) تطبيق مبادل سخان شمسي..... 52
- شكل (36) التدفق المضطرب في المبادل الصفائحي [15]..... 53
- شكل (37) توازن الطاقة الكلي للسوائل الساخنة والباردة لمبادل حراري ثنائي السوائل..... 54
- شكل (38) ابعاد الصفيحة..... 56
- شكل (39) خطوة التموج..... 56
- شكل (40) المخطط الصندوقي للخوارزمية..... 64
- شكل (41) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن ST316 B=30°..... 67
- شكل (42) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن تيتانيوم B=30°..... 67
- شكل (43) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن ST316 B=50°..... 68
- شكل (44) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن تيتانيوم B=50°..... 69
- شكل (45) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن ST361 B=60°..... 70
- شكل (46) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن تيتانيوم B=60°..... 70
- شكل (47) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن ST316 لمختلف زوايا التموج..... 71
- شكل (48) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن تيتانيوم لمختلف زوايا التموج..... 72
- شكل (49) مخطط تغير هبوط الضغط مع عدد الصفائح لمعدن ST316 للماء البارد..... 73
- شكل (50) مخطط تغير هبوط الضغط مع عدد الصفائح لمعدن التيتانيوم للماء الساخن..... 74
- شكل (51) مخطط تغير عدد رينولدز مع عدد الممرات للماء الساخن..... 75
- شكل (52) مخطط تغير انخفاض الضغط مع عدد الممرات للماء الساخن..... 76
- شكل (53) مخطط تغير عدد رينولدز مع عدد الممرات للماء البارد..... 77
- شكل (54) مخطط تغير انخفاض الضغط مع عدد الممرات للماء البارد..... 78
- شكل (55) الشكل الهندسي لمبادل بثلاث صفائح..... 79
- شكل (56) مبادل حراري بزاوية تموج 30..... 80
- شكل (57) مبادل حراري بزاوية تموج 50..... 80
- شكل (58) مبادل حراري بزاوية تموج 60..... 81
- شكل (59) شبكة العناصر المنتهية..... 81
- شكل (60) اختيار نوع المعالجة وعدد النوى اللازمة للحل..... 82
- شكل (61) ضبط الإعدادات العامة..... 82
- شكل (62) تفعيل نموذج الحرارة..... 83

- شكل (63) تفعيل نموذج الجريان 83
- شكل (64) مدخلات خواص الماء 84
- شكل (65) خواص ستانليس ستيل 84
- شكل (66) وضع الشروط الحدية للماء البارد عند الدخول 85
- شكل (67) اختيار طريقة الحل 87
- شكل (68) توزيع الحرارة على كامل المبادل بزاوية 50 89
- شكل (69) توزيع الحرارة على الصفيحة الوسطى للزاوية 50 89
- شكل (70) توزيع الحرارة على كامل المبادل بزاوية 60 90
- شكل (71) توزيع الحرارة على الصفيحة الوسطى بزاوية 60 90
- شكل (72) توزيع الحرارة على كامل المبادل بزاوية 30 91
- شكل (73) توزيع الحرارة على الصفيحة الوسطى بزاوية 30 91
- شكل (74) توزيع الضغط على المبادل بزاوية 50 92
- شكل (75) توزيع الضغط على الصفيحة الوسطى بزاوية 50 92
- شكل (76) توزيع الضغط على كامل المبادل بزاوية 60 93
- شكل (77) توزيع الضغط على الصفيحة الوسطى بزاوية 60 93
- شكل (78) توزيع الضغط على كامل المبادل بزاوية 30 94
- شكل (79) توزيع الضغط على الصفيحة الوسطى بزاوية 30 94
- شكل (80) المخطط الصندوقي لحساب درجة حرارة خروج الماء الساخن 96
- شكل (81) المخطط الصندوقي لحساب درجة حرارة خروج الماء البارد 98

فهرس الجداول

40	جدول (1) مواد الصفیحة [23]:
52	جدول (2) اختیار مادة الصفیحة حسب التطبيق [23]:
58	جدول (3) الثوابت الخاصة بحساب انتقال الحرارة وانخفاض الضغط في PHE من أجل صفائح مموجة.....
60	جدول (4) العلاقات التي تحدد عدد القنوات في كل ممر لكلا المانعین [3]:
65	جدول (5) مواصفات الصفیحة ومواصفات الماء البارد والساخن:
88	جدول (6) توصیف النمذجة العددية المستخدمة في الحل على برنامج ANSYS:
95	جدول (7) نتائج الاختبار الحاسوبي:
97	جدول (8) نسبة الخطأ لدرجة حرارة خروج الماء الساخن من المبادل.....
99	جدول (9) نسبة الخطأ لدرجة حرارة خروج الماء البارد من المبادل:

قائمة المصطلحات والرموز

A_t	مساحة سطح انتقال الحرارة الكلي الفعال m^2
A_1	مساحة سطح انتقال الحرارة الفعال للصفحة الواحدة m^2
A_{1p}	المساحة السطحية للصفحة الواحدة m^2
b	تباعد القناة المكون من صفيحتين متجاورتين m
C_p	السعة الحرارية للسائل $J/kg\ K$
C_h	ثابت
D_h	القطر الهيدروليكي للقناة m
D_p	قطر منفذ الدخول والخروج للموائع m
f	معامل الاحتكاك
K_p	الموصلية الحرارية للصفحة $W/m\cdot K$
k	الموصلية الحرارية $W/m\cdot K$
G_c	السرعة الكتلية للمائع عبر القناة $kg/s\ m^2$
G_p	السرعة الكتلية للمائع عبر المنافذ $kg/s\ m^2$
L_h	البعد الأفقي بين المنافذ m
L_v	البعد الشاقولي بين المنافذ m
L_w	عرض الصفحة m
L_{eff}	الطول الفعال لمسار التدفق بين منافذ الدخول والخروج m
$\dot{m}$	التدفق الكتلي Kg/s
P	خطوة الصفحة m

Re	رقم رينولدز
t	سماعة الصفيحة m
β	زاوية التموج degree ,angle
ΔP_c	انخفاض ضغط المائع في القناة Pa
ΔP_p	انخفاض ضغط المائع في منافذ الدخول والخروج Pa
ΔT_m	فرق درجات الحرارة الكلي C ,K
ρ	كثافة المائع Kg/m ³
μ	لزوجة التحريكية Kg/m s
ν	اللزوجة الحركية m ² /s
<u>PHE</u>	مبادل حراري صفائحي (Plate Heat Exchanger)

المستخلص

خلفية البحث:

تصميم المبادل الحراري الصفائحي متعدد الممرات وفق خوارزمية تعتمد على مساحة سطح التبادل المثلى (عند ثلاث قيم لزاوية التمرج β للصفحة) ودراسة أثر بعض المتغيرات الهندسية على فعالية المبادل الحراري وانخفاض الضغط، وإجراء اختبار حاسوبي على برنامج Ansys. حيث تم اعتبار (جسمان مائعان وصفحة واحدة) مبادل حراري كامل باستخدام الماء سائل العمل وذلك عند ثلاث قيم لزاوية التمرج β (30° – 50° – 60°) تم اختبار التدرج الحراري على الصفائح الثلاث وانخفاض الضغط ووضع النتائج والمنحنيات البيانية اللازمة ومناقشتها.

هدف البحث:

تصميم المبادل الحراري الصفائحي متعدد الممرات.

المواد والطرائق:

تم الاعتماد في الدراسة التحليلية والعديدية على برنامج ال MATLAB، وتم تصميم الشكل الهندسي للمبادل الحراري بثلاث صفائح باستخدام برنامج SEMINCE NX وإجراء الاختبار الحاسوبي باستخدام برنامج ANSYS.

النتائج العلمية:

إن المبادل الحراري الصفائحي متعدد الممرات مناسب لحل مشكلة سوء توزيع التدفق وتحسين أداء المبادل الحراري مع الحفاظ على انخفاض التكاليف التأسيسية والتشغيلية.

الاستنتاجات من وجهة نظر الباحث:

- إن انخفاض الغزارة في القناة يؤثر على طبيعة الجريان مما يتسبب في انخفاض عدد رينولدز الأمر الذي ينعكس سلباً على فعالية المبادل الحراري.
- إن زيادة عدد الممرات يساهم في حل مشكلة انخفاض الغزارة لما له من أثر في رفع عدد رينولدز دون التسبب في أي عبء أو تكاليف إضافية.
- إن زيادة زاوية التمرج للصفحة يؤدي إلى زيادة في فعالية المبادل في انخفاض الضغط.

الكلمات المفتاحية:

مبادل حراري-صفائحي -متعدد الممرات-زاوية التمرج.

الإطار العام للبحث

مقدمة:

تشكل المبادلات الحرارية العنصر الأهم في مكونات معظم الآلات، مما جعلها تأخذ حيزاً مهماً من الدراسات والأبحاث العلمية. فهي تستخدم لأغراض مختلفة، في الهندسة الحرارية مثلاً، كمراجل ومكتفات ومحّمّصات، وكعناصر أساسية في التدفئة المركزية والتكييف والتبريد وغيرها . وتستخدم المبادلات الحرارية على نطاق واسع في الصناعات الكيميائية و الغذائية والصيدلانية ومحطات توليد القدرة وفي تبريد محركات الاحتراق الداخلي لذا فإن اختيار المبادل الحراري المناسب هو أحد الاهتمامات الرئيسية لصناعة الهندسة اليوم ولكن في العقد الماضي ازداد الطلب على المبادل الحراري الصفائحي بالمقارنة مع مبادلات حرارية أخرى لما يتمتع به من ميزات. ويستخدم في تطبيقات نقل الحرارة منخفضة ومتوسطة الضغط من السائل إلى السائل [4] .

كما أن اختيار المبادل الحراري الصفائحي المناسب القادر على تلبية احتياجات العملية الحرارية بتكاليف منخفضة في راس المال والتشغيل والصيانة هو أحد الاهتمامات الرئيسية للصناعات الهندسية.

مشكلة البحث:

مشكلة البحث في انخفاض الضغط الناتج عن سوء توزيع تدفق المائع بين قنوات المبادل الحراري الصفائحي ذو الصفائح المموجة.

الهدف من البحث:

تصميم المبادل الحراري الصفائحي متعدد الممرات ذي الصفائح المموجة لمعالجة سوء توزيع التدفق بين قنوات المبادل الحراري الصفائحي.

أهمية البحث:

تتصدر أهمية البحث في تصميم المبادل الحراري الصفائحي المناسب لتلبية احتياجات العملية الحرارية.

مسوغات البحث:

يعدّ سوء توزيع التدفق ويعدّ اختيار زاوية الشيفرون أحد اهم المشاكل التي تؤثر في أداء المبادل الحراري الصفائحي

محددات البحث:

ماهي الاعتبارات الأساسية لاختيار المبادل الحراري الأنسب؟

ماهي الأسباب التي تجعل المبادلات الحرارية الصفائحية شائعة الاستخدام؟ وماهي مكوناتها؟ وما هي المواد التي تصنع منها؟

ما هو المقصود بمصطلح متعدد الممرات؟ وكيف يتم تنفيذه في المبادلات الحرارية المختلفة؟

أثر زيادة عدد الممرات في معامل انتقال الحرارة وأثرها في انخفاض الضغط؟

ما هو تأثير زاوية الشيفرون في فعالية المبادل الحراري الصفائحي وفي انخفاض الضغط؟

حدود البحث:

تصميم المبادل الحراري الصفائحي وإيجاد البارامترات التي تحقق المساحة المثلى من حيث عدد الصفائح الأقل الذي يناسب التطبيقات العملية حيث مائع العمل هو الماء.

منهج البحث وأدواته:

- دراسة نظرية
- دراسة تحليلية
- دراسة الحالة عدديا
- اختبار حاسوبي على برنامج Ansys
- المناقشة والنتائج

الفصل الأول

1-الدراسات المرجعية:

1.1. الدراسة الأولى:

(التصميم الأمثل للمبادلات الحرارية الصفائحية)

(Optimal design of plate heat exchangers)

- قام بهذه الدراسة عدد من الباحثين هم:

(Fábio A.S. Mota, Mauro A.S.S. Ravagnani*, E.P. Carvalho)

- نشرت بتاريخ (2014).

الهدف من هذه الدراسة (Aim of the study):

هو تصميم مبادل صفائحي يلبي الطلب الحراري والهيدروليكي من أجل أقل عدد ممكن من الصفائح. تم تقديم نموذج رياضي يحدد انخفاض الضغط والاستطاعة الحرارية للمبادل متعدد الممرات وتم اختبار التصميم على ثلاثة أنواع من صفائح Alfa Laval ذات الأبعاد نفسها ولكن تختلف بزاوية التمرج (30-45-60) β .

النتائج:

عند زاوية تمرج $\beta = 45^\circ$ كانت أعلى قيمة للفعالية الحرارية لمبادل وأخفض قيمة للضغط ضمن مجال عدد قنوات 40-50 قناة.

β	N_C	ϕ	P^I	P^{II}	Y_h	ΔP_{hot} (bar)	ΔP_{cold} (bar)	E
60°	42	4	3	3	0	0.57	0.71	0.860
	42	4	3	3	1	0.57	0.71	0.860
45°	40	3	2	2	0	0.44	0.54	0.894
	40	3	2	2	1	0.44	0.54	0.894
30°	48	3	2	2	0	0.72	0.90	0.917
	48	3	2	2	1	0.72	0.90	0.917

شكل (1) علاقة β بعدد الصفائح وأداء المبادل الحراري للدراسة المرجعية الأولى

2.1. الدراسة الثانية:

(خوارزمية تحسين التصميم لمبادل حراري صفائحي)

(Design optimization algorithm for plate heat exchanger)

- قام بهذه الدراسة عدد من الباحثين هم:

(Harshal Khond†*, Dilpak Saurabh P.† and Kundalik V. Mali)

- نشرت بتاريخ (2016).

الهدف من هذه الدراسة (Aim of the study):

هو تصميم مبادل حراري صفائحي متعدد الممرات وفق ترتيب التدفق U يلبي الطلب الحراري والهيدروليكي من أجل أقل عدد ممكن من الصفائح.

تم تقديم نموذج رياضي يحدد انخفاض الضغط والاستطاعة الحرارية للمبادل أحادي المرور.

النتائج:

بالنسبة لعدد صغير من الصفائح، فإن دقة البرنامج مقبولة وهناك حاجة إلى خوارزمية أكثر دقة.

3.1. الدراسة الثالثة:

(تأثير البارامترات الهندسية في أداء المبادل الحراري الصفائحي ذي زاوية التموج)

(Effect of geometrical parameters on the performance of chevron type plate heat exchanger)

• قام بهذه الدراسة عدد من الباحثين هم:

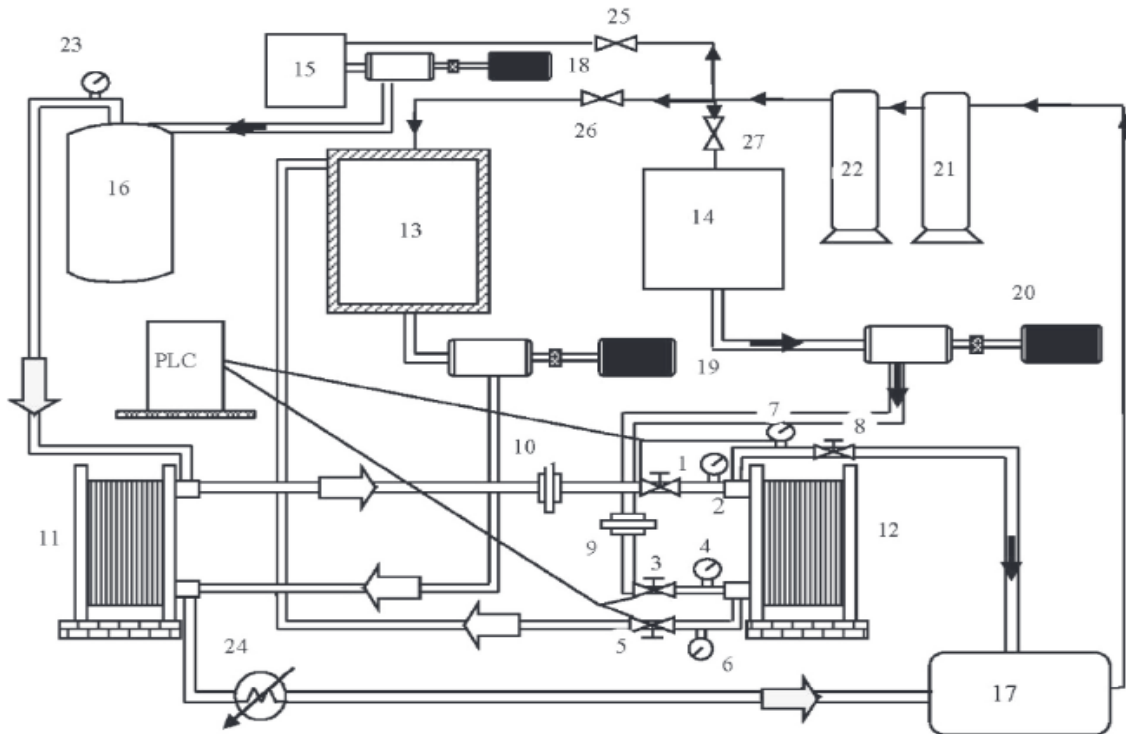
(Bhupal Kumar, Akhilesh Soni, S.N. Singh)

• نشرت بتاريخ (2018).

الهدف من هذه الدراسة (Aim of the study):

دراسة تأثير البارامترات الهندسية في الأداء الهيدروليكي والحراري لمبادل حراري صفائحي

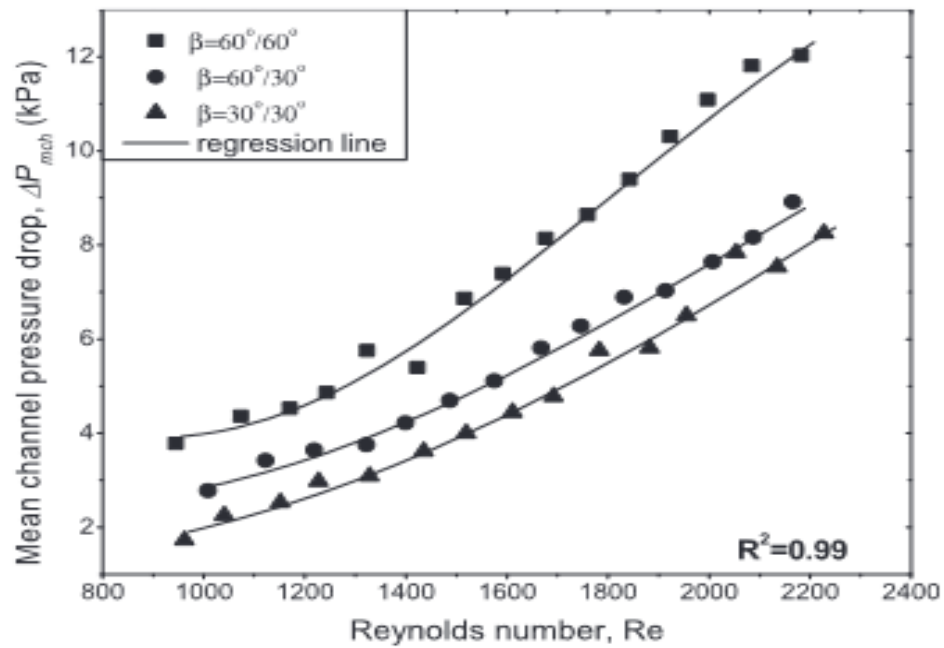
تم إجراء اختبار تجريبي لقياس سوء توزيع التدفق عند زوايا تموج مختلفة (30-60-مختلطة) لمبادل حراري صفائحي مكون من 21 قناة (11 سائل بارد و 10 سائل ساخن) بترتيب تدفق U من اجل ممر واحد.



شكل (2) الاختبار التجريبي لمبادل نمط U للدراسة المرجعية الثالثة

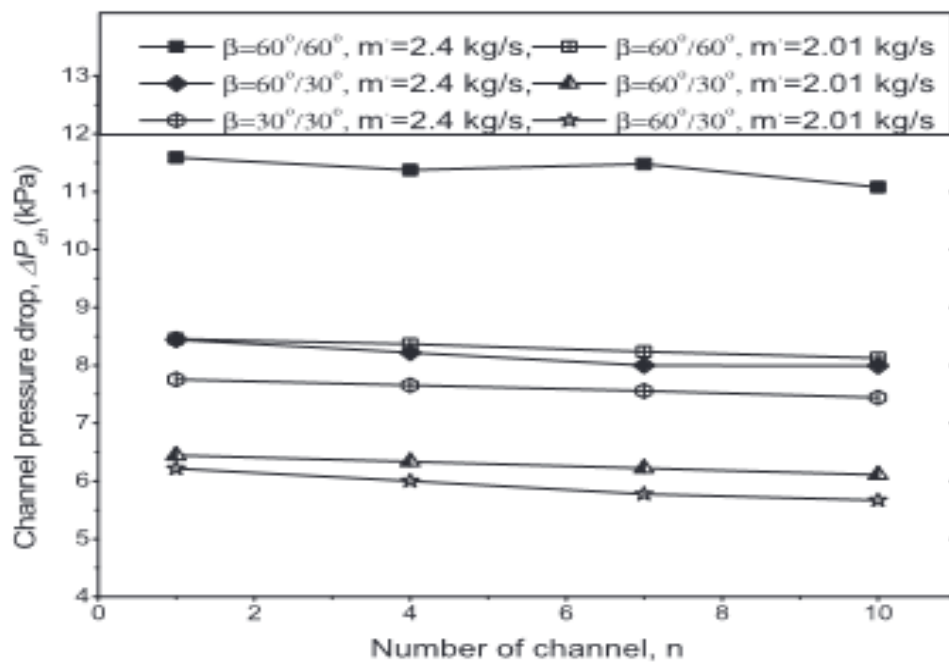
النتائج:

- تغير انخفاض ضغط القناة مع رقم رينولدز عند قيم مختلفة لزواية تموج:



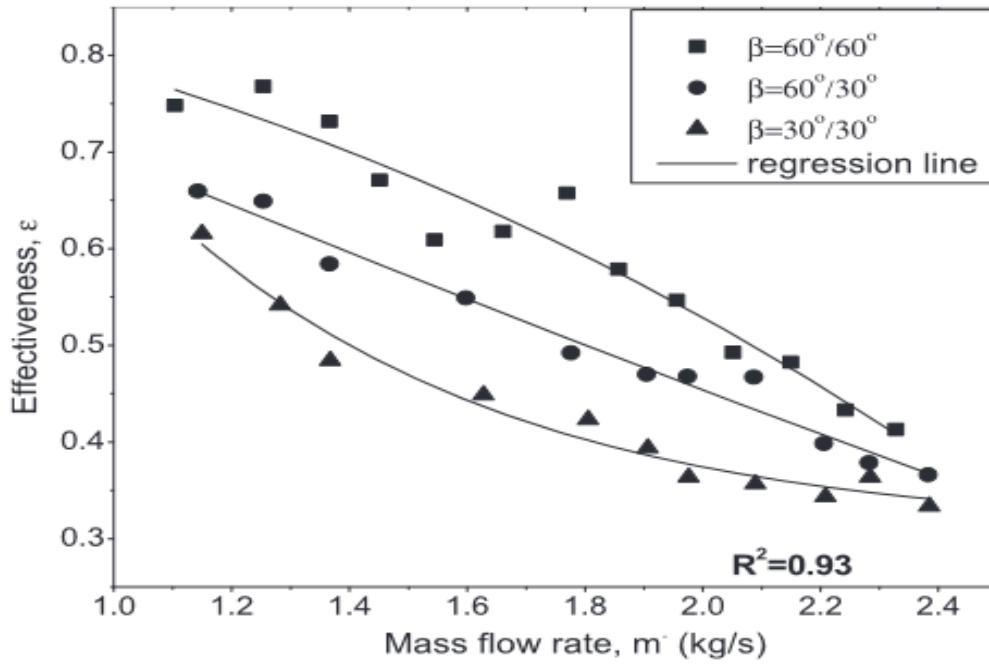
شكل (3) انخفاض ضغط القناة مع رقم رينولدز للدراسة المرجعية الثالثة

- تغير انخفاض ضغط القناة مع عدد القنوات عند قيم مختلفة لزواية تموج:



شكل (4) انخفاض ضغط القناة مع عدد القنوات للدراسة المرجعية الثالثة

- تغير الفعالية مع معدل التدفق الكتلي عند قيم مختلفة لزاوية تموج:



شكل (5) تغير الفعالية مع معدل التدفق الكتلي للدراسة المرجعية الثالثة

4.1. الدراسة الرابعة:

(دراسة على نموذج عددي ثلاثي الأبعاد لمبادل حراري صفائحي)

(A Study on 3D Numerical Model for Plate Heat Exchanger)

- قام بهذه الدراسة عدد من الباحثين هم:

(Ya-Nan Wang^a, Jong-Pyo Lee^a, Min-Ho Park^a, Byeong-Ju Jin^a, Tae-Jong Yun^a, Young-

(Ho Song^b, Ill-Soo Kim^{1 a}

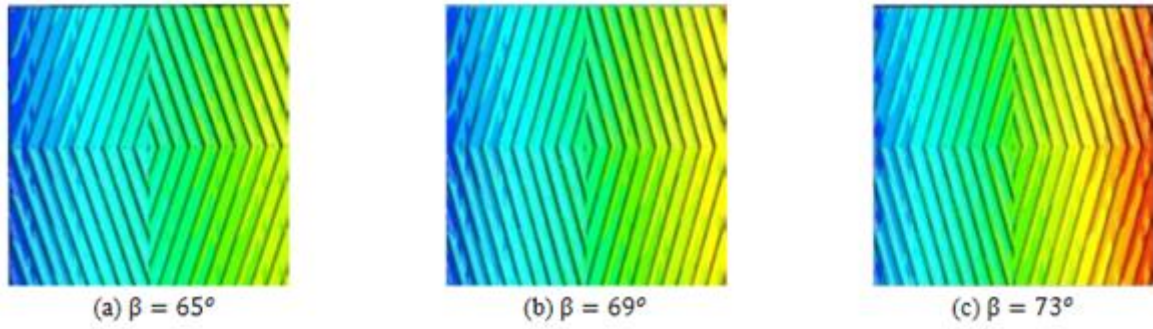
- نشرت بتاريخ (2017).

الهدف من هذه الدراسة (Aim of the study):

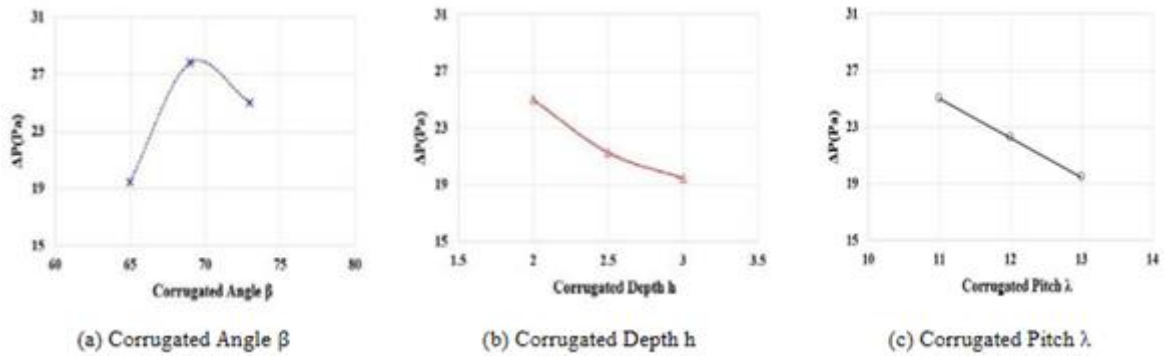
اختبار مبادل حراري صفائحي ذي الصفيحة المموجة باستخدام Ansys واستخدام الماء كسائل عمل، وبسبب القيود الحسابية تم اعتبار (جسمين مائعين وصفيحة واحدة) مبادلاً حرارياً كاملاً بدلاً من محاكاة النظام بأكمله. حيث تم حساب انخفاض الضغط وذلك من اجل المتغيرات: زاوية الموجة β ، وعمق الموجة h ، وخطوة الموجة λ .

النتائج:

- مع زيادة زاوية التمرج β يزداد انخفاض الضغط.
- مع زيادة عمق الموجة h يتناقص انخفاض الضغط.
- مع زيادة خطوة الموجة λ يتناقص انخفاض الضغط.



شكل (6) نتائج الاختبار الحاسوبي للدراسة المرجعية الرابعة



شكل (7) انخفاض الضغط مع تغير h, λ, β للدراسة المرجعية الرابعة

5.1. الدراسة الخامسة:

(تحليل زاوية التموج على الأداء الحراري للمبادل الحراري الصفائحي)

(Analysis of corrugation angle on thermal performance of plate heat exchanger)

- قام بهذه الدراسة عدد من الباحثين هم:

(Muhammad Salman KHAN^{1,2} and Zeeshan JAMIL^{1,2})

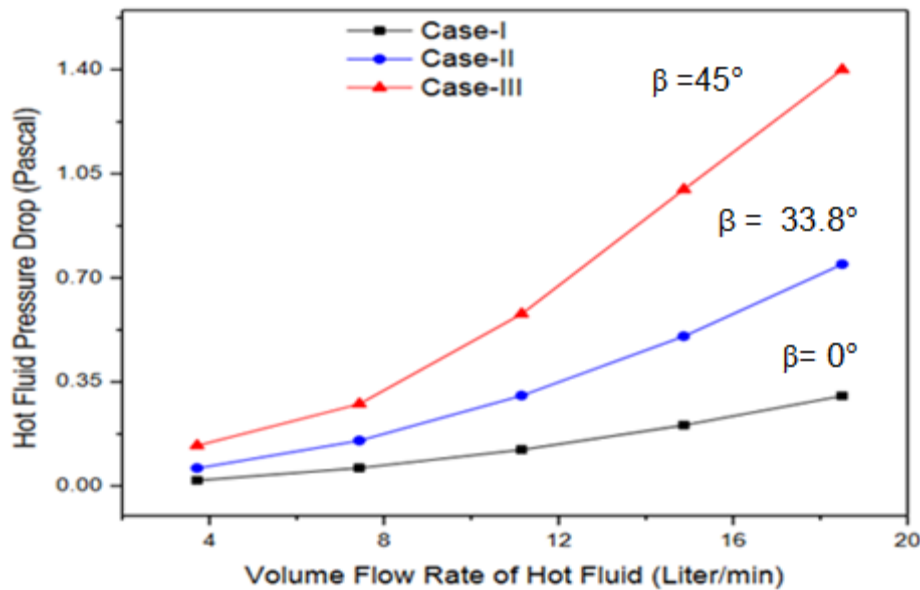
- نشرت بتاريخ (2018).

الهدف من هذه الدراسة (Aim of the study):

دراسة تحليلية لأثر زاوية الشيفرون في الأداء الحراري لثلاثة مبادلات حرارية ذات صفيحة مموجة، 45° ، 33.8° وصفيحة مسطحة (زاوية تموج صفر). تم حساب الفعالية ومعدل نقل الحرارة وانخفاض الضغط بالإضافة إلى محاكاة ثلاثة نماذج باستخدام CFD حيث أن المائع المستخدم هو الماء. وبدلاً من محاكاة النظام بأكمله بسبب القيود الحسابية، تم اعتبار (جسمين مائعين وصفيحة واحدة) مبادلاً حرارياً كاملاً.

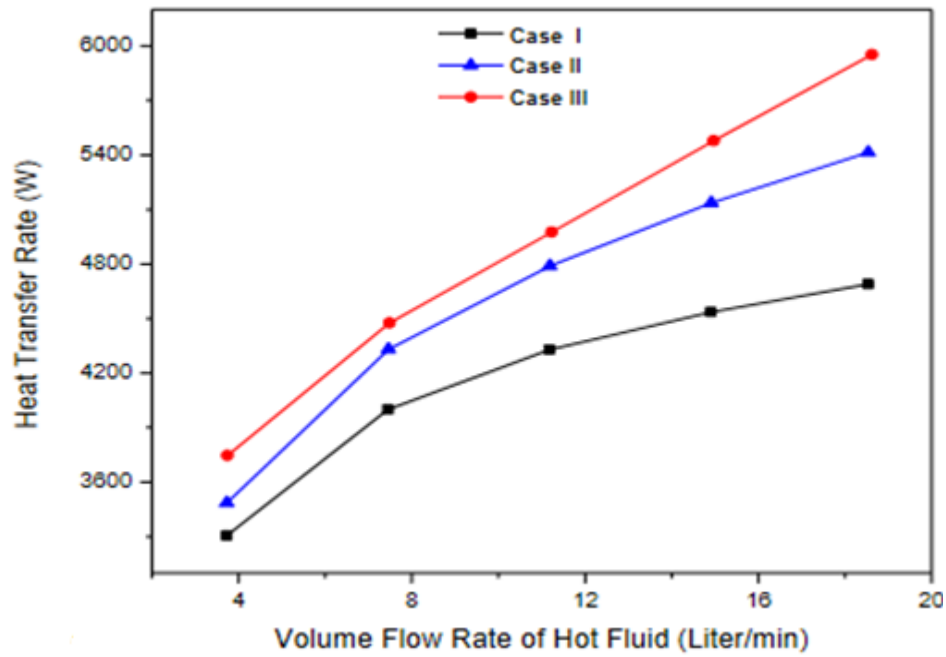
النتائج:

- زيادة في انخفاض الضغط مع زيادة زاوية التموج.



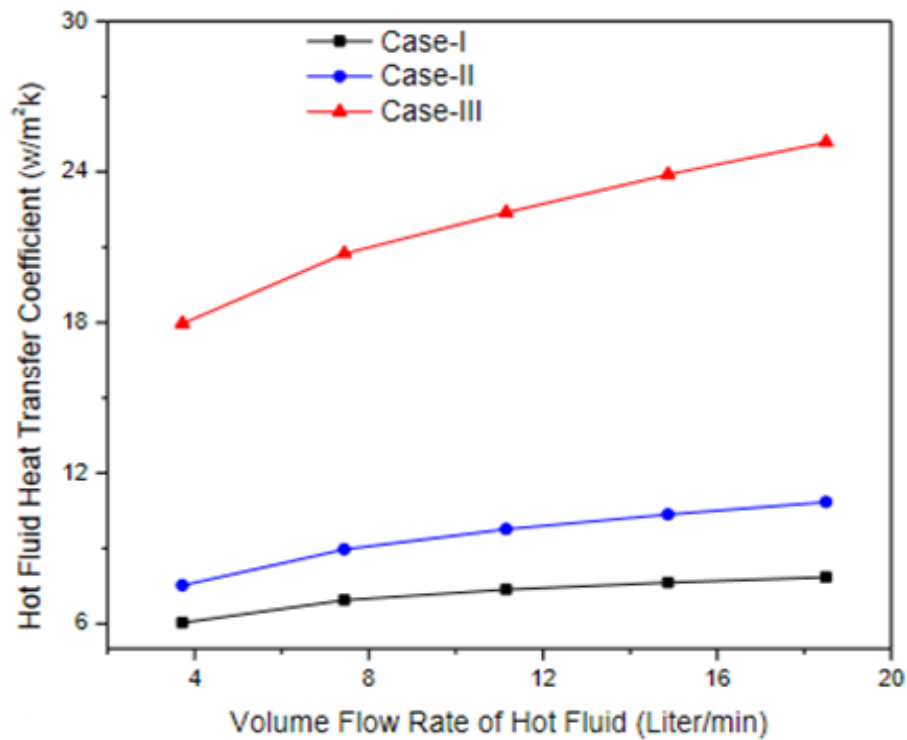
شكل (8) انخفاض الضغط مع تغير زاوية التموج β للدراسة المرجعية الخامسة

- زيادة معدل التدفق الحراري مع زيادة التدفق الحجمي، وتكون أكبر زيادة عند أكبر زاوية تموج.



شكل (9) تغيير الاستطاعة الحرارية مع التدفق الحجمي للدراسة المرجعية الخامسة

- زيادة معامل انتقال الحرارة مع زيادة زاوية التموج.



شكل (10) تغير معامل انتقال الحرارة مع التدفق الحجمي للدراسة المرجعية الخامسة

من اختبار التدرج الحراري للصفحة:

تظهر أعلى درجة حرارة في المنطقة العليا بسبب السائل الساخن وأدنى درجة حرارة عبر المنطقة السفلية وهو السائل البارد، يظهر أعلى تدرج للحرارة عبر الصفحة بزاوية تموج 45° .

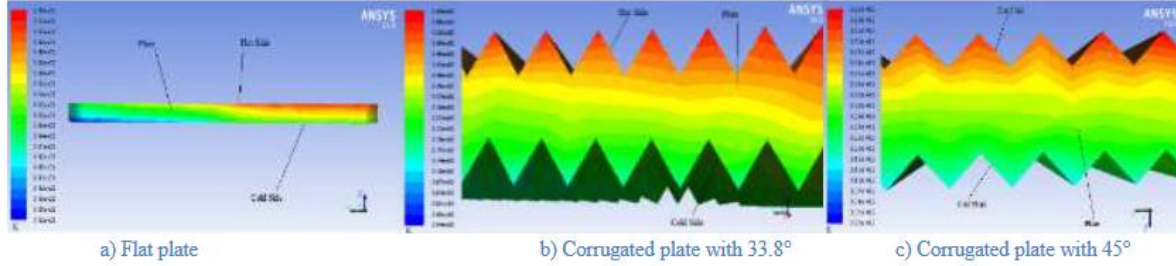


Figure 11: Temperature contour.

شكل (11) اختبار التدرج الحراري للصفائح للدراسة المرجعية الخامسة

6.1. الدراسة السادسة:

(تحليل الأداء الحراري الهيدروليكي لمبادل حراري صفائحي متعدد المسارات وذو الصفحة المموجة)

(Thermo-hydraulic performance analysis of multi-pass chevron type plate heat exchanger)

- قام بهذه الدراسة عدد من الباحثين هم:

(Nitesh K. Panday, Shailendra N. Singh)

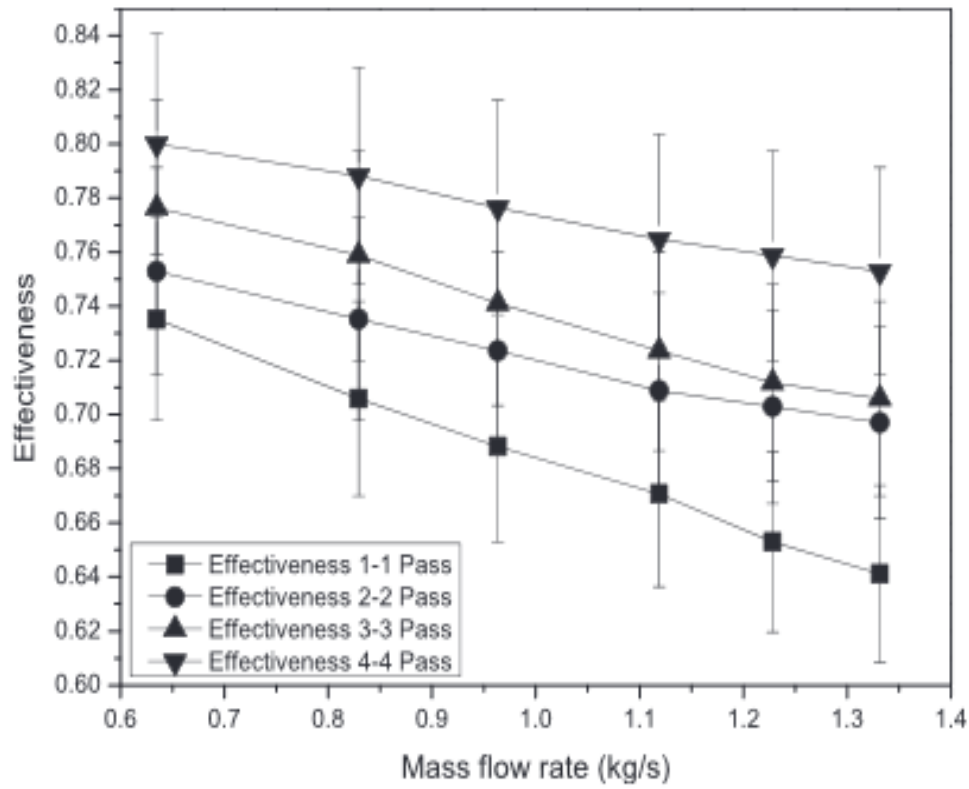
- نشرت بتاريخ (2020).

الهدف من هذه الدراسة (Aim of the study):

دراسة تأثير عدد الممرات المتزايد في أداء المبادل الحراري الصفائحي عند عدد رينولدز (300-2850) تم إجراء اختبار تجريبي، وذلك من أجل عدد ممرات متساوٍ لكلا المائعين، وعدد ثابت من الصفائح (40) عند زوايا تموج (30° - 60°)، ومعدل تدفق يتراوح بين (0.63-1.35) kg/s

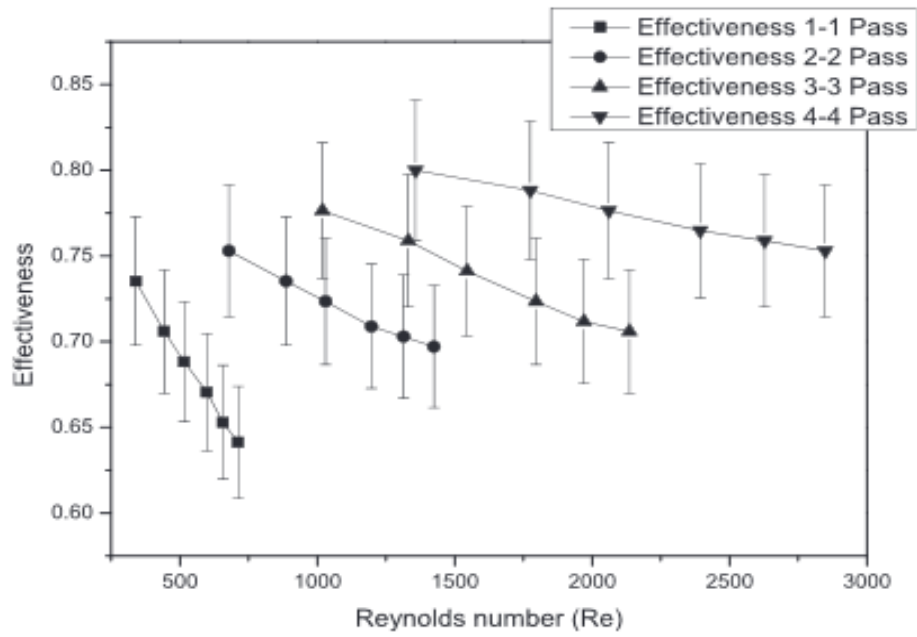
النتائج:

- من أجل قيم تدفق منخفضة فإن زيادة عدد الممرات يزيد من فعالية المبادل الصفائحي بشكل واضح، ومع زيادة التدفق تكون الزيادة في الفعالية أكبر مع زيادة الممرات.



شكل (12) تغير الفعالية مع تغير التدفق الكتلي للدراسة المرجعية السادسة

- من اجل قيم التدفق الكتلي نفسه فان زيادة عد الممرات يؤدي إلى زيادة عدد رينولدز الذي يقابله زيادة في فعالية المبادل الحراري.



شكل (13) تغير الفعالية مع عدد رينولدز للدراسة المرجعية السادسة

7.1. الخلاصة من الدراسات السابقة:



وبالتالي سيتم دراسة أثر زاوية التموج عند القيم $\beta = (60, 50, 30)$ وعدد الممرات لكلا المائعين التي لم تؤخذ بعين الاعتبار في الدراسات السابقة.

الفصل الثاني

المبادلات الحرارية

2-1- مقدمة:

المبادلات الحرارية عبارة عن أجهزة توفر نقل الطاقة الحرارية بين مائعين أو أكثر عند درجات حرارة مختلفة. حيث تنتقل الطاقة الحرارية من المائع الساخن إلى المائع البارد، المبادلات الحرارية في العديد من المجالات مثل إنتاج الطاقة، والصناعات الكيماوية والغذائية، والإلكترونيات، والهندسة البيئية، واستعادة الحرارة المهدورة، والصناعة التحويلية، وتكييف الهواء، والتبريد، وتطبيقات الفضاء، وما إلى ذلك.

2-2- آلية التبادل الحراري خلال المبادلات الحرارية:

تنتقل الحرارة عادة من المواد الساخنة إلى المواد الباردة ويؤدي ذلك إلى انخفاض درجة حرارة المواد الساخنة وارتفاع درجة حرارة المواد الباردة، ويكون مقدار الحرارة المفقودة مساويا للحرارة المكتسبة، مضافا إليه الحرارة المتسربة إلى الجو كالآتي:

$$\text{الحرارة المفقودة} = \text{الحرارة المكتسبة} + \text{الحرارة المتسربة إلى الجو}$$

ويتم انتقال الحرارة في المبادل الحراري بصورة رئيسية عن طريق التوصيل (Conduction) والحمل (Convection) والإشعاع (Radiation) حيث أن حرارة المادة تنتقل إلى جدران حزمة الأنابيب بواسطة الحمل وخلال جدران حزمة الأنابيب إلى سطح الجهة الثانية بواسطة التوصيل عن طريق جزيئات المعدن ومن ثم من سطح الجدار الخارجي لحزمة الأنابيب إلى المادة التي تتساقط على القشرة الخارجية للمبادل الحراري بواسطة الحمل مرة ثانية.

2-3- الغرض الرئيسي والوظائف الأساسية للمبادل الحراري:

تتمثل المهمة الرئيسية للمبادل الحراري في نقل الطاقة الحرارية من سائل إلى آخر، في مستويات درجة حرارة مختلفة [1]. استخدامات المبادلات الحرارية متنوعة أهمها:

1. التسخين أو التبريد لسائل أو لغاز، ويمكن إعطاء أمثلة كثيرة جدا على ذلك حيث يتميز المبادل الحراري هنا بوظيفة بسيطة، وهي التحكم بدرجة حرارة السائل عند نقطة معينة لهذه العملية.

2. الاسترجاع الحراري؛ والذي يسمح بإدخال مفهوم حديث لرفع قيمة الطاقة الحرارية لعملية ما، حيث وظيفة هذا المبادل هي إذاً ضمان نقل الطاقة الحرارية القصوى من أجل السماح بالاسترداد والتخلص من الحرارة وفق المعايير الطاقية والاقتصادية.
3. المبردات التي تضمن تبديد الطاقة الحرارية غير القابلة للاسترداد من عملية ما إلى الوسط الخارجي وهي وظيفة أساسية في العديد من العمليات؛ مثل أجهزة الاستشعار، أو بواعث الحرارة. وأكثر الأمثلة شيوعاً هي مجمعات الطاقة الشمسية الحرارية وكذلك مشعات التدفئة التي توفر الراحة الحرارية في المبنى.
4. مزيلات الرطوبة أو المكثفات الجزئية كمثال على ذلك مزيل رطوبة الهواء، الذي يضمن السيطرة على رطوبة الهواء خارج وحدة المعالجة المركزية للهواء، وهناك أمثلة صناعية أخرى مثل النقاط الأبخرة العضوية في المكثفات البخارية التي كثيراً ما نصادفها في المنشآت الكيميائية.
5. المبخرات التي تضمن التبخر الكامل أو الجزئي للسائل في عمليات مختلفة بما في ذلك إنتاج الطاقة الميكانيكية والتبريد والمكثفات التي توفر التكثيف الكامل أو الجزئي للغاز بخار وهي أيضاً تستخدم لإنتاج الطاقة الميكانيكية والتبريد.

2-4- تصنيف المبادلات الحرارية وفقاً للمعايير الرئيسية التالية:

1. عمليات النقل الحراري: النقل المباشر، والنقل غير المباشر والمتجددة.
2. هندسة البناء: الأنابيب والصفائح والأسطح الممتدة.
3. آليات نقل الحرارة: يتم نقل الحرارة إما بمرحلة واحدة أو بمرحلتين.
4. أشكال الجريان: الجريان المتوازي، والجريان المتعاكس، والجريان المتعامد.

تصنيف المبادلات الحرارية

2-4-1 عمليات النقل الحراري:

وفقاً لعمليات النقل الحراري، يتم تصنيف المبادلات الحرارية على أنها:

المبادلات الحرارية من نوع النقل المباشر (المزجية): تتم عملية انتقال الحرارة بين المائع البارد والساخن من خلال مزجهما معاً. لا يوجد جدار بين التيارات الساخنة والباردة.

المبادلات الحرارية ذات النقل غير المباشر (السطحية): تتم عملية انتقال الحرارة بين المائع الساخن والمائع البارد عبر جدار يفصل بينهما. تتدفق الموائع الباردة والساخنة في وقت واحد، بينما يتم نقل الطاقة الحرارية عبر جدار فاصل.

المبادلات الحرارية الإرجاعية: يتم فيها انتقال الطاقة الحرارية من المائع الساخن إلى مجمع حراري حيث تنتقل الحرارة وبشكل دوري من المجمع الحراري إلى المائع البارد، أي أنه في هذا النوع من المبادلات الحرارية يكون كلا من المائعين البارد والساخن على تماس السطح نفسه ولكن بشكل دوري.

2-4-2- هندسة البناء :

يتم تصنيف المبادلات الحرارية من حيث ميزات بنائها إلى:

1-المبادلات الحرارية الأنبوبية:

المبادلات الحرارية الأنبوبية مصنوعة من أنابيب دائرية. يتدفق أحد الموائع داخل الأنابيب ويتدفق المائع الآخر على السطح الخارجي للأنابيب. هناك مرونة كبيرة في تصميمها. يمكن تصنيف المبادلات الحرارية الأنبوبية على النحو التالي:

1-1-مبادلات حرارية مزدوجة الأنابيب

1-2-المبادلات الحرارية ذات الغلاف والأنبوب.

1-3-المبادلات الحرارية ذات الأنبوب اللولبي.

2-المبادلات الحرارية الصفائحية:

تتكون المبادلات الحرارية الصفائحية من سلسلة من الصفائح المتراسة بإحكام بين إطارين أساسيين ثابتين، تكون الصفائح مموجة أو ناعمة ومزودة بفتحات دخول وخروج للموائع. تُستخدم المبادلات الحرارية الصفائحية لنقل الحرارة لأي مجموعة من التيارات الغازية والسائلة، والمرحلة ثنائية الطور. يتم تصنيف هذه المبادلات الحرارية إلى:

2-1-مبادلات حرارية صفائحية مع مانعة التسرب.

2-2-المبادلات الحرارية ذات الصفيحة اللولبية.

2-3-المبادل الحراري الصفائحي من نوع صفيحة وإطار ملحومين (welded PHE).

2-4-المبادل الحراري الصفائحي ذو الصفيحة النحاسية: Brazed plate

3-المبادلات الحرارية السطحية الممتدة:

المبادلات الحرارية السطحية الممتدة عبارة عن أجهزة ذات زعانف على سطح انتقال الحرارة الأولي (أنبوب أو صفيحة) بهدف زيادة مساحة سطح انتقال الحرارة. كما هو معروف جيداً أن معامل انتقال الحرارة على جانب الغاز أقل بكثير من معامل انتقال الحرارة على جانب السائل، يتم استخدام أسطح نقل الحرارة ذات الزعانف على

جانب الغاز لزيادة مساحة سطح انتقال الحرارة [2]. تستخدم الزعانف على نطاق واسع في المبادلات الحرارية من الغاز إلى الغاز، ومن الغاز إلى السائل عندما يكون معامل انتقال الحرارة على أحد الجانبين أو كلاهما منخفضًا

3-1- مبادلات حرارية ذات زعانف صفائحية.

3-2- المبادلات الحرارية ذات الزعانف الأنبوبية.

2-3-4- آليات نقل الحرارة:

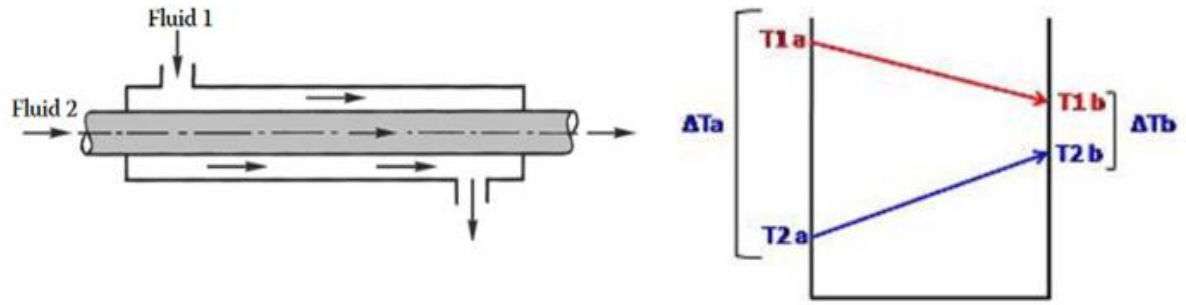
يمكن أيضاً تصنيف المبادلات الحرارية وفقاً لآليات نقل الحرارة على أنها:

- 1- مبادلات حرارية أحادية الطور: وهي المبادلات الحرارية التي يتم فيها التبادل الحراري بين مائعين بالطور نفسه ولا يحدث تغير في حالة أحد هذين المائعين.
مثل سخانات الهواء في الغلايات، والمبردات البينية للضاغط، ومشعات السيارات، والمولدات، ومبردات الزيت، يحدث التبادل الحراري أحادي الطور على كلا الجانبين.
- 2- مبادلات حرارية ثنائية الطور: وهي المبادلات الحرارية التي يتم فيها التبادل الحراري مع حدوث تغير في طور أحد هذين المائعين فمثلاً يتبخّر أحدهما أو يتكاثف أثناء التبادل الحراري.
بينما تشمل المكثفات والغلايات ومولدات البخار المستخدمة في مفاعلات الماء المضغوط ومحطات الطاقة والمبخرات والمشعات المستخدمة في تكييف الهواء آليات التكثيف والغليان والإشعاع على جانب واحد من سطح المبادل الحراري.
- 3- مبادلات حرارية متعددة الأطوار: وهي المبادلات الحرارية التي يتم فيها التبادل الحراري مع حدوث تغير في الطور لكلا المائعين معاً.

2-4-4- أشكال الجريان:

- (1) الجريان المتوازي (Parallel flow).
- (2) الجريان المعاكس (Counter-Current flow).
- (3) الجريان المتقاطع (Cross flow).

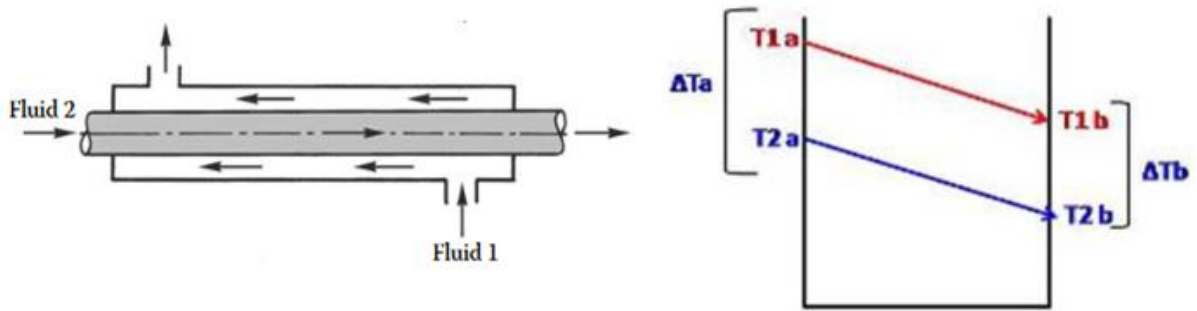
المبادلات الحرارية ذات الجريان المتوازي: يتدفق المائع الساخن والبارد معاً في الاتجاه نفسه في أحد طرفي المبادل، ويخرجان معاً في الطرف الآخر (الشكل 14).



شكل (14) الجريان المتوازي

يعدّ نمط الجريان المتوازي أقل فعالية من وجهة نظر انتقال الحرارة، ذلك أن هذا النمط يحتاج إلى مساحة سطحية كبيرة لنقل الحرارة عند قيم محددة لدرجات الحرارة، ومعدل تدفق انتقال الحرارة. ويستخدم نمط الجريان المتوازي عندما يكون من الضروري المحافظة على أداء المبادل الحراري ثابتاً تقريباً على طول المبادل [3].

المبادلات الحرارية ذات الجريان المتعاكس: يتدفق المائع الساخن والبارد في اتجاهين متعاكسين (الشكل 15).

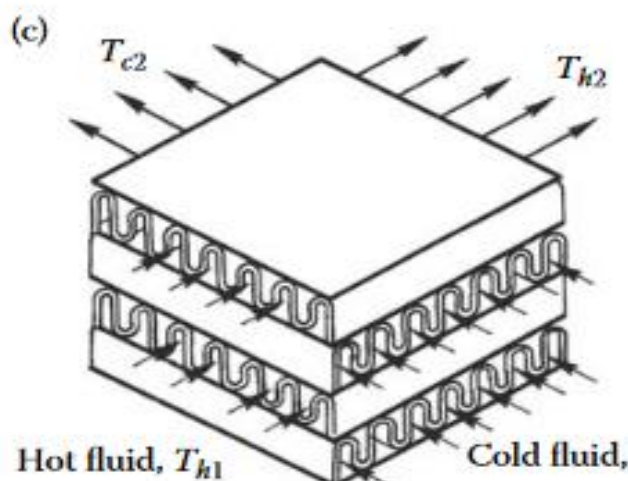


شكل (15) الجريان المتعاكس

ويعدّ الترتيب ذو الجريان المتعاكس هو الأكثر كفاءة من وجهة نظر انتقال الحرارة. حيث نلاحظ من الشكل (2) ثبات فرق درجات الحرارة تقريباً على طول المبادل الحراري.

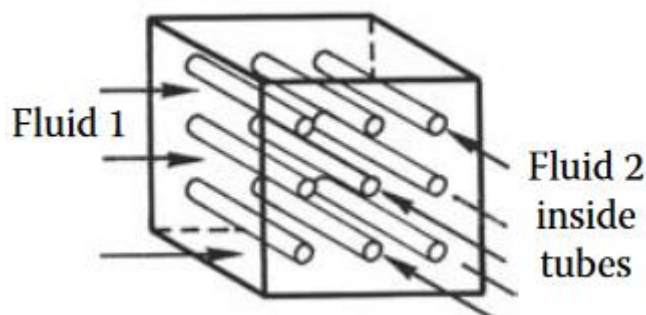
المبادلات الحرارية ذات الجريان المتقاطع: تكون فيها حركة أحد المائعين متعامدة مع حركة المائع الأخير

في الجريان المتقاطع، يمكن تسمية الجريان مختلطاً أو غير مختلط، اعتماداً على التصميم. الجريان الذي تتدفق فيه كل من الموائع الساخنة والباردة عبر مسارات منفصلة عن المسارات المجاورة بدون اختلاط الموائع في هذه الحالة يُقال إنه غير مختلط كما في الشكل (16).



شكل (16) مبادل حراري ذو جريان متعامد غير مختلط

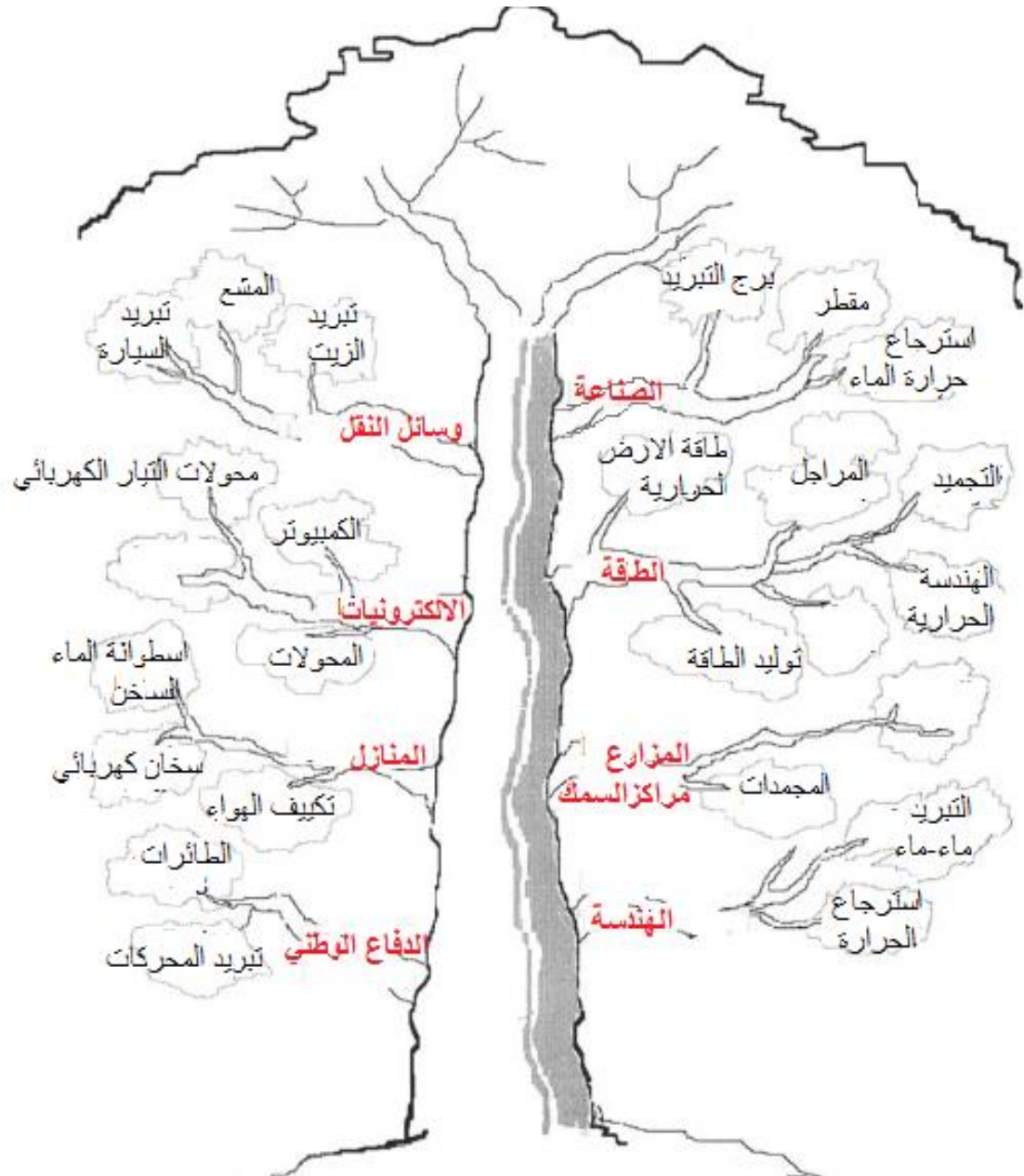
في حالة تسخين الغازات أو تبريدها تستخدم المبادلات الحرارية ذات الجريان المتقاطع المختلط. حيث يمر أحد المائعين داخل الأنابيب بينما يمر المائع الآخر الغازي عموديا على حزمة الأنابيب، وفي هذه الحالة يعدّ الغاز الذي يمر على حزمة الأنابيب مختلطاً كما في الشكل (17).



شكل (17) مبادل حراري ذو جريان متعامد مختلط

2-5- التطبيقات:

تُستخدم المبادلات الحرارية في مجموعة متنوعة من التطبيقات مثل الصناعات، والطاقة، وتكييف الهواء، والتبريد، واستعادة الحرارة، والصناعات التحويلية. المجددات وأبراج التبريد. تُستخدم المبادلات الحرارية ذات التدفق ثنائي الطور للتبخير، والتكثيف، والتجميد، شكل (18).



شكل (18) تطبيقات المبادلات الحرارية

الفصل الثالث

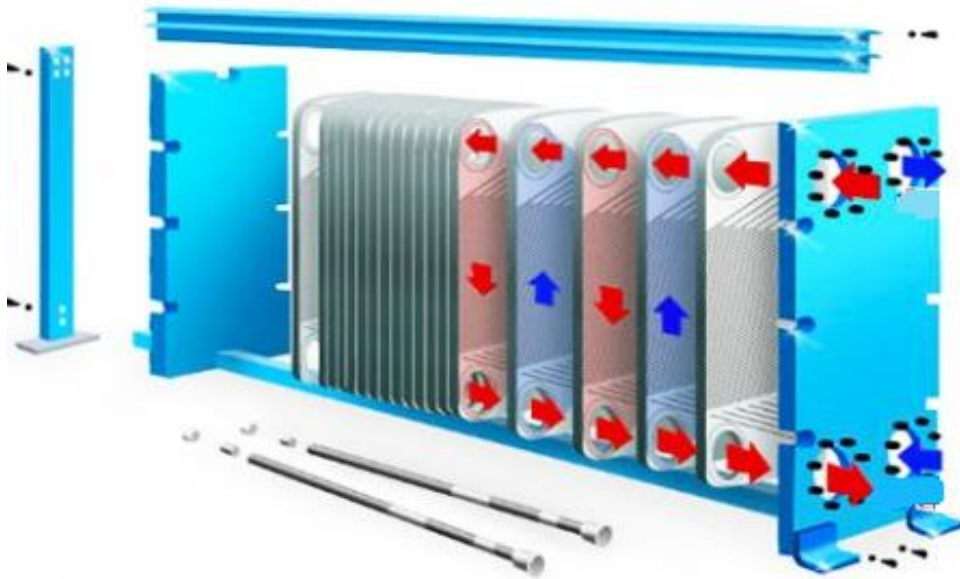
المبادلات الحرارية الصفائحية

مقدمة:

تم إدخال المبادلات الحرارية الصفائحية في ثلاثينيات القرن الماضي بشكل أساسي للصناعات الغذائية نظراً لسهولة تنظيفها، وقد وصل تصميمها إلى مرحلة متقدمة في الستينيات مع تطوير أشكال هندسية أكثر فاعلية للصفحة، وترتيبات التدفق. اتسع نطاق التطبيقات الممكنة إلى حد كبير، وفي الوقت الحاضر، في ظل ظروف محددة ومناسبة، تتداخل وتتنافس بنجاح في المجالات التي كانت تعدّ تاريخياً مجال المبادلات الحرارية الأنبوبية، فالمبادلات الصفائحية قادرة على تلبية مجموعة واسعة للغاية من المهام في العديد من الصناعات. لذلك، يمكن استخدامها كبديل للمبادلات الحرارية من نوع الأسطوانة والأنبوب في تطبيقات نقل الحرارة منخفضة ومتوسطة الضغط من السائل إلى السائل [4].

3-1-الميزات الميكانيكية (Mechanical Features):

يتكون المبادل الصفائحي من مجموعة من الصفائح المعدنية الرقيقة والمموجة ومن مانعات التسرب التي تثبت في نهاية كل صفحة لإحكام الإغلاق، يتم تجميع مجموعة الصفائح ضمن الإطار الذي يتضمن لوحاً أمامياً ثابتاً ولوحاً خلفياً متحركاً وبراغي وصواميل للتثبيت، وقضبان علوية وسفلية، وعامود للتثبيت كما هو موضح بالشكل (19).



شكل (19) عناصر الإطار للمبادل الحراري الصفائحي (Courtesy of Alfa Laval Thermal AB.)

عندما يتم ضغط حزمة الصفائح معًا، فإن الثقوب الموجودة في زوايا الصفائح تشكل أنفاقًا، لدخول المائعين وخروجهما، كما تتشكل بين الصفائح قنوات يتدفق المائعان عبرها بشكل متناوب [5]، ويتم شد حزمة الصفائح عن طريق، إما جهاز شد ميكانيكي أو هيدروليكي، يسمح بالتحكم في ضغط الشد إلى المستوى المطلوب الشكل (20).

يدخل المائعان إلى المبادل عبر منافذ الدخول ليتدفقا عبر القنوات بشكل متناوب (قناة باردة يليها قناة ساخنة وهكذا). بحيث تحدث عملية انتقال الحرارة من المائع الساخن في القناة إلى الصفيحة ثم من الصفيحة إلى المائع البارد في القناة التالية.



شكل (20) تجميع المبادل الحراري الصفائحي

3-1-1-أبعاد الصفائح والمواد المستخدمة (plates dimensions and materials):

أكبر صفيحة منفردة يبلغ ارتفاعها 4.3 م × عرضها 1.1 م، وتتراوح مساحة سطح انتقال الحرارة للصفيحة الواحدة بين 0.03 و 2.2 م². يجب توزيع المائع بالتساوي على كامل عرض الصفيحة لتجنب التوزيع السيئ للمائع عبر عرض الصفيحة، يكون الحد الأدنى لنسبة الطول / العرض 1.8. تتراوح سماكة الصفيحة بين 0.5 و 1.2 مم، ويتم تباعد الصفائح بفجوات اسمية من 1.5 إلى 5.0 مم، مما ينتج عنه أقطار هيدروليكية لقنوات التدفق من 4-10 مم [6]. يتم منع التسرب من القنوات بين الصفائح إلى الغلاف الجوي المحيط من خلال مانعة التسرب المتوضعة حول الجزء الخارجي من الصفيحة، يمكن تصنيع الصفائح من جميع المواد القابلة للطرق. في الجدول (1) المواد الأكثر شيوعاً، الفولاذ المقاوم للصدأ والتيتانيوم والبلاديوم، incoloy 825، hastelloy C-276، مونيل 400، الألومنيوم

جدول (1) مواد الصفيحة [23]:

Material	Thermal Conductivity (W/m · K)
Stainless steel (316)	16.5
Titanium	20
Inconel 600	16
Incolay 825	12
Hastelloy C-276	10.6
Monel 400	66
Nickel 200	66
9/10 Cupro-nickel	52
70/30 Cupro-nickel	35

يعدّ الفولاذ المقاوم للصدأ هو المادة الأكثر شيوعاً المستخدمة في المبادلات الحرارية الصفائحية وعلى الأخص 316 و 304، فهو يحتل المرتبة الأولى بسبب فعاليته في مقاومة التآكل الناتجة عن وجود عنصر الكروم، الذي يمكن أن يشكل ما لا يقل عن 10.5% من التركيب الكلي. وعلى الرغم من مقاومته العالية، إلا أن الفولاذ المقاوم للصدأ لا يزال عرضة للتآكل بمرور الوقت.

الفرق الرئيسي بين 304 و 316 SS هو وجود الموليبدنوم (حوالي 2-3%)، الذي ينتج عنه درجة أعلى من مقاومة التآكل.

المادة التالية الأكثر استخدامًا للمبادلات الحرارية الصفائحية بعد الفولاذ المقاوم للصدأ هي التيتانيوم، حيث يتمتع التيتانيوم بالخصائص التالية:

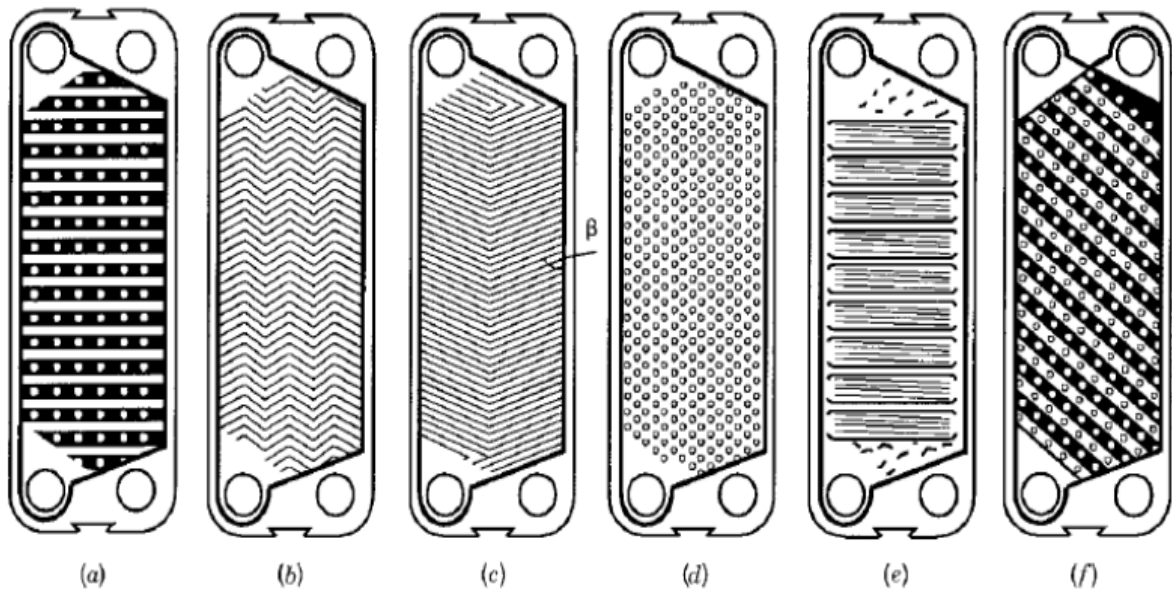
- مقاومة عالية للتآكل، لا سيما مع مناعته ضد مياه البحر أي المياه المالحة. وهذا يجعلها مادة مفضلة للصناعة البحرية.
- كثافته أقل حيث يمكن أن يوفر التيتانيوم وفورات في الوزن تصل إلى 50% وأكثر.
- الموصلية الحرارية العالية.

ويجب الانتباه إلى أن التيتانيوم عرضة للتشقق إذا تم تجاوز معدل مقاومة الشد.

يتم تحديد عدد الصفائح وحجمها بحسب معدل التدفق والخصائص الفيزيائية للسوائل وهبوط الضغط ومتطلبات درجة الحرارة.

3-1-2-أنواع الصفائح (Plates Types):

تعد الصفائح الحرارية هي الجزء الأهم والأعلى في المبادلات الحرارية الصفائحية، التي تصنع من معادن أو خليط معدني بحسب التطبيق المستخدمة لأجله. وقد تكون الصفيحة مسطحة ولكن غالبا ما تكون ذات سطح موج ليّيزيد من الأداء الحراري الهيدروليكي، وتتوفر مجموعة متنوعة من أنواع التمويج في التطبيقات العملية الشكل (21). إلا أن معظم المبادلات الحرارية الصفائحية الحديثة هي من نوع الموج [7].

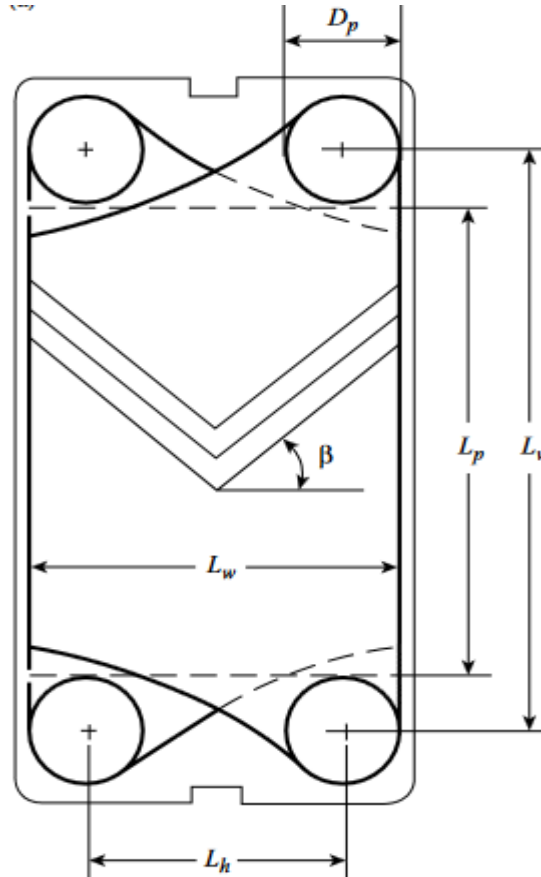


شكل (21) الفئات النموذجية لتمويجات الصفائح

في الصفيحة المموجة، يتم تعزيز الجريان المضطرب من خلال اتجاه التدفق المتغير باستمرار، وسرعة السوائل. ويعبر عنها بزاوية الشيفرون β كما في الشكل (22) وتعدّ من أهم البارامترات التي تؤثر في الأداء الحراري والهيدروليكي للمبادل، وتتراوح قيمة زاوية الشيفرون β بين 65 درجة و 25 درجة.

أثر التموجات في الصفيحة:

- تعزيز الجريان المضطرب من خلال اتجاه التدفق المتغير باستمرار وسرعة السوائل.
- زيادة مساحة سطح انتقال الحرارة الفعالة.
- تقليل التلوث والرواسب.
- زيادة صلابة الصفيحة.



شكل (22) الأبعاد الرئيسية لصفيحة الشيفرون

3-2- الخصائص التشغيلية (operational Characteristics):

3-2-1- المزايا الرئيسية (main advantages):

- مرونة التصميم من خلال مجموعة متنوعة من أحجام الصفائح والعديد من التمرجات وترتيبات التمرير.
- منطقة انتقال الحرارة يمكن الوصول إليها بسهولة، مما يسمح بإجراء تغييرات في التصميم ليناسب التغييرات في متطلبات العمليات من خلال التغييرات في عدد الصفائح.
- كفاءة نقل الحرارة حيث معاملات انتقال الحرارة عالية لكلا المائعين بسبب الاضطراب في الجريان والقطر الهيدروليكي الصغير.
- مدمج للغاية (النسبة بين مساحة سطح انتقال الحرارة والحجم تكون كبيرة)، ووزن منخفض.
- فقط حواف الصفائح هي التي تتعرض للغلاف الجوي؛ لا يوجد ضياع حراري ولا يلزم عزل.
- لا يمكن أن يحدث اختلاط السائلين بفضل وجود مانعات التسرب.
- تتميز المبادلات الصفائحية بانخفاض نسبة الرواسب نتيجة للاضطراب الشديد ووقت التواجد المنخفض.
- يمكن معالجة أكثر من مائتين في وحدة واحدة.
- يؤدي الاضطراب المرتفع في المبادل الحراري الصفائحي إلى معاملات انتقال عالية جدًا، ومعدلات تلوث منخفضة، وحجم أصغر [8].

3-2-2- متغيرات الأداء للمبادلات الحرارية الصفائحية:

يتأثر أداء المبادل الحراري الصفائحي بعدة متغيرات، وهي تدفق المائع خلال المبادل والحرارة النوعية ودرجات حرارة دخول الموائع الساخنة والباردة وخروجها، ومساحة السطح المتاحة لانتقال الحرارة، والموصلية الحرارية لمادة الصفائح، ودرجة تكون الرواسب أو القشور، ومعاملات انتقال الحرارة بالحمل من الأسطح الداخلية والخارجية. وعادة ما يتم جمع تأثير الكميات الأربع الأخيرة في كمية واحدة؛ هي المعامل الإجمالي لانتقال الحرارة بمجرد تحديد الحرارة النوعية للموائع ودرجات حرارة دخولها، وكمية الحرارة المطلوب نقلها لتحديد فوراً درجات حرارة الخروج من مبادئ الديناميكا الحرارية. ومع ذلك فإن حسابات انتقال الحرارة تكون ضرورية لتحديد مساحة السطح المطلوبة، على فرض أن قيمة معامل انتقال الحرارة الإجمالي معلومة، ويرتبط انخفاض الضغط خلال المبادل الحراري ارتباطاً مباشراً مع معدل قدرة الضخ المطلوبة، ويرتبط بطريق غير مباشر مع معدل انتقال الحرارة، حيث أنه يتحكم في سرعة الجريان ومن ثم في معدل التدفق ومعاملات انتقال الحرارة [9].

إن عملية اختيار مبادل حراري هي في الواقع عملية اختيار للقيم المثلى للمعاملات المتغيرة، مثل فاقد الضغط ومساحة سطح المبادل الحراري، والتكلفة الابتدائية وتكلفة التنظيف ومعامل الاتساخ الخ. وفي الحياة العملية غالباً ما تتضمن عملية التصميم والاختيار استخدام طريقة المحاولة والخطأ لتحديد التصميم الأمثل للمبادل

الحراري، لكثرة متغيرات الأداء للمبادلات الحرارية، يتم نمذجة تصميم المبادل الحراري باستخدام الحاسوب، لما يوفره من سرعة عالية في معالجة البيانات وإعطاء المعلومات المطلوبة للتصميم الأمثل بكافة متغيرات المبادل بدقة وسرعة عاليتين [10].

3-2-3- حدود الأداء للمبادلات الحرارية الصفائحية (Performance Limit):

إمكانات المبادلات الحرارية الصفائحية محدودة بسبب الصفائح وموانع التسرب. تفرض مانعات التسرب قيودًا على درجات حرارة التشغيل (150 درجة مئوية - 260 درجة مئوية)، والضغط (ضغط التشغيل الأدنى 25-30 بار)، وطبيعة السوائل التي يمكن التعامل معها. الهندسة المعقدة للقنوات المتشكلة بين الصفائح تؤدي إلى أن المبادلات الحرارية الصفائحية لها خصائص قص عالية. تكون عوامل الاحتكاك مرتفعة نوعًا ما للتدفق المضطرب، لكن أطوال القنوات قصيرة نوعًا ما والسرعات منخفضة بحيث يمكن الحفاظ على انخفاضات الضغط ضمن الحدود المسموح بها لعمليات التدفق أحادية الطور [11].

يتمثل العائق الرئيسي لتطبيق المبادلات الحرارية الصفائحية في الصناعات التحويلية في الحد الأعلى لحجمها، المبادلات التي يزيد حجمها عن 1500 م³ 2 غير متوفرة عادة. نظرًا لأن ممرات التدفق بين الألواح رفيعة، فإن معدلات التدفق العالية ستسبب انخفاضات ضغط مفرطة، مما يحد من السعة الحرارية. في حالات محددة، من الممكن الحصول على أقصى ضغط تصميم يصل إلى 2.5 ميجا باسكال. عادة، يكون ضغط التصميم حوالي واحد ميجا باسكال كما أن درجات حرارة التشغيل محدودة بتوافر مانعات تسرب مناسبة.

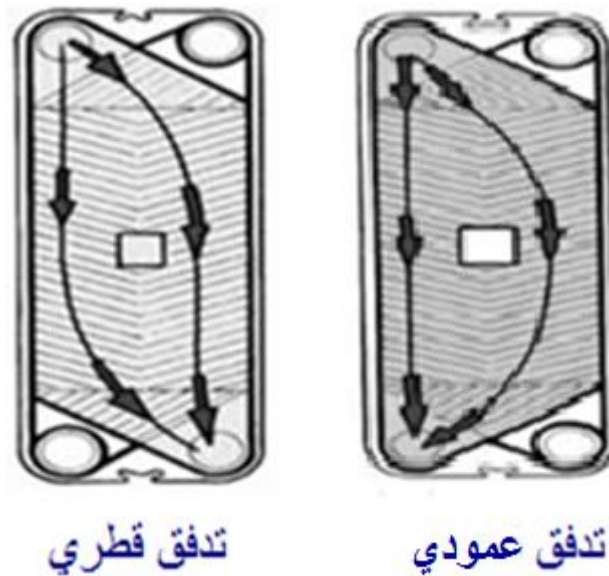
المبادلات الحرارية الصفائحية مع مانعة التسرب ليست مناسبة كمبردات هواء. كما أنها ليست مناسبة تمامًا لتطبيقات الهواء إلى الهواء أو الغاز إلى الغاز. تمثل السوائل ذات اللزوجة العالية بعض المشاكل بسبب سوء توزيع التدفق، خاصة عند حدوث التبريد. تعطي سرعات التدفق الأقل من 0.1 م / ثانية معاملات انتقال حرارة منخفضة وكفاءة منخفضة للمبادل الحراري.

تعدّ المبادلات الحرارية الصفائحية أقل ملاءمة لأعمال التكثيف، لأن فجوات الصفيحة الضيقة والجريان المضطرب يؤديان إلى انخفاض ملحوظ في الضغط على جانب البخار. تتوفر الآن مبادلات حرارية صفائحية مصممة خصيصًا للمهام التي تشمل أنظمة التبخر والتكثيف [12].

3-3- أنماط التدفق (Flow Arrangements):

3-3-1- التدفق داخل القناة الواحدة:

في القناة الواحدة قد يكون تدفق المائع الواحد إما قطريًا أو عموديًا اعتمادًا على توضع مانعة التسرب على المنافذ. يشير التدفق القطري إلى التدفق الذي يدخل ويخرج من القناة عند المنافذ المقابلة قطريًا، بينما يشير التدفق العمودي إلى التدفق الذي يدخل ويخرج على الجانب نفسه كما في الشكل (23).



شكل (23) أنماط التدفق داخل القناة الواحدة

3-3-2- التدفق عبر القنوات:

يطلق على عدد المرات التي يقوم فيها المائع بتغيير اتجاه جريانه داخل المبادل الحراري بعدد التمريرات بناء عليه يوجد نظامين [13]:

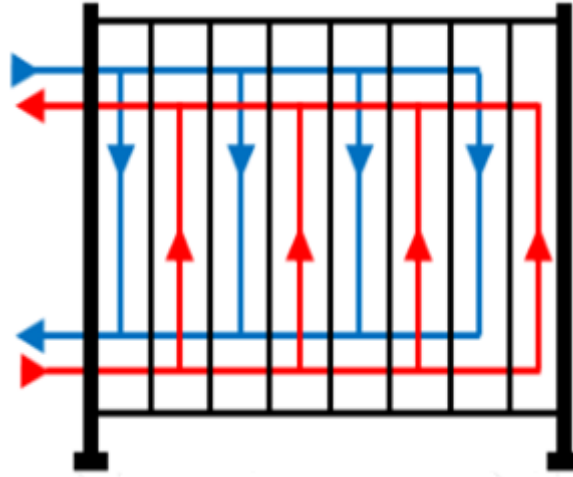
-نظام تدفق أحادي الممر: حيث يقوم المائع بمرور واحد أي لا يغير المائع اتجاه جريانه داخل المبادل، وهناك نوعان لهذا التدفق هما:

تدفق نوع U:

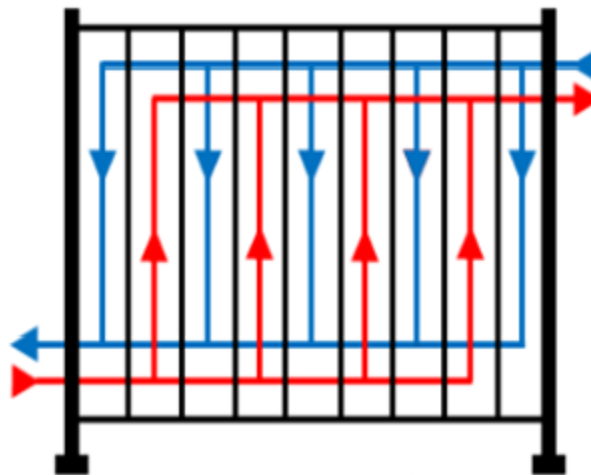
تكون المنافذ الأربعة على جهة واحدة من المبادل (على اللوحة الجانبية الثابتة) وبالتالي سهولة في فك المبادل للتنظيف والصيانة، في هذا التصميم يتحقق الجريان المتوازي للمائعين ولكن التدفق يكون أقل انتظامًا كما في الشكل (24).

تدفق نوع Z:

حيث يوجد منافذ الدخول والخروج للمائع على كلتا الصفيحتين الطرفيتين للمبادل أي لا تكون المنافذ الأربعة على جهة واحدة من المبادل، في هذا التصميم يتحقق الجريان المتعاكس للمائعين، والذي يعطي توزيع تدفق أكثر انتظاماً، الشكل (25).

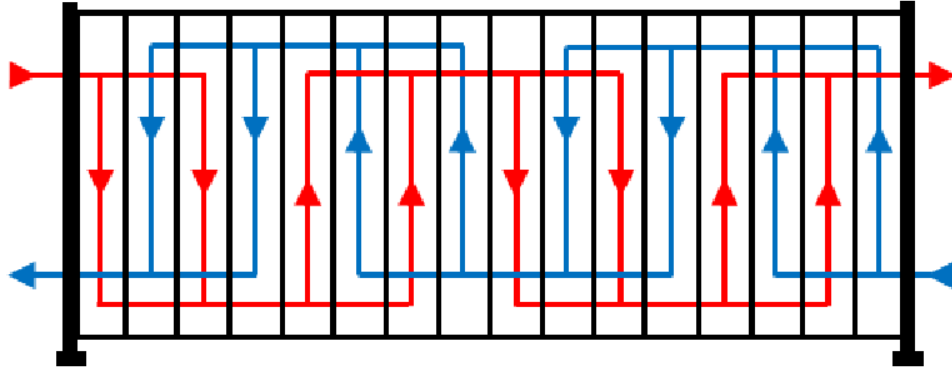


شكل (24) نمط تدفق U للمبادل الصفائحي



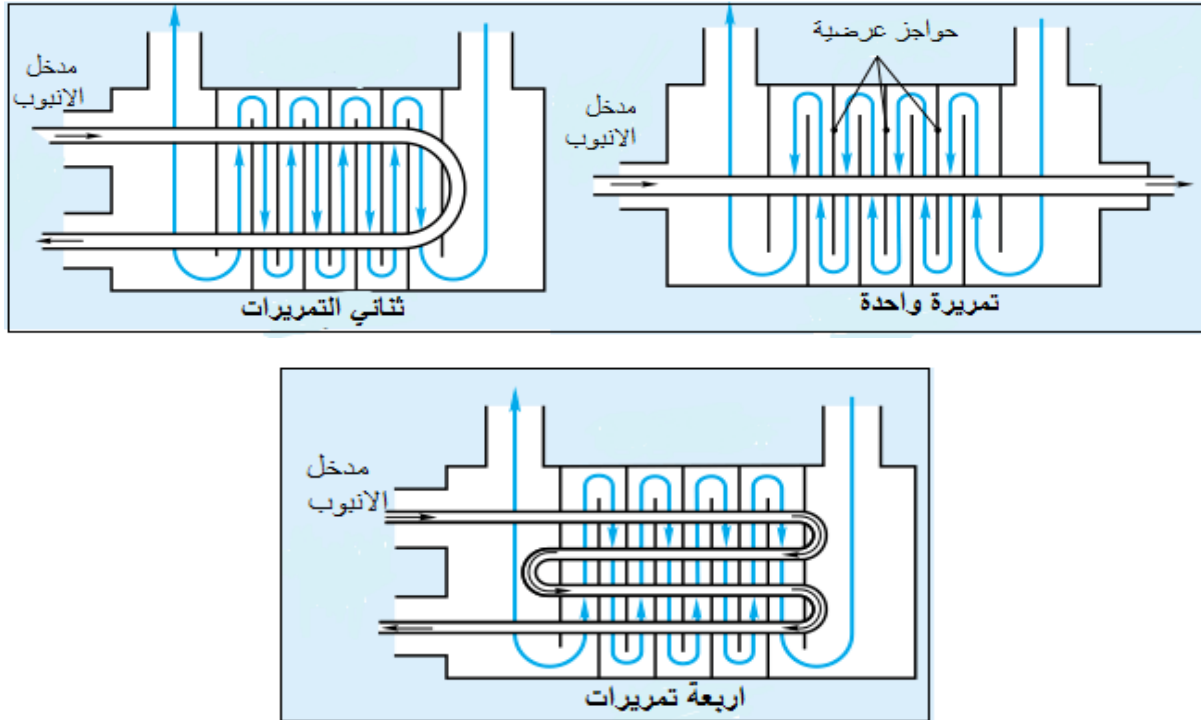
شكل (25) نمط تدفق Z للمبادل الصفائحي

-نظام تدفق متعدد الممرات: حيث يقوم المائع بتغيير اتجاه جريانه عدة مرات داخل المبادل الحراري كما في الشكل (26). يمكن استخدام نظام التدفق متعدد الممرات لتعزيز عملية انتقال الحرارة، وزيادة سرعة التدفق للموائع، وعادة ما يكون ضرورياً عندما يكون هناك فرق كبير بين معدلات تدفق للمائعين.



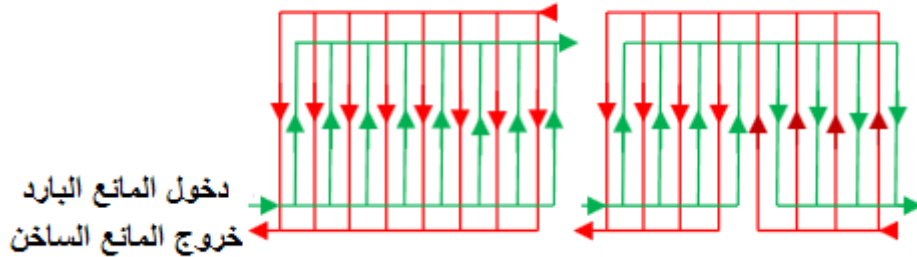
شكل (26) نظام تدفق متعدد الممرات

إن نظام الممرات المتعددة يمكن تحقيقه في مختلف أنواع المبادلات الحرارية ولكن قد يختلف تأثيره من مبادل إلى آخر ففي الشكل (27) نلاحظ مبادل حراري من نوع الأسطوانة والغلاف حيث أن المائع الساخن قد غير اتجاهه عدة مرات (تمريره-ثنائي التمريرات -أربعة تمريرات)، والواضح أن الغاية منها هو زيادة مساحة سطح التبادل الحراري بين المائع الساخن والمائع البارد.



شكل (27) مبادل حراري من نوع أسطوانة والغلاف متعدد الممرات

بينما في المبادل الحراري الصفائحي متعدد الممرات حيث أن المائع قد غير اتجاه جريانه عدة مرات (ممر - ممرين-ثلاث ممرات) ألا أن سطح التبادل الحراري وهو الصفائح لم يتغير من حيث الأبعاد ولا من حيث العدد وبالتالي فإن مساحة سطح التبادل لم تزداد مع زيادة عدد الممرات وإنما ازداد تدفق المائع في كل قناة من قنوات المائع الواحد كما في الشكل (28).

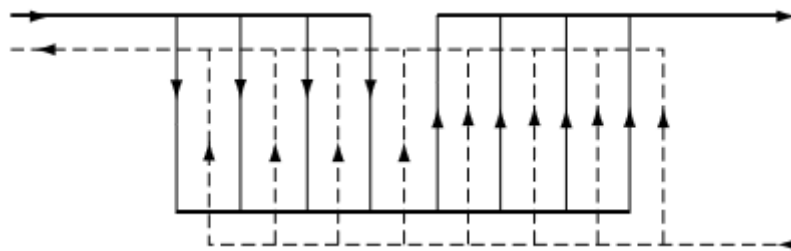


شكل (28) رسم تخطيطي لمبادل حراري صفائحي متعدد الممرات

يعدّ سوء توزيع التدفق أحد أهم المشاكل في المبادلات الحرارية الصفائحية، والتي يتم معالجتها من خلال تحقيق عدة ممرات للمائع أثناء تدفقه عبر المبادل الحراري، الأمر الذي يؤدي إلى رفع قيمة تدفق المائع في القناة الواحدة وبالتالي زيادة قيمة عدد رينولدز، وتحسين معامل انتقال الحرارة مما يؤدي إلى زيادة فعالية المبادل الحراري الصفائحي [14].

عند تصميم المبادل قد يكون عدد الممرات متساوياً لكلا المائعين عند تساوي التدفقات، وقد يكون مختلفاً وذلك تبعاً لتدفق كل مائع.

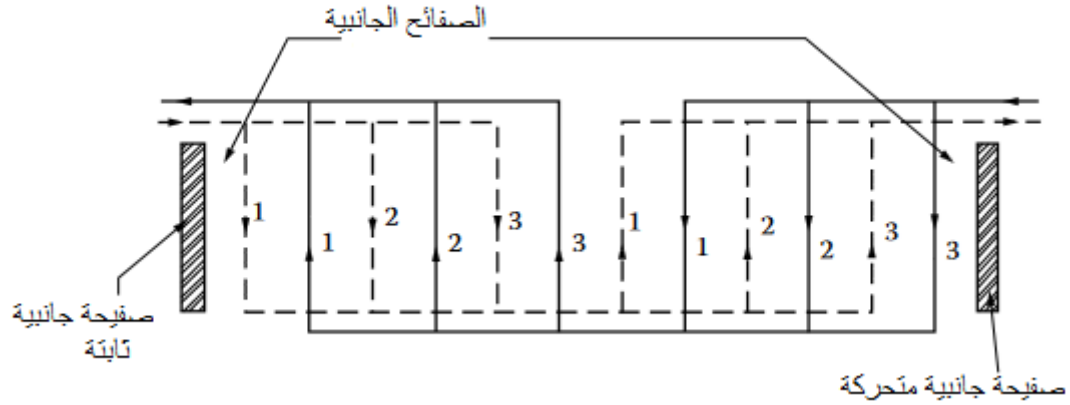
هناك حالات يكون فيها أحد المائعين ذا قيمة منخفضة للتدفق، والمائع الآخر ذو قيمة عالية للتدفق الأمر الذي يؤثر سلباً في عملية انتقال الحرارة، عندها يتم تحقيق عدة ممرات للمائع الأول، حتى ترتفع قيمة التدفق ونحافظ على ممر واحد للمائع الثاني كما في الشكل (29) حيث نلاحظ تدفق المائع الأول ليحقق ممرين كل ممر مكون من أربع قنوات، بينما يتدفق المائع الثاني وفق ممر واحد مكون من ثمانية قنوات.



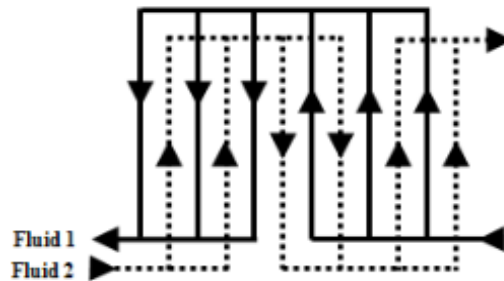
شكل (29) مخطط توضيحي لترتيب تمريرة واحدة/تمريرتان (2*1/4*8)

أما في الحالات التي يكون فيها تدفق المائعين ذا قيمة منخفضة يتم تحقيق عدة ممرات لكلا المائعين كما في الشكل (30) حيث نلاحظ تحقيق ممرين للمائع الساخن، الأول يتم عبر القنوات الثلاثة الأولى، والثاني عبر القنوات الثلاثة التالية، والأمر ذاته للمائع البارد أي $(2 \times 3/2 \times 3)$ [15].

وعنما تكون قيمة التدفق للمائعين منخفضة ومتفاوتة يتم تحقيق الجريان بعدة ممرات للمائع الأول تختلف عن ممرات المائع الثاني مثلا ممران للمائع الأول وثلاثة ممرات للمائع الثاني كما في الشكل (31).



شكل (30) مخطط توضيحي لترتيب ثنائي الممرات لكلا المائعين $(2 \times 3/2 \times 3)$



شكل (31) مخطط توضيحي لترتيب ثنائي الممرات للمائع الأول وثلاثة ممرات للمائع الثاني

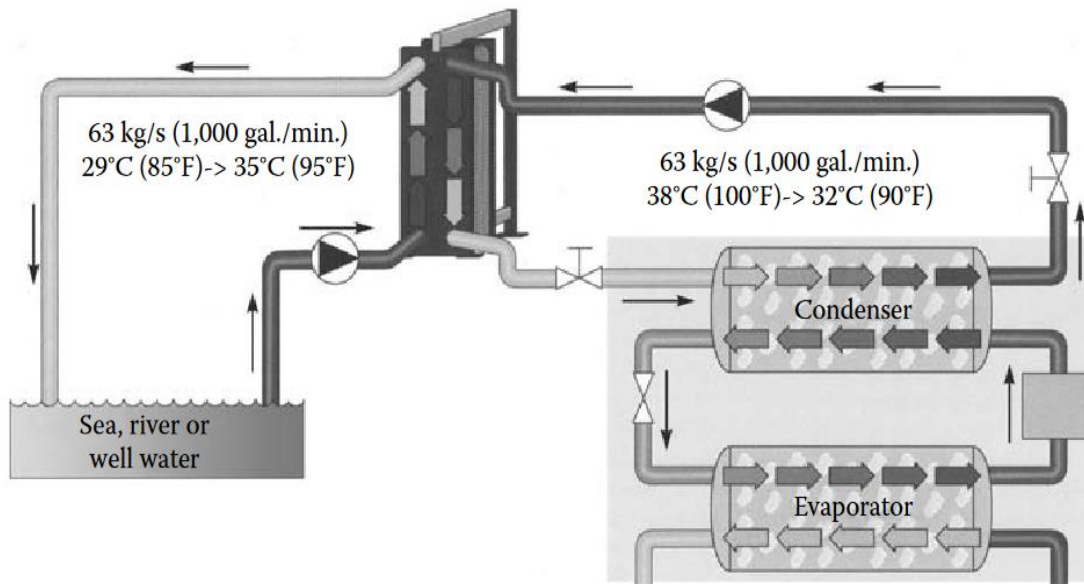
3-4- تطبيقات المبادل الحراري الصفائحي (Applications):

تُستخدم المبادلات الحرارية الصفائحية على نطاق واسع في المنتجات الكيميائية والصيدلانية ومنتجات النظافة والمعالجة الكيميائية الحيوية والأغذية وصناعات الألبان.

أحد الأمثلة ذات الأهمية الكبيرة خاصة في المواقع البحرية أو الساحلية في أنظمة التبريد المركزية باستخدام مياه البحر أو الأنهار أو الآبار، هو المبرد البيني، على سبيل المثال

المبرد البيني في التبريد المركزي:

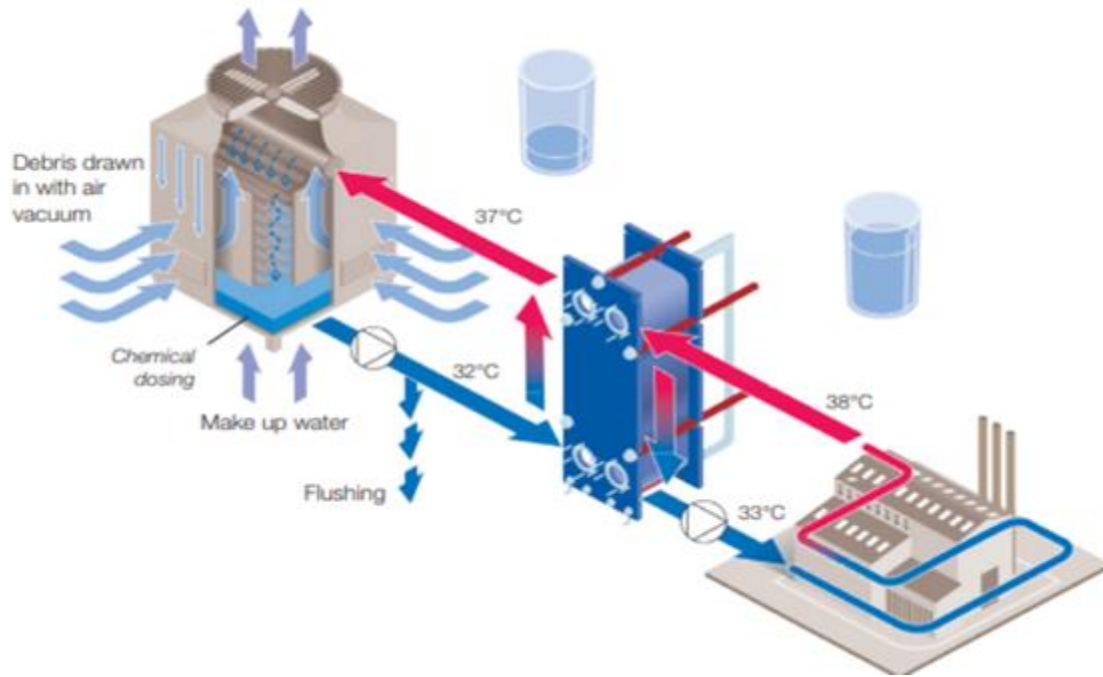
في التبريد المركزي يتم تمرير دائرة مغلقة من المياه عالية الجودة التي يتم استخدامها في المبرد البيني عبر المبادل الحراري الصفائحي، حيث يتم انتقال الحرارة من مياه الدائرة المغلقة إلى مياه ذات جودة أقل، مثل مياه البحر أو النهر. يظهر في الشكل (32) دارتان مغلقتان، ومبادل حراري صفائحي كمبادل وسيط. يتم تصنيع المبادلات الصفائحية من التيتانيوم لتحمل تآكل مياه البحر ويتم حل مشاكل القاذورات والرواسب في النهاية من خلال القدرة على تفكيك نظام المبادل الحراري الصفائحي للتنظيف. لذلك، يعتبر المبادل الحراري الصفائحي مثالاً للأغراض البحرية والتطبيقات على متن السفن.



شكل (32) نظام تبريد الدائرة المغلقة [15]

مبادل برج التبريد:

تُستخدم المبادلات الحرارية الصفائحية مع تدفق التيار المعاكس بشكل واسع في أبراج التبريد ذات الدارة المفتوحة بسبب نظام التدفق الممتاز الذي يجعل من الممكن تحقيق فرق درجات حرارة منخفض يصل إلى درجة مئوية واحدة بدلاً من إرسال مياه برج التبريد غير النظيفة عند 32 درجة مئوية إلى المحطة مباشرة يستخدم المبادل الحراري الصفائحي حيث يوفر المياه النظيفة عند 33 درجة مئوية شكل (33).



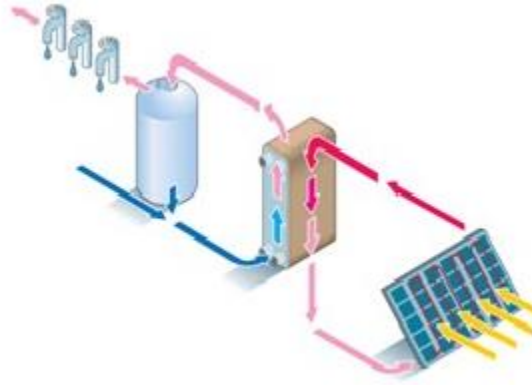
شكل (33) تطبيق مبادل برج التبريد

أنظمة التدفئة المركزية:



شكل (34) تطبيق مبادل في نظام التدفئة المركزية

التسخين بالطاقة الشمسية



شكل (35) تطبيق مبادل سخان شمسي

3-5- التآكل في المبادلات الحرارية الصفائحية:

عندما تكون المواد المقاومة للتآكل ضرورية، تصبح المبادلات الحرارية الصفائحية أكثر جاذبية من المبادلات التقليدية على الرغم من أن الصفائح مصنوعة من مواد باهظة الثمن. تم ذكر مجموعة من مواد البناء المستخدمة في الجدول (2).

جدول (2) اختيار مادة الصفيحة حسب التطبيق [23]:

Application	Material
Natural cooling water, cooling tower water, or demineralized water	Stainless steel 316
Sea or brackish water	Titanium
Dilute sulphuric and nitric acids up to 10% concentration, and for temperatures up to 70°C	Titanium, titanium-palladium alloy, Incoloy 825, Hastelloy
Chloride solution	
Chloride content < 200 ppm	Stainless steel
Chloride content > 200 ppm	Titanium
Caustic solutions (50–70%)	Nickel
Wet chloride, chlorinated brines, hypochlorite solutions	Titanium
Copper sulphate solution in electrolyte refining	Stainless steel
Cooling hydrogen gas saturated with water vapor and mercury carryover in electrolysis plants	Incoloy

نظرًا لأن الصفائح رفيعة جدًا مقارنة بسماكة الأنبوب في مبادلات الأسطوانة والأنبوب، فإن معامل التآكل للمبادلات الحرارية الصفائحية أصغر بكثير من المبادلات الأنبوبية.

نتيجة للاضطراب الشديد على سطح الصفيحة بالكامل، شكل (36) يتطلب ذلك استخدام صفائح ذات مواد فائقة الجودة مثل المونيل أو التيتانيوم كما ذكرنا في الجدول (الجدول 1).



شكل (36) التدفق المضطرب في المبادل الصفائحي [15]

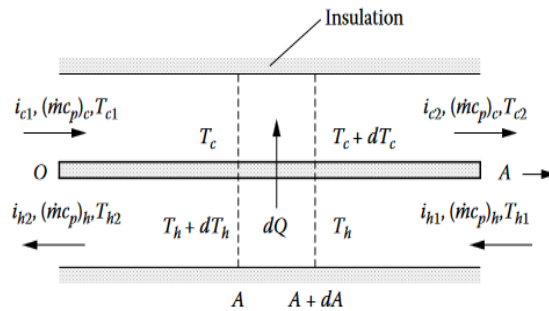
الفصل الرابع

معادلات تصميم المبادل الحراري الصفائحي

1-1- المعادلة التفاضلية والشروط الحدية:

من القانون الأول للترموديناميك:

$$(1.1) \quad dQ = m \cdot di$$



شكل (37) توازن الطاقة الكلي للسوائل الساخنة والباردة لمبادل حراري ثنائي السوائل.

من اجل الشروط الحدية التالية:

- المبادل الصفائحي يعمل في الحالة المستقرة
- لا يوجد أي ضياعات حرارية للوسط المحيط
- تدفق المائع الرئيسي موزع بالتساوي بين قنوات الصفائح المدروسة في المبادل.
- يوجد السائل بطور واحد.
- انتقال الحرارة يحصل فقط بين الصفائح.
- المميزات الفيزيائية تبقى ثابتة خلال الدراسة.

$$(1.2) \quad di = c_p \cdot dT$$

وبالتالي :

$$(1.3) \quad Q = (m \cdot c_p)_h (T_{h1} - T_{h2})$$

$$(1.4) \quad Q = (m \cdot c_p)_h (T_{h1} - T_{h2})$$

1-2-المعادلات الأساسية لتصميم المبادل الحراري الصفائحي:

1-2-1-بارامترات الصفيحة المموجة:

الأبعاد الرئيسية لصفيحة شيفرون موضحة في الشكل (38) زاوية التموج، β ، عادة ما تتراوح بين 25° و 65° وهي مسؤولة إلى حد كبير عن انخفاض الضغط وانتقال الحرارة في القنوات. يجب أن تؤخذ التموجات في الاعتبار عند حساب إجمالي مساحة سطح انتقال الحرارة الفعال للصفيحة [16].

تزيد التموجات من مساحة سطح الصفيحة مقارنةً بالصفيحة المسطحة، يتم تعريف عامل تكبير السطح، Φ ، على أنه: نسبة الطول المموج إلى الطول المسطح، وتتراوح قيمتها بين 1.15 و 1.25.

$$(1.5) \quad A_1 = \Phi \cdot A_{1P}$$

حيث:

$$(1.6) \quad A_{1P} = L_P \cdot L_W$$

حيث:

A_1 : المساحة الفعالة لسطح انتقال الحرارة للصفيحة.

L_P : طول الصفيحة الفعال.

L_W : عرض الصفيحة الفعال.

وتحسبان وفق الشكل (38) كما يلي:

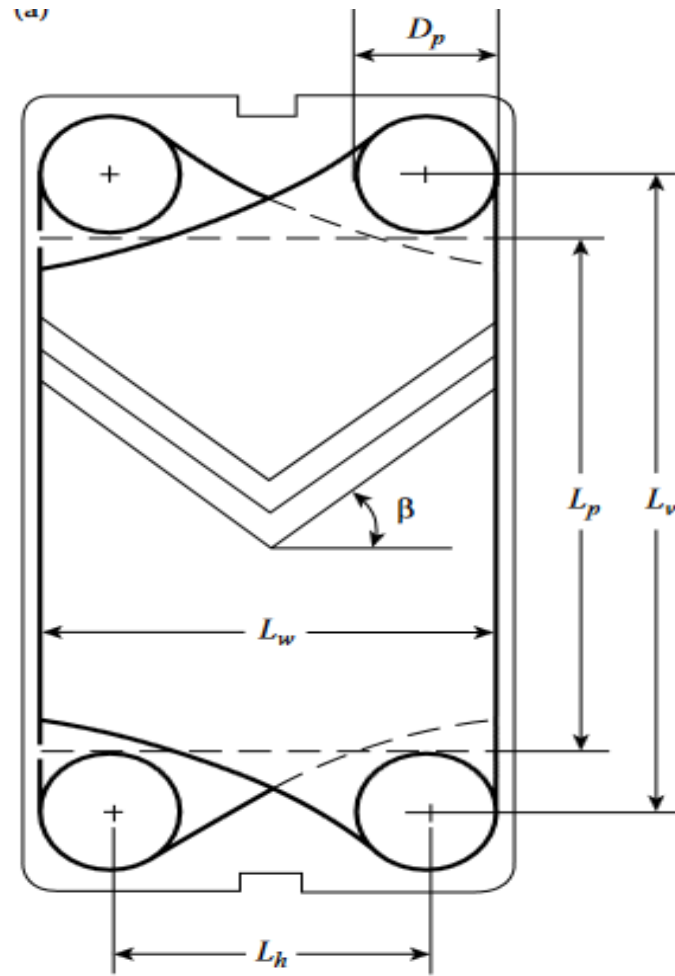
$$(1.7) \quad L_P = L_V - D_P$$

$$(1.8) \quad L_W = L_h + D_P$$

L_V : طول الصفيحة الكلي .

L_h : عرض الصفيحة الكلي.

حيث D_P هو قطر منفذ الدخول والخروج للموائع.



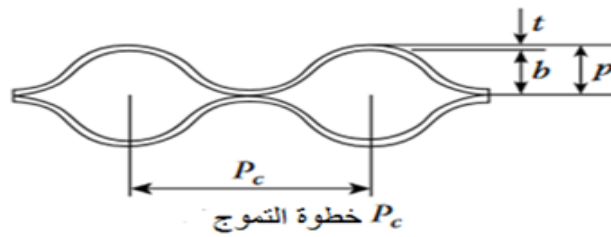
شكل (38) ابعاد الصفحة

1-2-2- قناة التدفق:

قناة التدفق هي القناة المكونة من صفيحتين متجاورتين، ويتم تعريف تباعد القناة، b ، كما هو موضح في الشكل (39).

(1.9)

$$b = P - t$$



شكل (39) خطوة التموج

b : تباعد القناة.

P : العمق الخارجي للصفحة المموجة.

t : سماكة الصفحة.

1-2-3- القطر الهيدروليكي للقناة:

يُعرّف القطر الهيدروليكي للقناة، D_h ، على أنه:

$$D_h = \frac{4 \times \text{channel flow area}}{\text{wetted perimeter}} = \frac{4 A_c}{P_w}$$

$$(1.10) \quad D_h = \frac{4(b)(lw)}{2(b+lw\Phi)} \approx \frac{2b}{\Phi}$$

حيث :

Φ هو عامل تكبير السطح

lw عرض الصفحة الفعال (m)

بفرض أن

$$b \ll L_w$$

1-2-4- معامل انتقال الحرارة:

نظرًا للمجموعة الواسعة من تصميمات الصفائح، هناك العديد من العلاقات والارتباطات المتاحة لحسابات معامل انتقال الحرارة وانخفاض الضغط. على الرغم من البحث المكثف، لا يوجد حتى الآن نموذج معمم. لا يوجد سوى بعض العلاقات المحددة لميزات مثل أشكال الجريان، ومواصفات الصفائح، ولزوجة السوائل [17]، حيث يقتصر كل ارتباط على نطاق تطبيقه. في هذا الفصل، تم استخدام العلاقة:

$$(1.11) \quad Nu = C_h(Re)^n \left(\frac{c_p \mu}{k}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.17}$$

حيث أن:

Nu : عدد نوسلت

ويعطى أيضاً بالعلاقة:

$$(1.12) \quad Nu = \frac{\alpha D_h}{k}$$

α : معامل انتقال الحرارة بالحمل للمائع.

D_h : القطر الهيدروليكي للقناة.

Re : عدد رينولدز ويعطى بالعلاقة:

$$(1.13) \quad Re = \frac{G_c D_h}{\mu}$$

k, n تتعلق بطبيعة الجريان وزاوية التمزج ويتم إيجادهما من الجدول.

جدول (3) الثوابت الخاصة بحساب انتقال الحرارة وانخفاض الضغط في PHE من أجل صفائح مموجة [18]:

β	Heat transfer			Pressure drop		
	Re	C_h	n	Re	K_p	m
$\leq 30^\circ$	≤ 10	0.718	0.349	≤ 10	50.000	1.000
	> 10	0.348	0.663	10 - 100	19.400	0.589
				> 100	2.990	0.183
45°	< 10	0.718	0.349	< 15	47.000	1.000
	10 - 100	0.400	0.598	15 - 300	18.290	0.652
	> 100	0.300	0.663	> 300	1.441	0.206
50°	< 20	0.630	0.333	< 20	34.000	1.000
	20 - 300	0.291	0.591	20 - 300	11.250	0.631
	> 300	0.130	0.732	> 300	0.772	0.161
60°	< 20	0.562	0.326	< 40	24.000	1.000
	20 - 200	0.306	0.529	40 - 00	3.240	0.457
	> 400	0.108	0.703	> 400	0.760	0.215
$\geq 65^\circ$	< 20	0.562	0.326	< 50	24.000	1.000
	20 - 500	0.331	0.503	50 - 500	2.800	0.451
	> 500	0.087	0.718	> 500	0.639	0.213

G_c : السرعة الكتلية للقناة تعطى بالعلاقة:

$$(1.14) \quad G_c = \frac{\dot{m}}{N_{cp} b l w}$$

وواحدتها $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ [18].

حيث N_{cp} هو عدد القنوات لكل ممر وتعطى بالعلاقة:

$$(1.15) \quad N_{cp} = \frac{N_t - 1}{2N_p}$$

حيث N_t هو العدد الإجمالي للصفائح و N_p هو عدد الممرات.

1-2-5- انتقال الحرارة في الصفائح:

$$(1.16) \quad Q = A U \Delta T_{lm}$$

A : مساحة سطح الصفائح الكلي ويعطى بالعلاقة:

$$(1.17) \quad A = A_1 \cdot N_p$$

A_1 : مساحة سطح الصفحة الواحدة.

N_p : عدد الصفائح

ΔT_{lm} : درجة الحرارة الوسطية اللوغاريتمية وتعطى بالعلاقة:

$$(1.18) \quad \Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

U : معامل انتقال الحرارة الكلي ويعطى بالعلاقة:

$$(1.19) \quad U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_h} + \frac{1}{\alpha_c} + \frac{tp}{k_w}}$$

α_h : معامل انتقال الحرارة للسائل الساخن

α_c : معامل انتقال الحرارة للسائل البارد

t_p : سماكة الصفيحة

k_p : الموصلية الحرارية للصفيح.

يعتمد معامل انتقال الحرارة بالحمل الحراري على خصائص المائع وسرعة المائع وهندسة الصفائح.

1-2-6- حساب عدد القنوات لكل ممر:

جدول (4) العلاقات التي تحدد عدد القنوات في كل ممر لكلا المائعين [3]:

العلاقات الرئيسية			
$N_C = N_C^I + N_C^{II}$	$N_C^I = N^I . P^I$	$N_C^{II} = N^{II} . P^{II}$	
عندما N_C زوجي		عندما N_C فردي	
$N_C^I = \frac{N_C}{2}$	$N^I = \frac{N_C}{2.P^I}$	$N_C^I = \frac{N_C + 1}{2}$	$N^I = \frac{N_C + 1}{2.P^I}$
$N_C^{II} = \frac{N_C}{2}$	$N^{II} = \frac{N_C}{2.P^{II}}$	$N_C^{II} = \frac{N_C - 1}{2}$	$N^{II} = \frac{N_C - 1}{2.P^{II}}$

N_C : عدد قنوات المبادل

N_C^I : عدد قنوات المائع الأول

N_C^{II} : عدد قنوات المائع الثاني

P^I : عدد ممرات المائع الأول

P^{II} : عدد ممرات المائع الثاني

1-2-7- انخفاض الضغط في مبادل حراري صفائحي:

يعدّ انخفاض الضغط قيمة مهمة جدا يجب مراعاتها في تصميم وتحسين المبادل الحراري الصفائحي. في أية عملية، يجب أن تظل قريبة قدر الإمكان من قيمة التصميم، مع تحديد مجال تفاوت وفقاً لقدرة الضخ المتاحة. في PHE، يكون انخفاض الضغط الكلي هو مجموع قيم:

- انخفاض الضغط عبر قنوات الصفائح المموجة.
- انخفاض الضغط المرتبط بمجري التوزيع.
- انخفاض الضغط بسبب الارتفاع.

انخفاض ضغط القناة [18]:

$$(1.20) \quad \Delta P_c = \frac{2f L_{eff} P^I G_c^2}{\rho D_p}$$

G_c : التدفق الكتلي في القناة الواحدة.

L_{eff} : الطول الفعال لمسار تدفق السوائل بين منافذ الدخول والمخرج .

P^I : عدد الممرات للمائع.

D_p : قطر منفذ الدخول.

f : معامل الاحتكاك ويعطى بالعلاقة:

$$(1.21) \quad f = \frac{k_p}{Re^m}$$

حيث أن قيمة كلا من K_p و m تعطى من الجدول (3) وفقا لقيم رينولدز وزوايا التموج المختلفة.

انخفاض الضغط المرتبط بمجري التوزيع [18]:

$$(1.22) \quad \Delta P_p = 1.4 P^I \frac{G_p^2}{2\rho}$$

التدفق الكتلي في مجري التوزيع ويعطى بالعلاقة:

$$(1.23) \quad G_p = \frac{\dot{m}}{\frac{\pi D_p^2}{4}}$$

انخفاض الضغط بسبب الارتفاع [18]:

$$(1.24) \quad \Delta P_h = \rho g L_v$$

1-3- طريقة ϵ -NTU لتحليل المبادل الحراري [19]:

- نسبة معدل السعة:

$$(1.25) \quad C_r = C_{min}/C_{max}$$

C_{min} و C_{max} القيمة الأصغرية والأعظمية للمقدارين C_c و C_h السعة الحرارية للسائلين البارد والساخن.

- عدد وحدات النقل NTU:

$$(1.26) \quad NTU = \frac{UA}{C_{min}} = \frac{UA}{(\dot{m}c_p)_{min}}$$

وبالاعتماد على معدل السعة الحرارية R حيث تعطى:

$$(1.27) \quad R = \frac{T_{h1}-T_{h2}}{T_{c2}-T_{c1}}$$

نلاحظ الحالتين:

- 1) عندما $R < 1$ [19] ، يكون لدينا :

$$(1.28) \quad (\dot{m}c_p)_c = (\dot{m}c_p)_{min} = C_{min}$$

وبالتالي تحسب عدد وحدات النقل من العلاقة:

$$(1.29) \quad NTU = \frac{UA}{C_{min}} = \frac{UA}{(\dot{m}c_p)_c}$$

- 2) عندما $R > 1$ [19] ، يكون لدينا :

$$(1.30) \quad (\dot{m}c_p)_h = (\dot{m}c_p)_{min} = C_{min}$$

وبالتالي تحسب عدد وحدات النقل من العلاقة:

$$(1.31) \quad NTU = \frac{UA}{C_{min}} = \frac{UA}{(\dot{m}c_p)_h}$$

- فعالية المبادل الحراري:

$$(1.32) \quad \epsilon = \frac{1-e^{-NTU(1-C_r)}}{1-C_re^{-NTU(1-C_r)}}$$

الفصل الخامس

الدراسة التحليلية

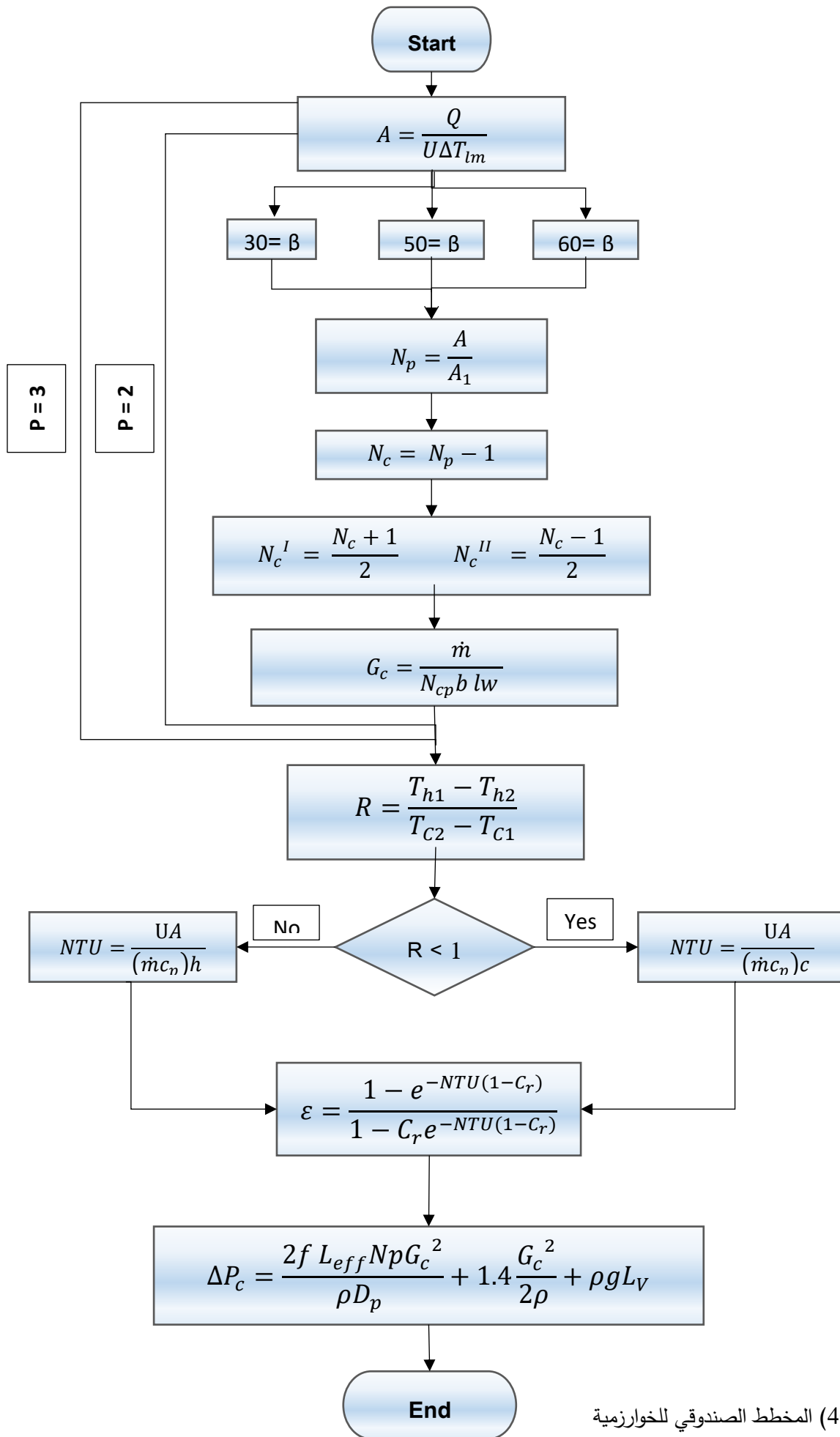
2-1- الدراسة التحليلية على MATLAB:

بالاعتماد على النموذج الرياضي السابق تم كتابة برنامج بلغة برمجة MATLAB وفق خوارزمية حل للمبادل الحراري، حيث تدفق المائع فيها مختلف مؤلفة من خطوات شكل (40):

الخطوة الأولى: تحديد أبعاد المبادل المدروس والمواصفات الفيزيائية للمائع المدروس ودرجات حرارة الدخول والخروج المطلوبة وتحديد قيم زاوية التمرير.

الخطوة الثانية:

- اختيار عدد صفائح تبدأ من 80 - 120 صفيحة.
- تحديد الصفائح الباردة والساخنة.
- تحديد سرعة المائع في القسمين الساخن والبارد.
- تحديد معامل الفعالية اعتمادا على عدد وحدات النقل.
- تحديد هبوط الضغط خلال مرور السائل في القسمين الساخن والبارد.



شكل (40) المخطط الصندوقي للخوارزمية

2-2-دراسة حالة:

كدراسة حالة، تم إدخال بيانات لثلاثة أنواع من صفائح مموجة بالأبعاد نفسها، ولكن مختلفة من حيث زاوية التموج، لتلبية احتياجات عملية تسخين الماء البارد من درجة حرارة 22°C الى 42°C من أجل تدفق 62 kg/s وتدفق ماء ساخن 26 kg/s عند درجة حرارة دخول 65°C ودرجة حرارة خروج 45°C كما في الجدول التالي:

جدول (5) مواصفات الصفيحة ومواصفات الماء البارد والساخن:

ابعاد الصفيحة	
$b = 3.7\text{ mm}$	$\beta = 30^{\circ}-50^{\circ}-60^{\circ}$
$t_b = 0.6\text{ mm}$	$L_p = 1.38\text{ m}$
$K_p = 20\text{ W/mk}$	$L_w = 0.53\text{ m}$
$\Phi = 1.15$	$D_p = 150\text{ mm}$

الماء الساخن	الماء البارد
$T_{\text{in, hot}} = 65^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{in, cold}} = 22^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{out, hot}} = 45^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{out, cold}} = 42^{\circ}\text{C}$
$\dot{M}^*_{\text{hot}} = 26\text{ kg/s}$	$\dot{M}^*_{\text{cold}} = 62\text{ kg/s}$

2-3-دراسة أثر المتغيرات الهندسية على أداء المبادل الحراري:

إن تصميم المبادل الحراري يعتمد على إيجاد البارامترات المثلى التي يتحقق عندها أعلى فعالية، وأخفض ضغط، لذلك قمنا بدراسة الأداء من أجل المتغيرات التالية:

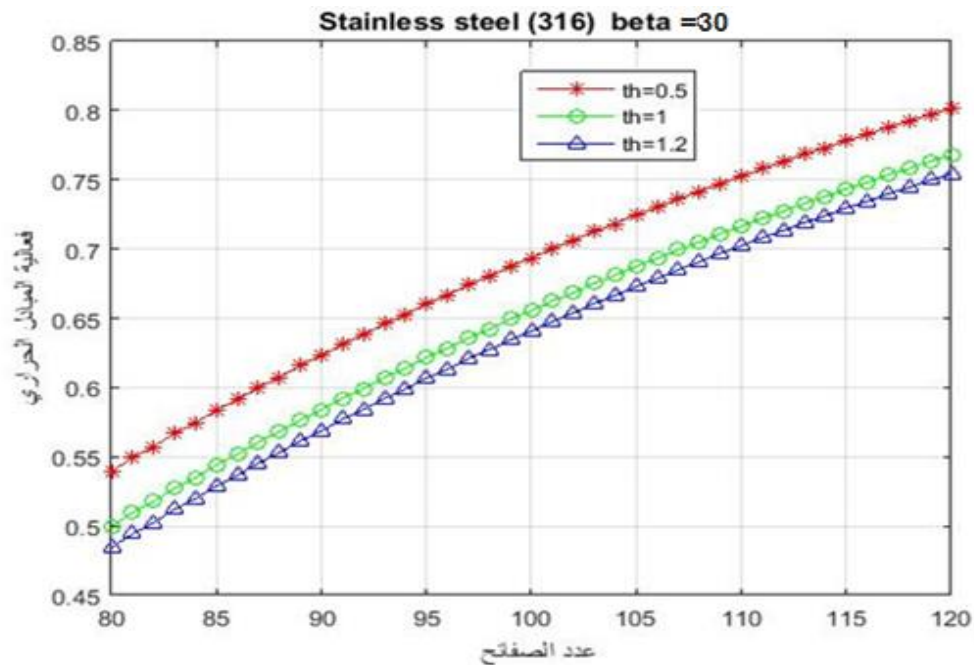
- معدن الصفيحة.
- سماكة الصفيحة
- زاوية التمرج

عدد الصفائح	معدن الصفيحة	زاوية التمرج	سماكة الصفيحة	
عدد الصفائح يتراوح بين 80-120 صفحة	ستانليس ستيل 316	$\beta = 30$	t =0.5	فعالية المبادل انخفاض الضغط
		$\beta = 50$		
		$\beta = 60$		
	تيتانيوم	$\beta = 30$	t =1	
		$\beta = 50$	t =1.2	
		$\beta = 60$		

1-3-2- دراسة أداء المبادل الحراري الصفائحي عند زاوية تموج ($\beta = 30^\circ$)

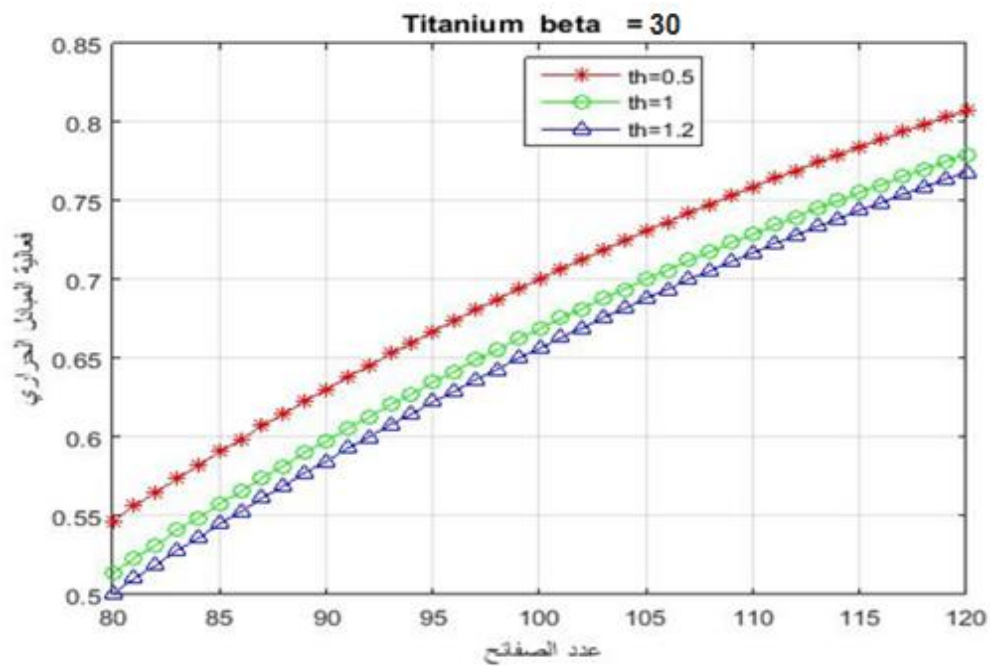
تأثير سماكة الصفائح في فعالية المبادل الحراري

St316 -1



شكل (41) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن St316 $\beta = 30^\circ$

2- تيتانيوم



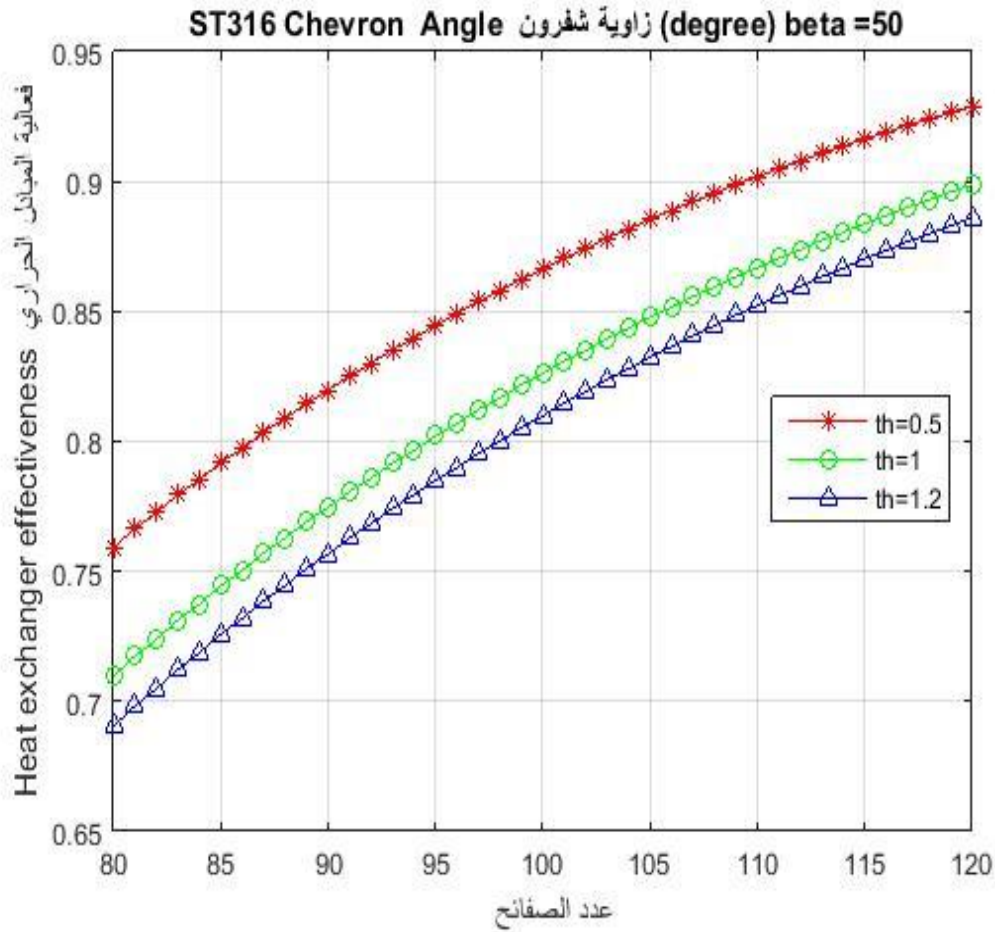
شكل (42) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن تيتانيوم $\beta = 30^\circ$

- من أجل زاوية شيفرون محددة فإنه عند زيادة سماكة الصفيحة من 0.5 الى 1.2 كان هناك انخفاض في فعالية المبادل الحراري عند عدد صفائح محدد، و السبب في ذلك انخفاض معامل انتقال الحرارة. ومع زيادة عدد الصفائح إلى 120 صفيحة كان الانخفاض في الفعالية بين السماكات الثلاث أقل.

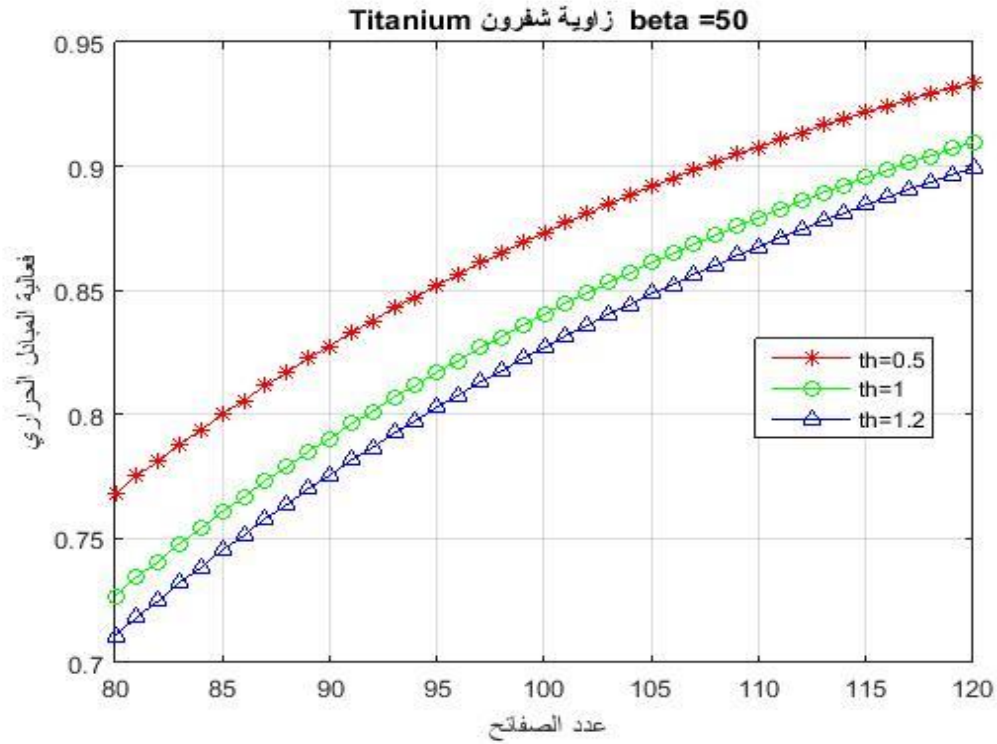
2-3-2- دراسة أداء المبادل الحراري الصفائحي عند زاوية تموج ($\beta = 50$)

تأثير سماكة الصفيحة على فعالية المبادل الحراري:

St316-1



شكل (43) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن $\beta = 50^\circ$ st316



2-تيتانيوم

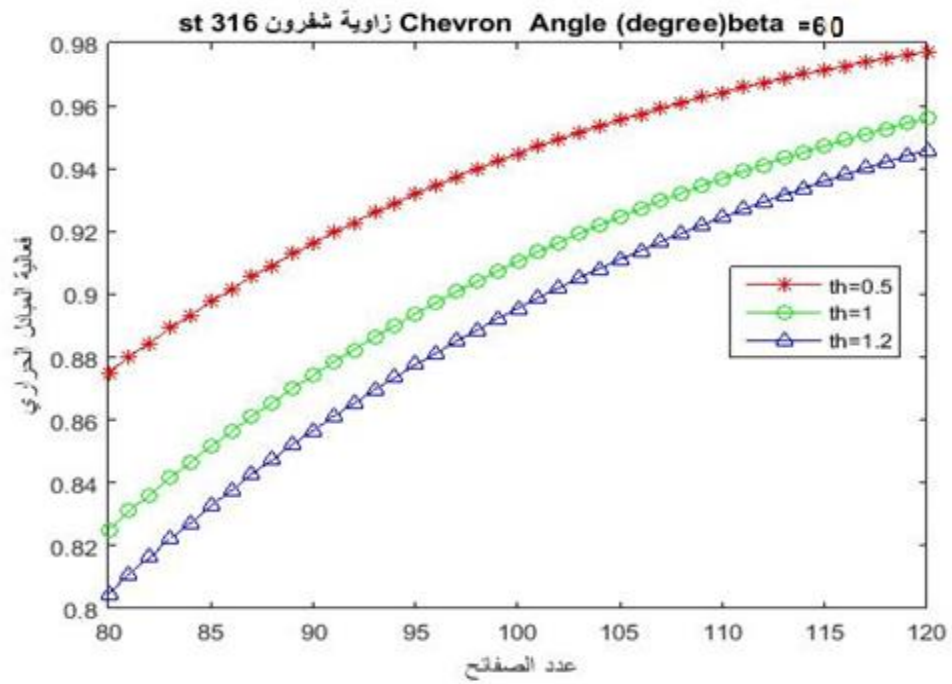
شكل (44) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن تيتانيوم $\beta=50^\circ$

- يظهر الشكل أنه مع زيادة سماكة الصفيحة يتناقص فعالية المبادل الحراري.

2-3-3- دراسة أداء المبادل الحراري الصفائحي عند زاوية تموج ($\beta = 60$)

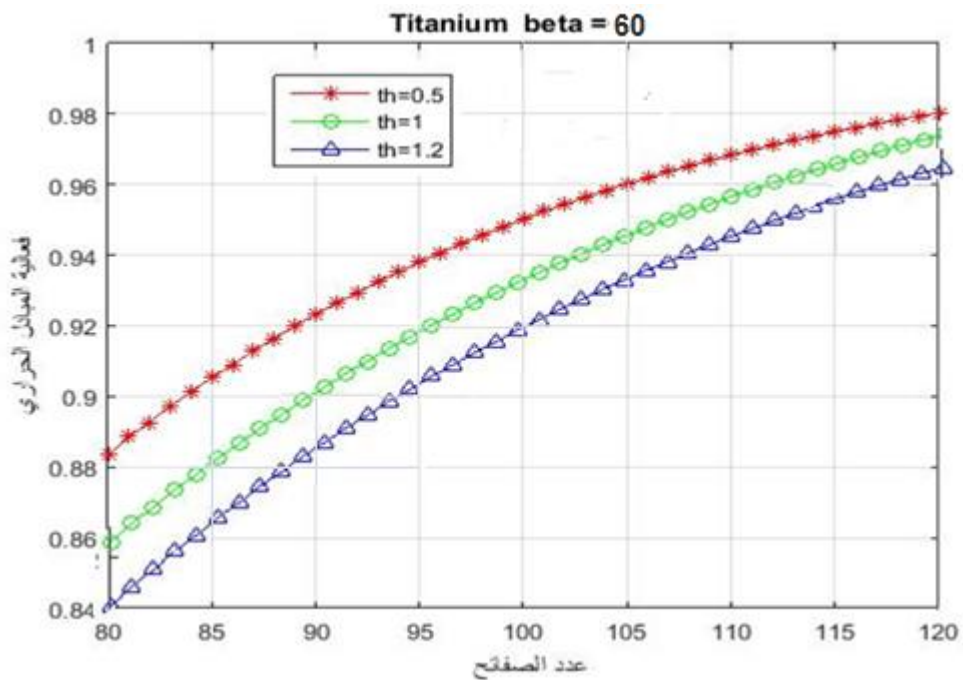
تأثير سماكة الصفيحة في فعالية المبادل الحراري:

St316-1



شكل (45) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن st361 $\beta=60^\circ$

2-تيتانيوم

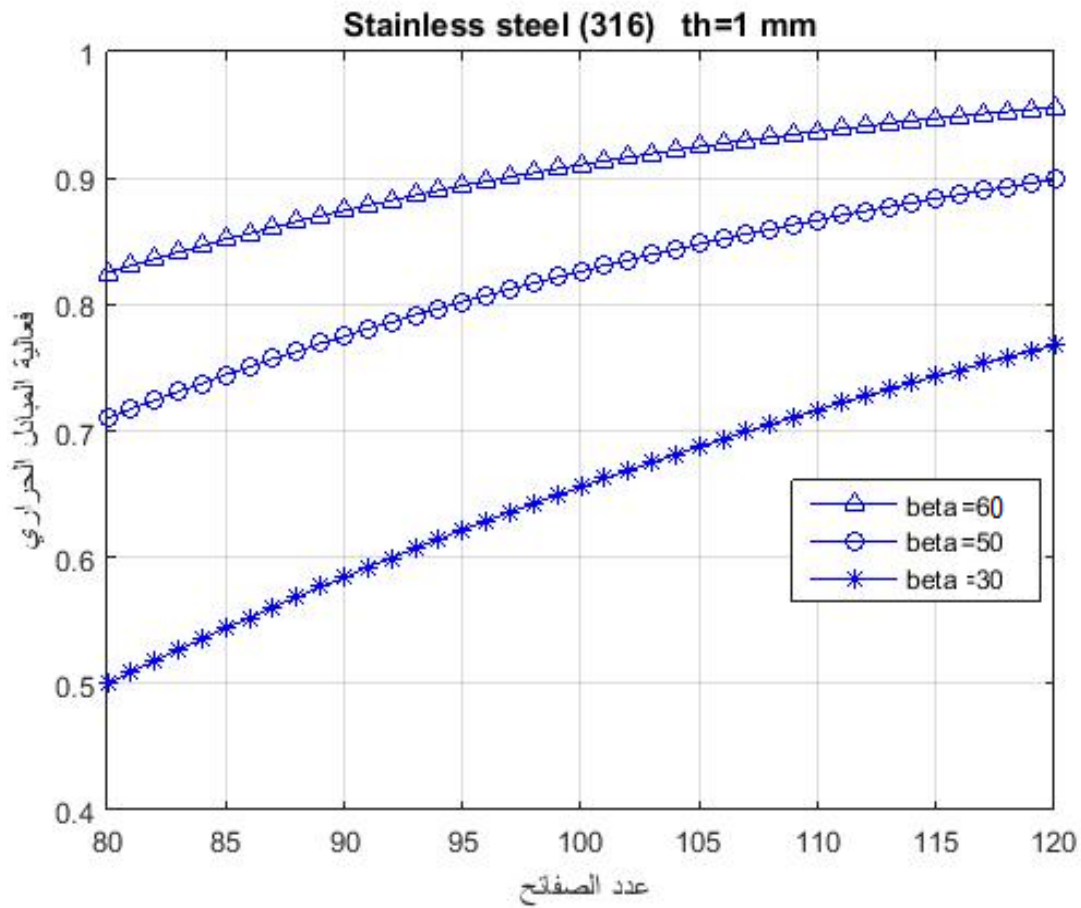


شكل (46) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن تيتانيوم $\beta=60^\circ$

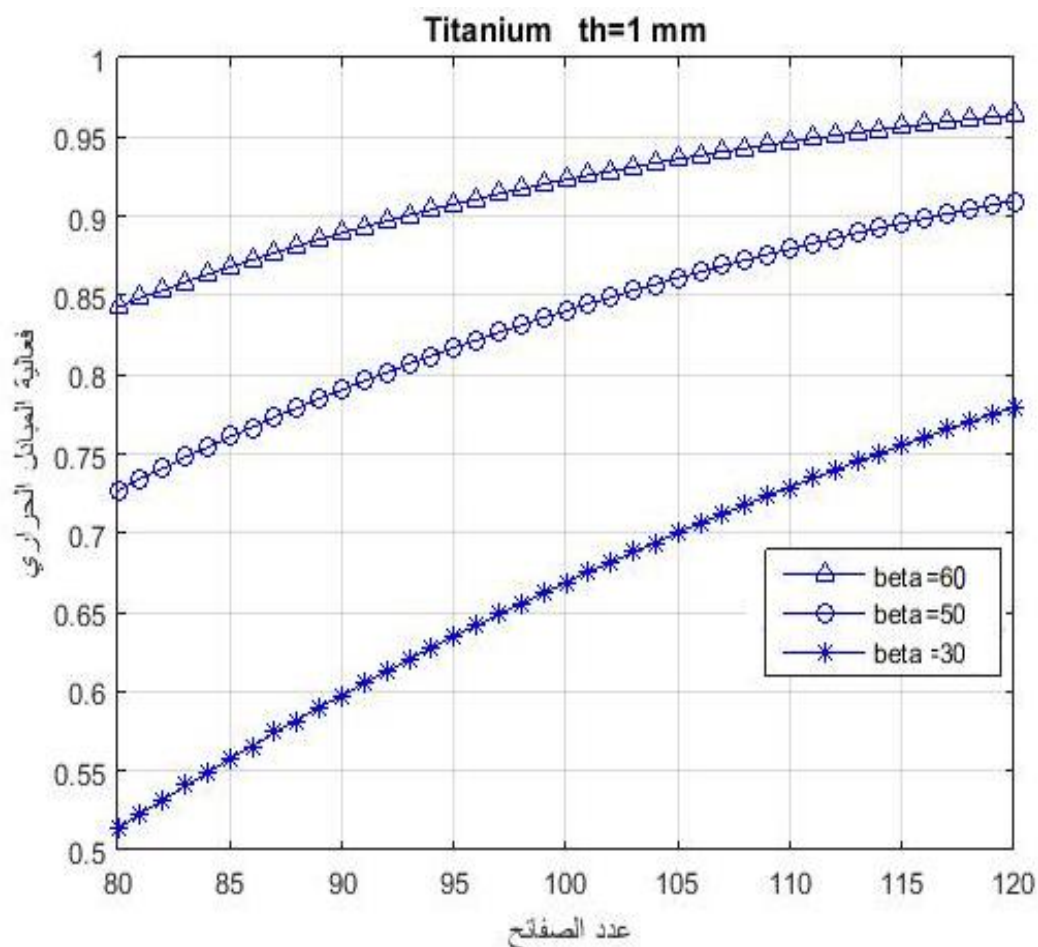
- يظهر الشكل أنه مع زيادة سماكة الصفيحة يتناقص فعالية المبادل الحراري

2-3-4- تأثير زوايا الشيفرون على فعالية المبادل الحراري:

St316-1



شكل (47) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن st316 لمختلف زوايا التموج

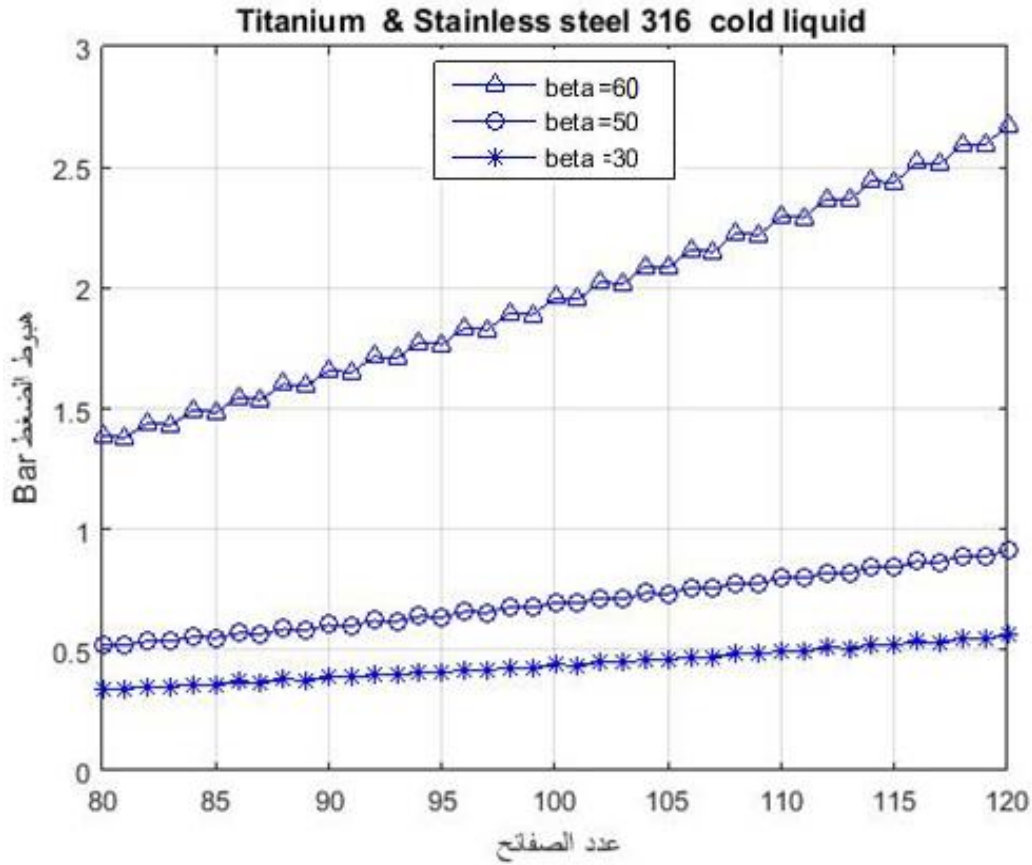


شكل (48) مخطط تغير الفعالية مع عدد الصفائح لمعدن تيتانيوم لمختلف زوايا التموج

- نلاحظ أن المبادل عند 80 صفيحة ذات زاوية تموج 60 حقق فعالية تصل إلى 0.85 في حين أن المبادل عند زاوية التموج 50 يحتاج إلى 100 صفيحة ليحقق فعالية 0.85 والسبب في ذلك الزيادة في مساحة سطح التبادل الذي تحققه زاوية التموج 60°.
- نلاحظ أنه عند عدد صفائح 100 من أجل معدن التيتانيوم كانت الفعالية 0.94 في حين كانت 0.9 من أجل معدن الستانليس ستيل والسبب في ذلك أن الموصلية الحرارية للتيتانيوم أعلى منها للستانليس ستيل.

2-3-5- تأثير زوايا الشيفرون على انخفاض الضغط:

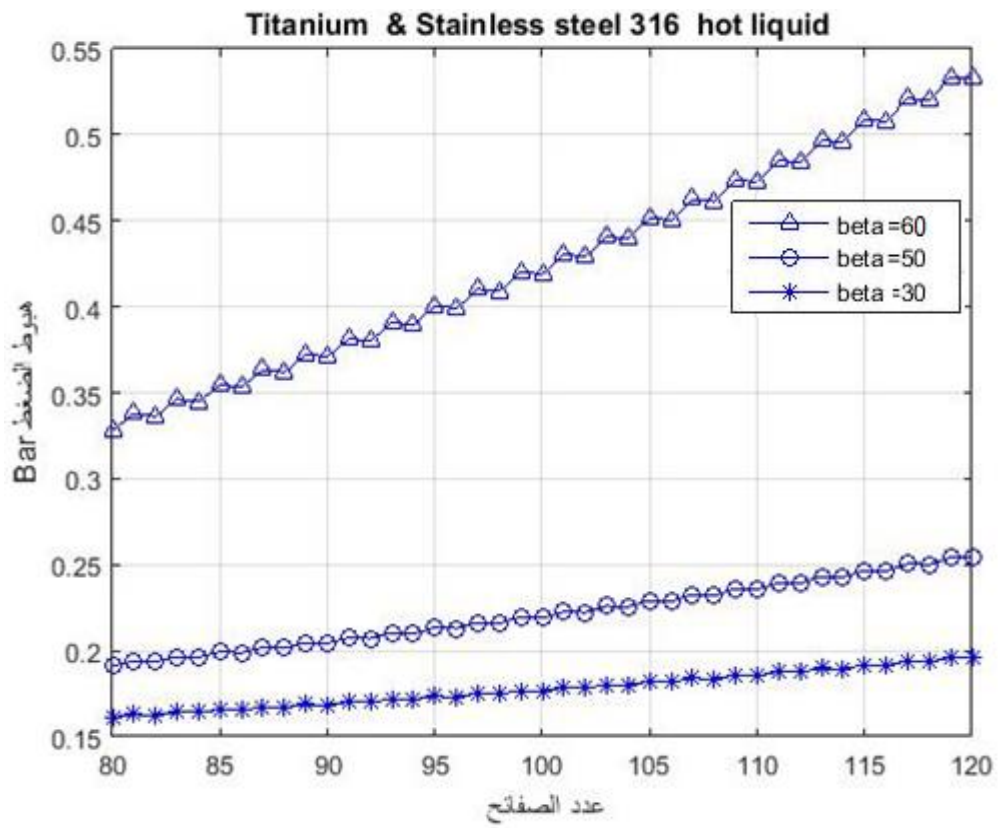
-انخفاض الضغط للمائع البارد:



شكل (49) مخطط تغير هبوط الضغط مع عدد الصفائح لمعدن st316 للماء البارد

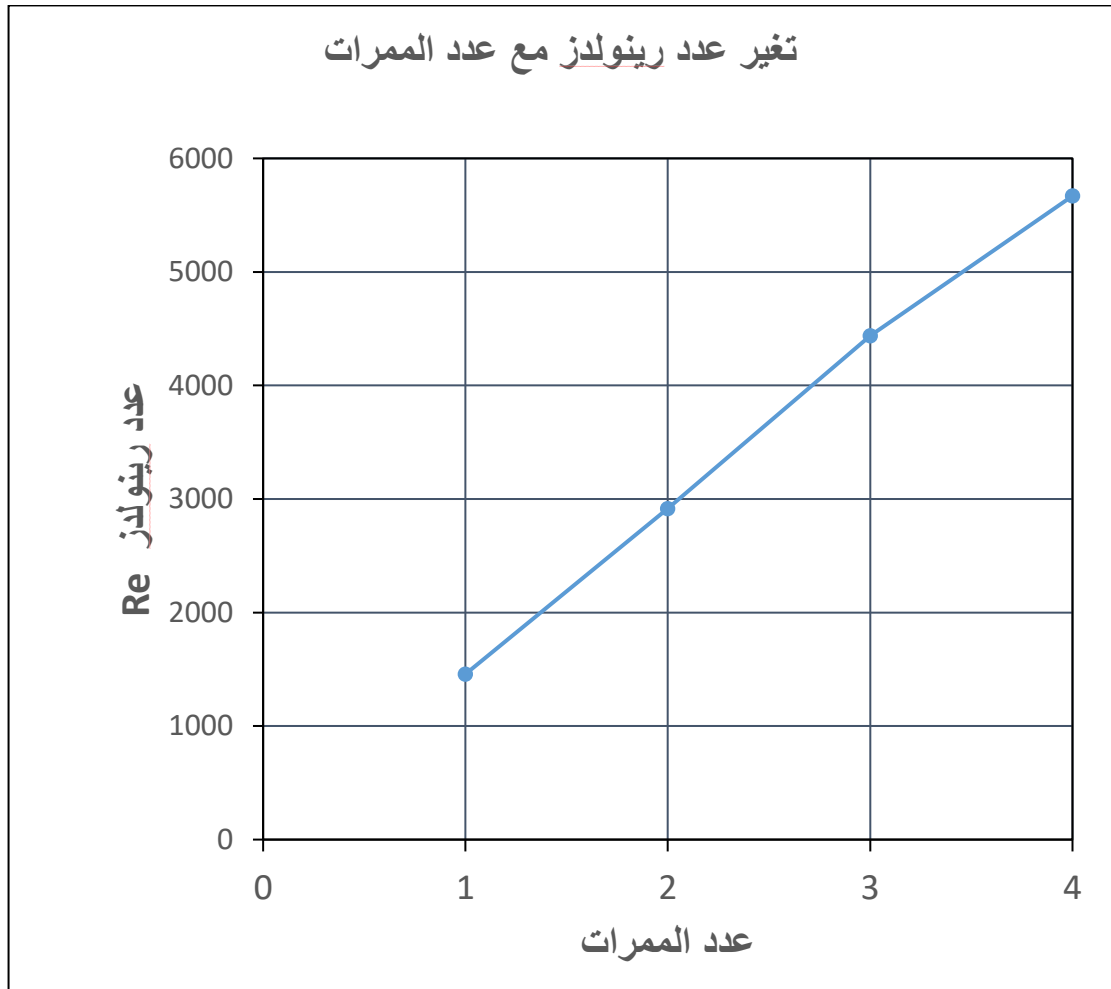
- نلاحظ عند زاوية تموج 60° كانت قيمة انخفاض الضغط أكبر منه عند 50° 30° من أجل عدد محدد من الصفائح ومع زيادة عدد الصفائح يصبح الاختلاف في انخفاض الضغط بين الزاويتين أكبر والسبب في ذلك هو زيادة معامل الاحتكاك المتعلق بزيادة عدد رينولدز وطبيعة الجريان المضطرب .

-انخفاض الضغط للمائع الساخن:



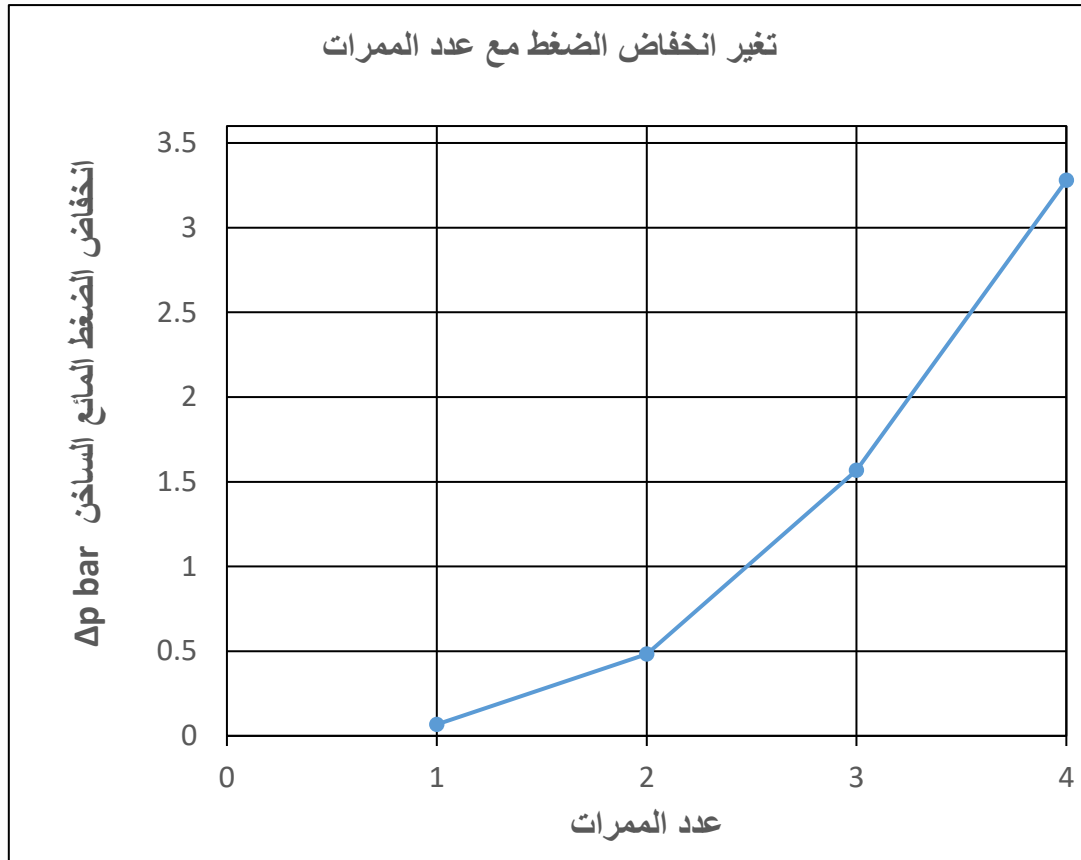
شكل (50) مخطط تغير هبوط الضغط مع عدد الصفائح لمعدن التيتانيوم للماء الساخن

2-3-دراسة تغيير عدد رينولدز وانخفاض الضغط مع زيادة عدد الممرات للمائع الساخن:



شكل (51) مخطط تغير عدد رينولدز مع عدد الممرات للماء الساخن

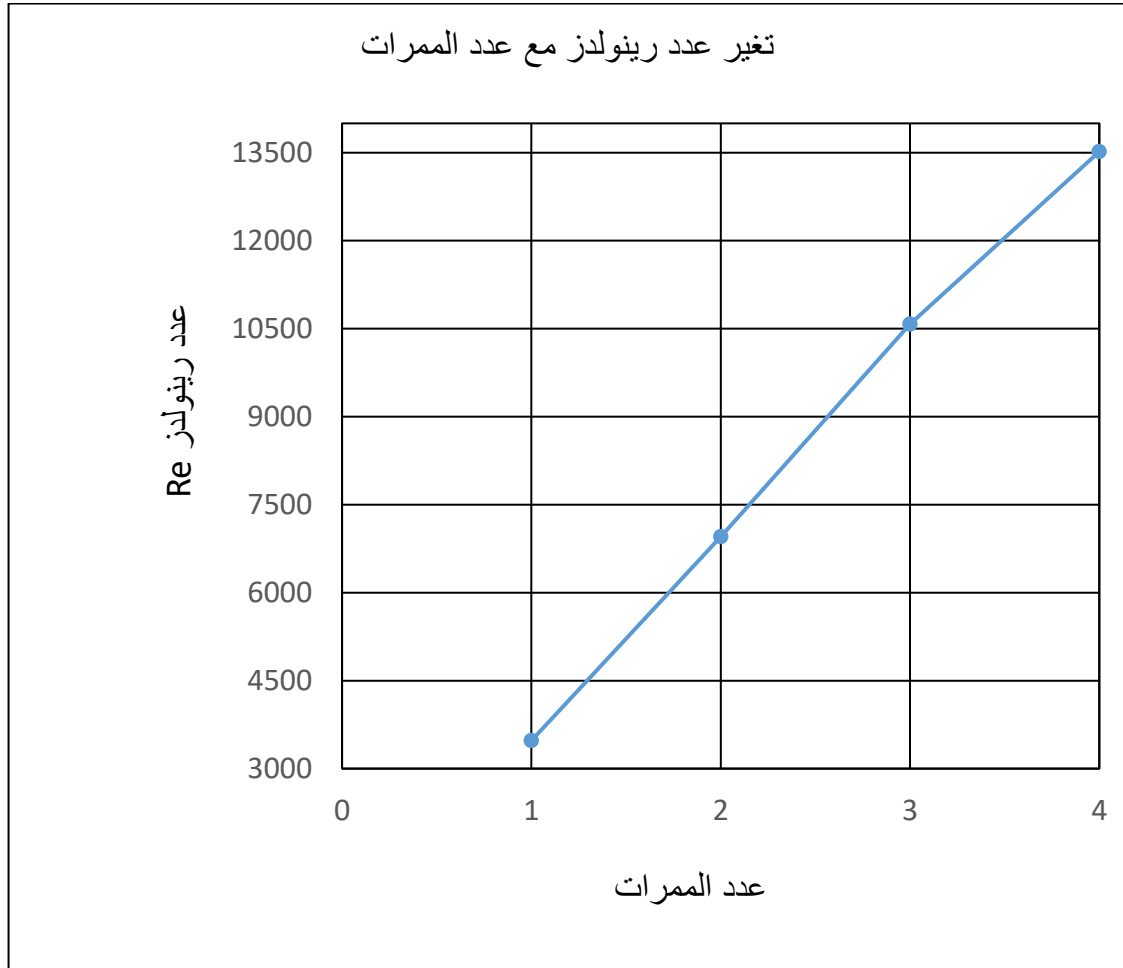
- عند عدد صفائح 120 فإن زيادة عدد الممرات من ممر واحد إلى أربع ممرات أدى إلى زيادة في قيمة عدد رينولدز من 1000 إلى 5600 والسبب في ذلك زيادة التدفق في القناة مما نتج عنه زيادة في عدد رينولدز، وبالتالي زيادة معامل انتقال الحرارة، وبالنتيجة زيادة في فعالية المبادل الحراري.



شكل (52) مخطط تغير انخفاض الضغط مع عدد الممرات للماء الساخن

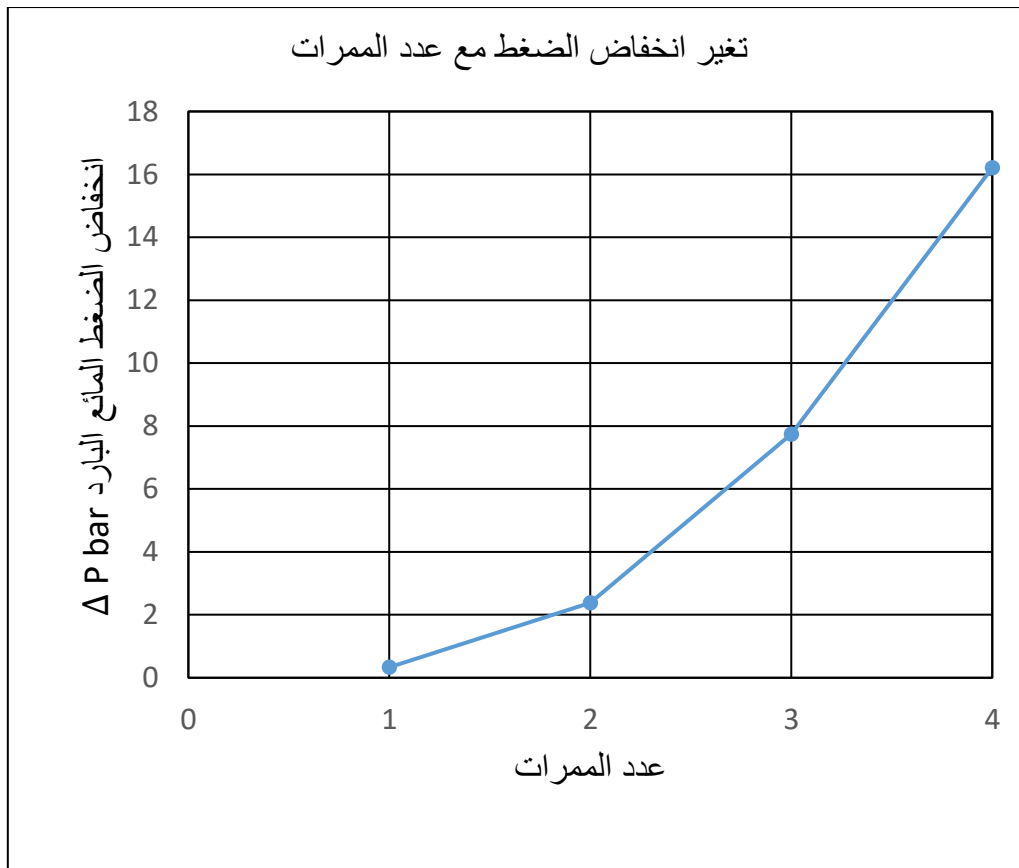
- نلاحظ زيادة عدد الممرات من ممر واحد إلى أربع ممرات أدى إلى زيادة في انخفاض الضغط من 0.2 بار إلى 3.4 بار والسبب في ذلك زيادة انخفاض الضغط في القناة الناتج عن زيادة التدفق وبالتالي انخفاض الضغط يزداد زيادة كبيرة عند عدد ممرات كبير.

2-4-تغير عدد رينولدز وانخفاض الضغط مع زيادة عدد ممرات المائع البارد:



شكل (53) مخطط تغير عدد رينولدز مع عدد الممرات للماء البارد

- عند عدد صفائح 120 فإن زيادة عدد الممرات من ممر واحد إلى أربع ممرات للمائع البارد أدى إلى زيادة في قيمة عدد رينولدز من 3000 إلى 13500 والسبب في ذلك زيادة التدفق في القناة عند زيادة عدد الممرات مما نتج عنه زيادة في عدد رينولدز وبالتالي زيادة معامل انتقال الحرارة وبالنتيجة زيادة في فعالية المبادل الحراري.



شكل (54) مخطط تغير انخفاض الضغط مع عدد الممرات للماء البارد

- إن زيادة عدد الممرات من ممر واحد إلى أربع ممرات أدى إلى زيادة في انخفاض الضغط من 0.2 بار إلى 16 بار. نلاحظ أن انخفاض الضغط يتزايد بشدة مع زيادة عدد الممرات للمائع البارد والسبب في ذلك زيادة التدفق في القناة مع زيادة عدد الممرات ، الضغط مرتبط مع التدفق بعلاقة من الدرجة الثانية وفق المعادلة (1.20) وبالتالي انخفاض الضغط يزداد زيادة كبيرة عند عدد ممرات كبير.
- نلاحظ أن تدفق الماء البارد أكبر من تدفق الماء الساخن لهذا فإن انخفاض الضغط للماء البارد قيمته أكبر من انخفاض الضغط الناتج عن تدفق الماء الساخن.

الفصل السادس

المحاكاة الحاسوبية

الاختبار الحاسوبي:

بسبب القيود الحسابية، تم اعتبار (جسمان مائعان وصفيحة واحدة) مبادلاً حرارياً كاملاً بدلاً من اختبار المبادل بأكمله، حيث سائل العمل هو الماء، وذلك من أجل ثلاث قيم لزوايا الشيفرون $\beta = 30-50-60$ تم اختبار التدرج الحراري على الصفائح الثلاث وانخفاض الضغط

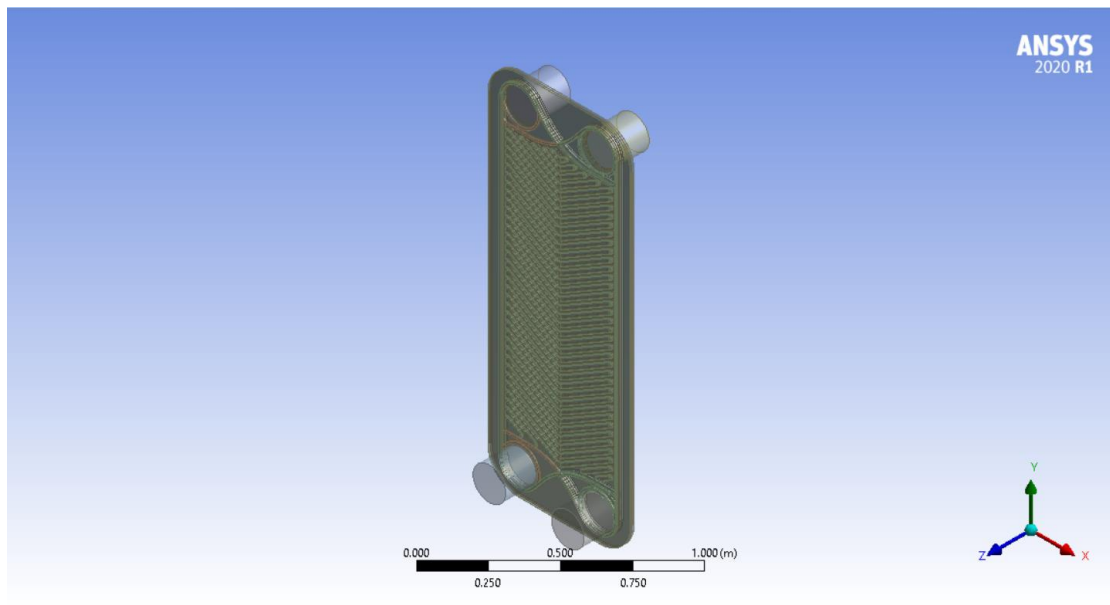


شكل (55) الشكل الهندسي لمبادل بثلاث صفائح

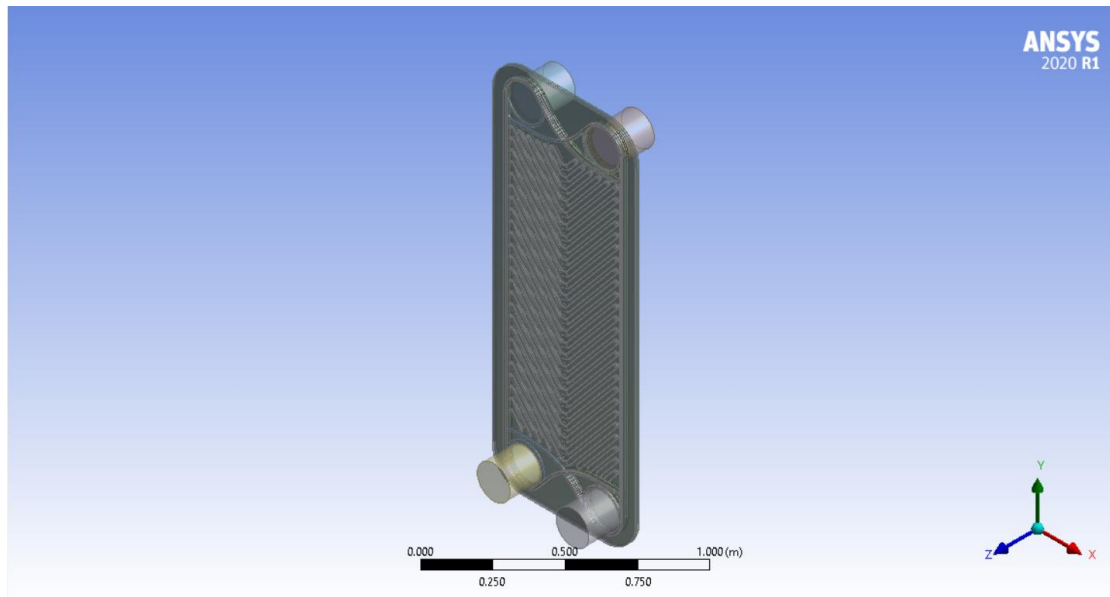
دراسة مبادل حراري صفائحي باستخدام ANSYS WORKBENCH

المرحلة الأولى:

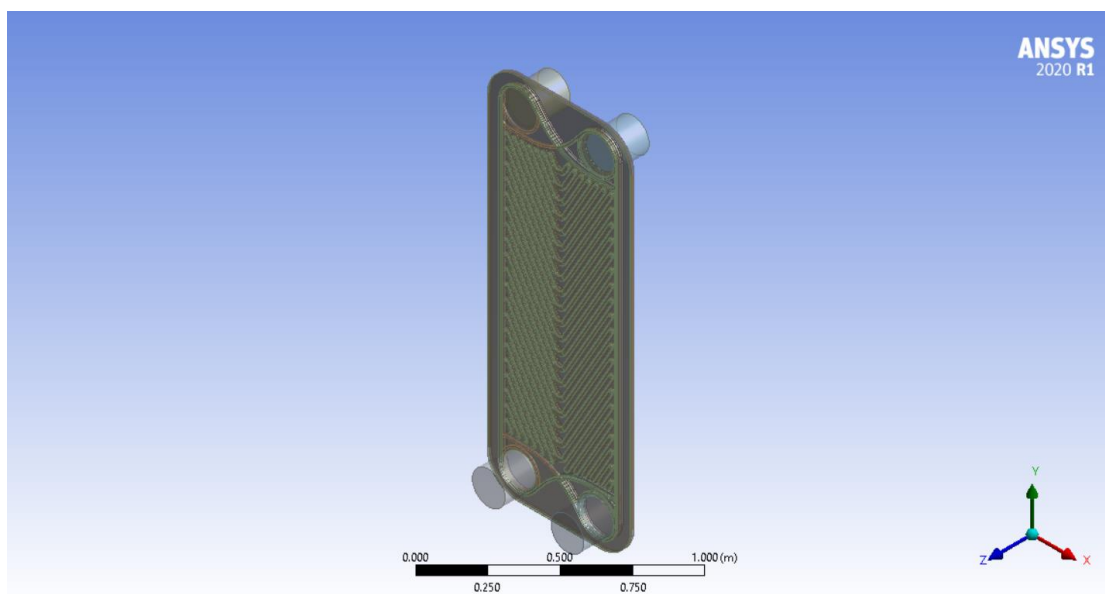
تم تصميم الشكل الهندسي للمبادل الحراري بثلاث صفائح باستخدام برنامج SEMINCE NX وبثلاث زوايا CHEVRON مختلفة 30، 50، 60 وحفظ الملف بلاهقة Parasolid واستيراده لبرنامج Design modular الملحق ببرنامج Ansys وحفظه بلاهقة agdb عن طريق الضغط generate بضمان عدم ضياع الملف ضمن ملف التحليل [22] .



شكل (56) مبادل حراري بزاوية تموج 30



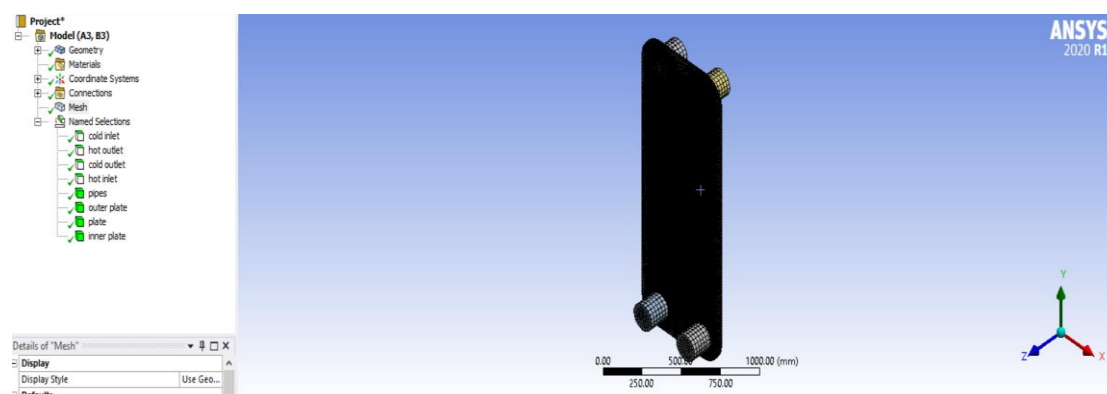
شكل (57) مبادل حراري بزاوية تموج 50



شكل (58) مبادل حراري بزاوية تموج 60

المرحلة الثانية:

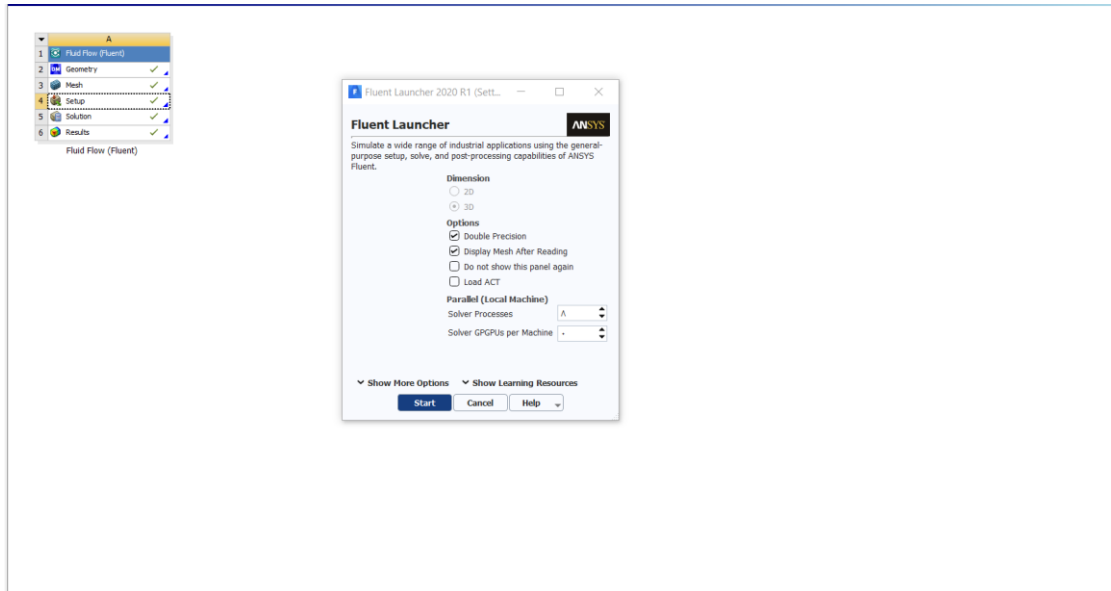
تقسيم المبادل إلى شبكة عناصر منتهية من خلال برنامج ansys mesh وتم استخدام عناصر من نوع Tetrahedrons وبلغ عدد عناصر الشبكة 845249 عنصر وتم وضع مناطق الشروط الحدية. (cold inlet, hot inlet, cold outlet, hot outlet , inner plate, outer plate, plate, pipe)



شكل (59) شبكة العناصر المنتهية

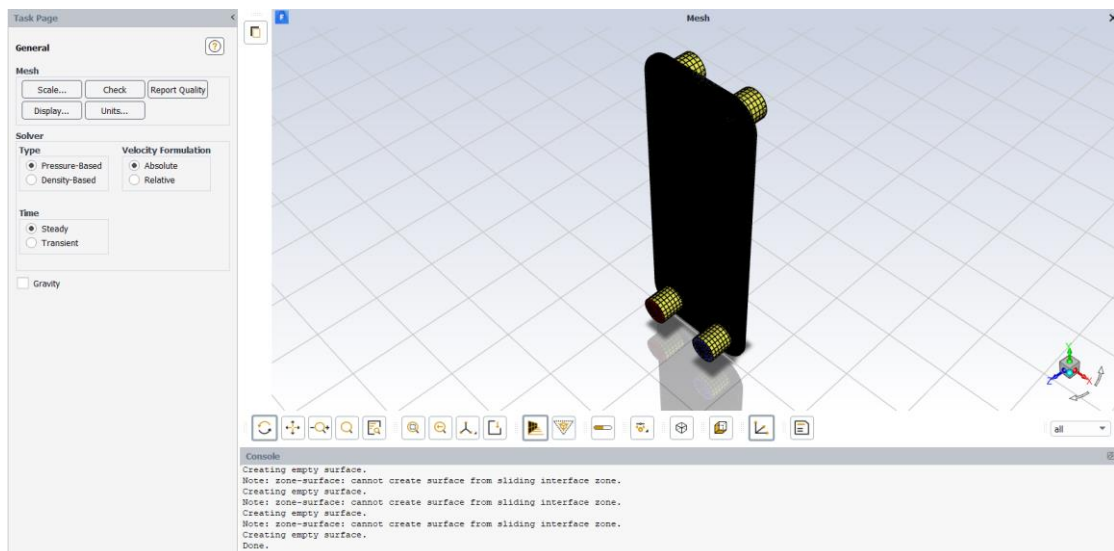
المرحلة الثالثة:

وهنا يتم ضبط إعدادات التحليل وتحديد طريقة الحل والنماذج المستخدمة للحل، وإدخال الشروط الحدية و تعريف خواص المواد



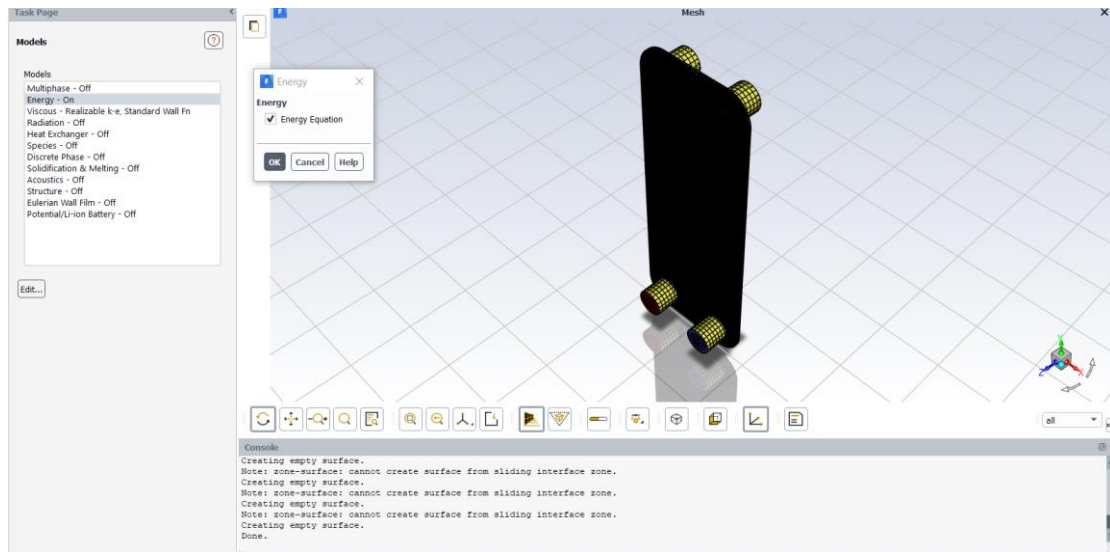
شكل (60) اختيار نوع المعالجة وعدد النوى اللازمة للحل

تم استخدام نوع سولفر الحل pressure base ومعادلة السرعة من نوع absolute ونوع المسألة steady

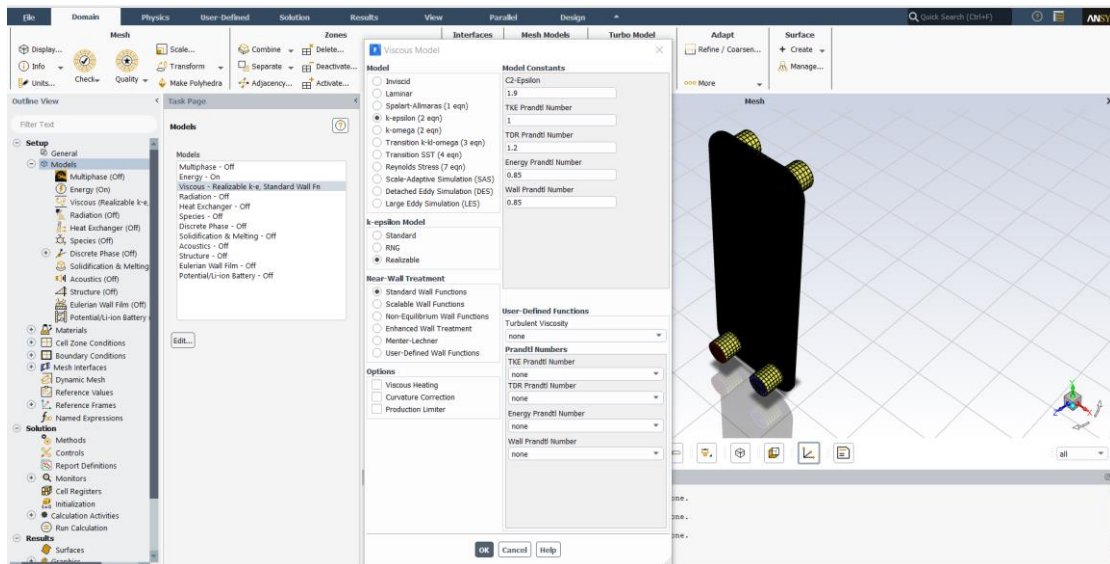


شكل (61) ضبط الإعدادات العامة

تم استخدام نموذج energy لحساب انتقالات الحرارة واختيار نموذج الجريان من k-epsilon-realizable



شكل (62) تفعيل نموذج الحرارة



شكل (63) تفعيل نموذج الجريان

سائل الجريان هو الماء و نوع معدن الصفائح ستانليس ستيل.

Create/Edit Materials

Name: water-liquid

Material Type: fluid

Order Materials by: ☒ Name ☐ Chemical Formula

Chemical Formula: h2o<I>

Fluent Fluid Materials: water-liquid (h2o<I>)

Mixture: none

Fluent Database...

User-Defined Database...

Properties

Density (kg/m3): constant 998.2 Edit...

Cp (Specific Heat) (J/kg-K): constant 4182 Edit...

Thermal Conductivity (W/m-K): constant 0.6 Edit...

Viscosity (kg/m-s): constant 0.001003 Edit...

Change/Create Delete Close Help

شكل (64) مدخلات خواص الماء

Create/Edit Materials

Name: steel

Material Type: solid

Order Materials by: ☒ Name ☐ Chemical Formula

Chemical Formula:

Fluent Solid Materials: steel

Mixture: none

Fluent Database...

User-Defined Database...

Properties

Density (kg/m3): constant 8030 Edit...

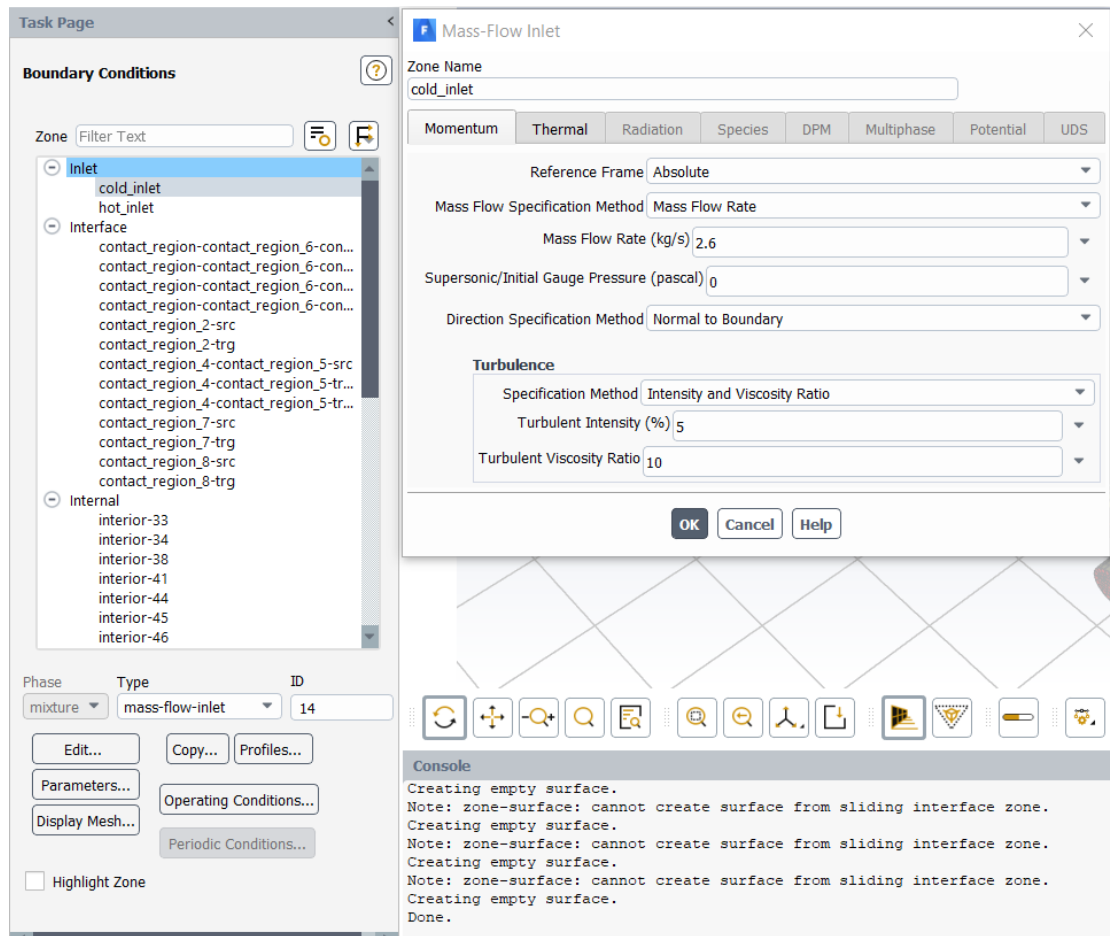
Cp (Specific Heat) (J/kg-K): constant 502.48 Edit...

Thermal Conductivity (W/m-K): constant 16.27 Edit...

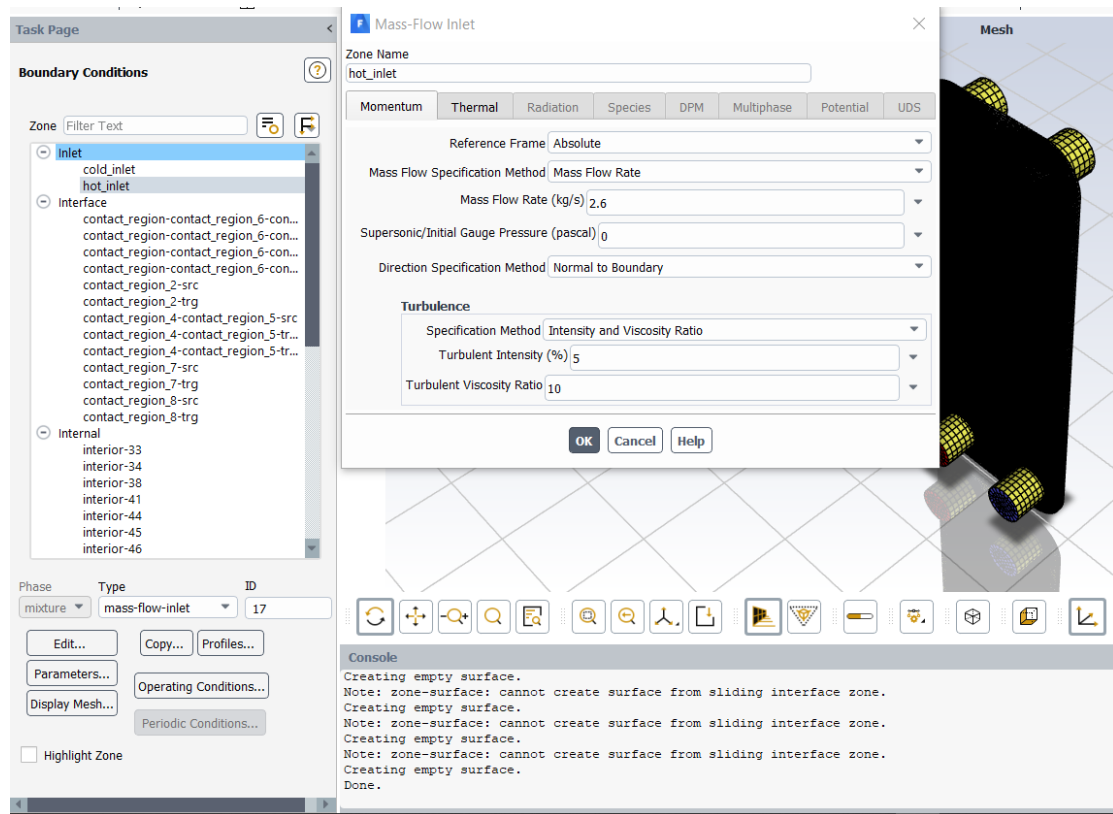
Change/Create Delete Close Help

شكل (65) خواص ستانليس ستيل

ضمن الشروط الحدية تم استخدام معدل تدفق القناة 2.6 kg/s وبدرجة حرارة 22c للماء البارد ودرجة حرارة 65c للماء الساخن.



شكل (66) وضع الشروط الحدية للماء البارد عند الدخول



وتم ربط جميع الصفائح بمعدن الستانليس ستيل
استخدم خوارزمية الحل من نوع couple وتم ضبط جميع المعادلات للدرجة الثانية من أجل دقة الحل

Task Page

Solution Methods 

Pressure-Velocity Coupling

Scheme
Coupled

Spatial Discretization

Gradient
Least Squares Cell Based

Pressure
Second Order

Momentum
Second Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy
Second Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate
Second Order Upwind

Energy

Transient Formulation
▼

☐ Non-Iterative Time Advancement

☐ Frozen Flux Formulation

☒ Pseudo Transient

☐ Warped-Face Gradient Correction

☐ High Order Term Relaxation Options...

Structure Transient Formulation
▼

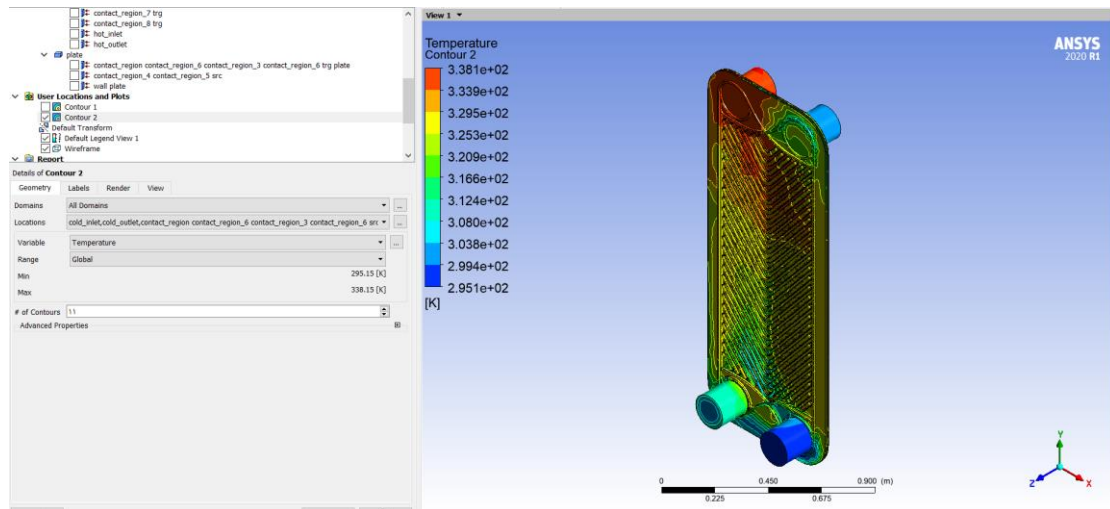
Default Report Poor Quality Elements

شكل (67) اختيار طريقة الحل

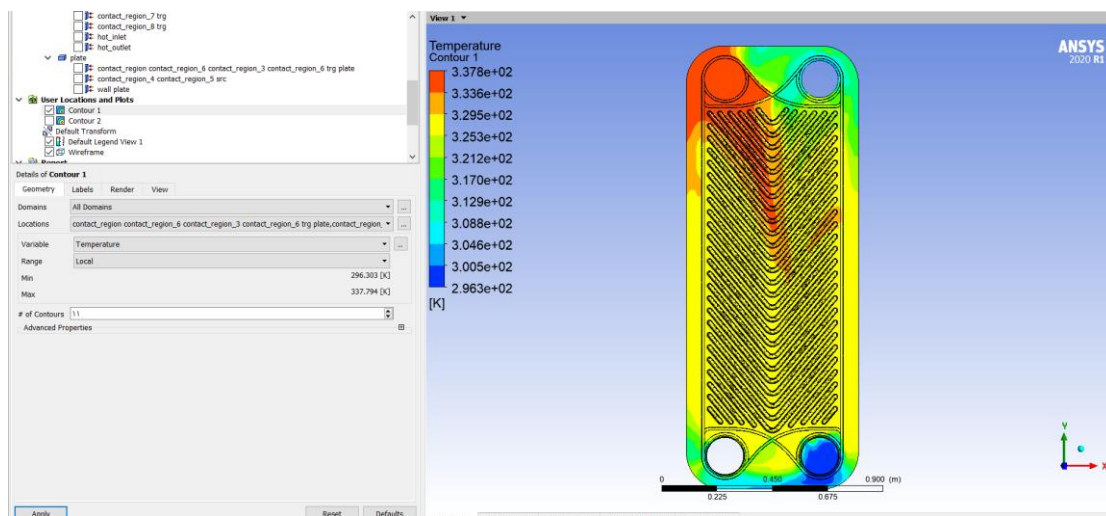
وبعد ضبط الشروط الابتدائية stander intelizaion تم إجراء الحل عند عدد 200 iteration والحصول على النتائج التالية:

جدول (6) توصيف النمذجة العددية المستخدمة في الحل على برنامج Ansys:

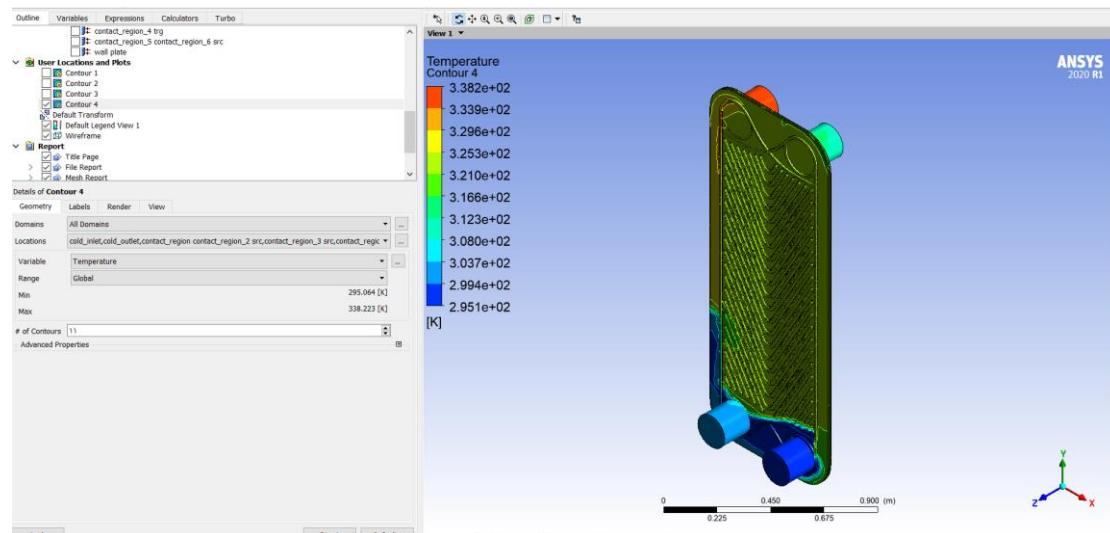
steady-state	نوع المسألة
pressure based	نوع الحل
Tetrahedrons / 845249	هيكل الشبكة / عدد عناصر الشبكة
k-epsilon-reazible	نموذج الجريان
energy	نموذج انتقال الحرارة
couple	خوارزمية الحل
stander intelizaion	الشروط الابتدائية



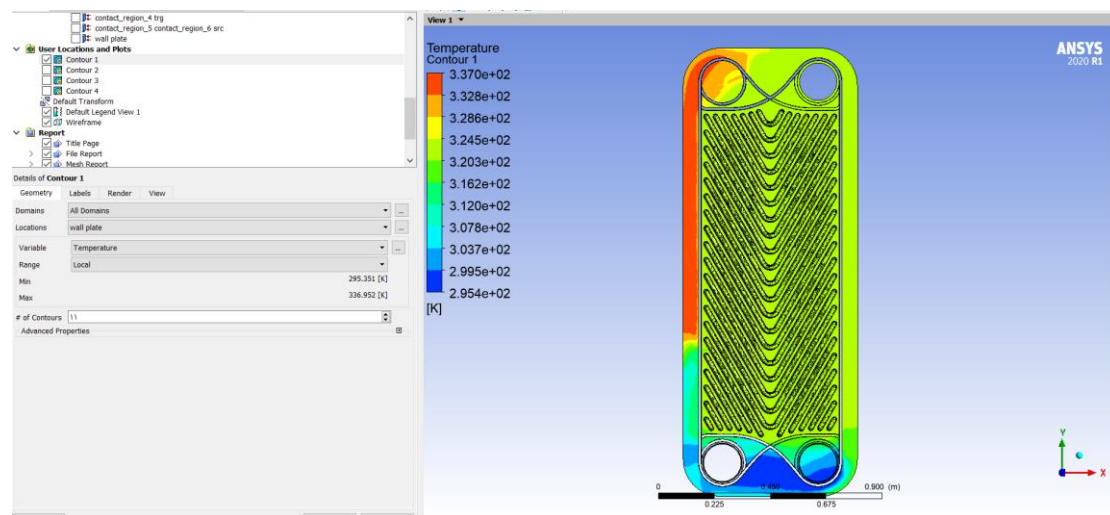
شكل (68) توزيع الحرارة على كامل المبادل بزاوية 50



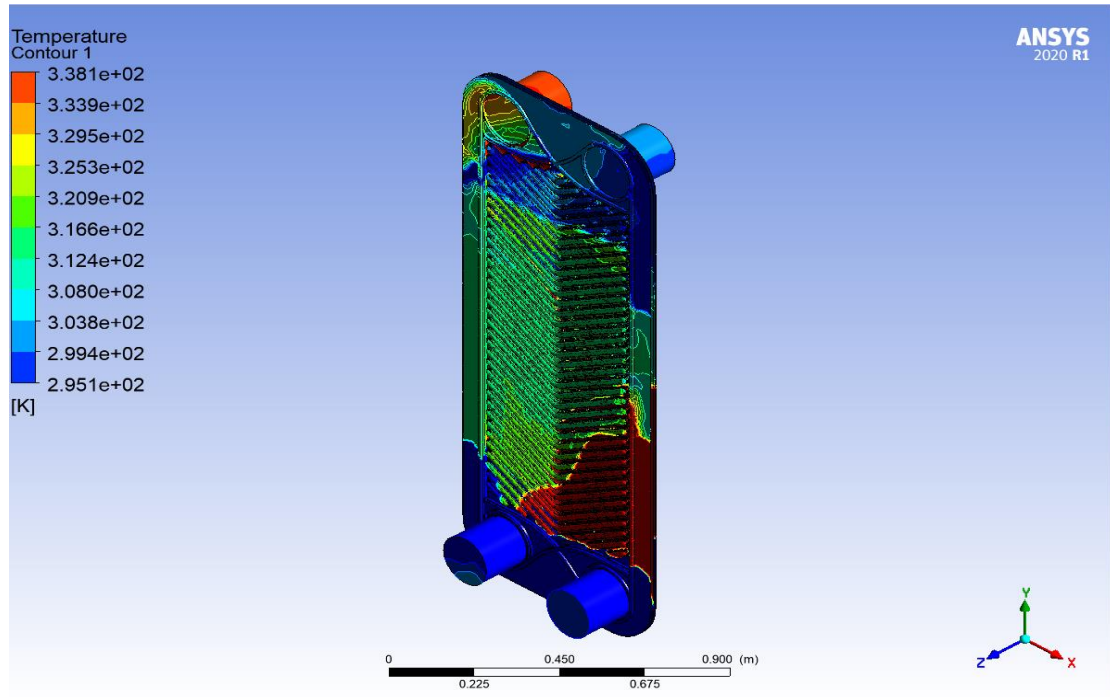
شكل (69) توزيع الحرارة على الصفيحة الوسطى للزاوية 50



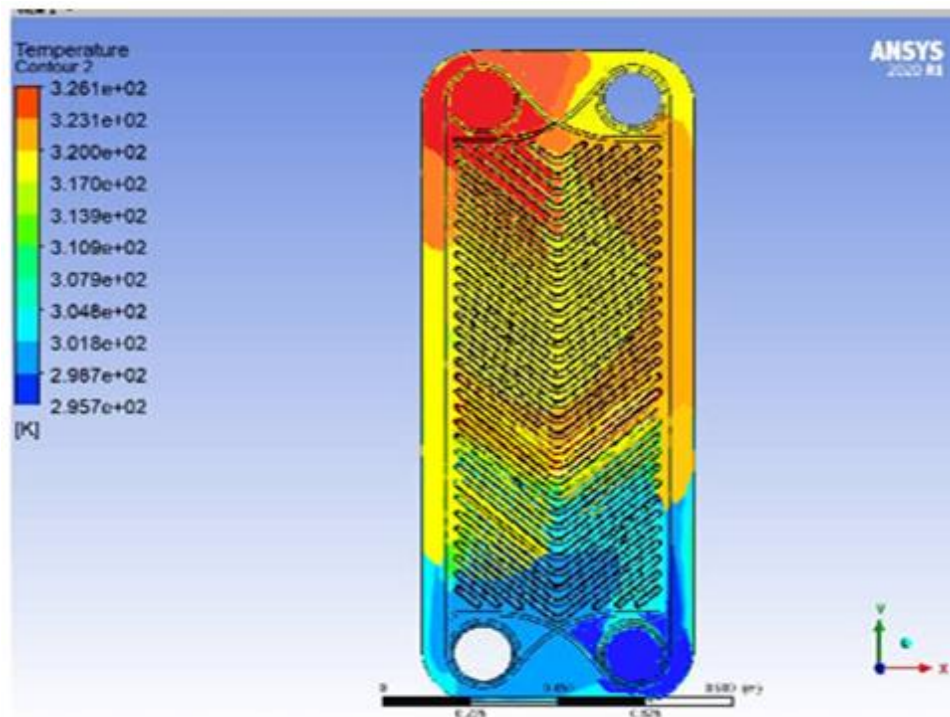
شكل (70) توزيع الحرارة على كامل المبادل بزاوية 60



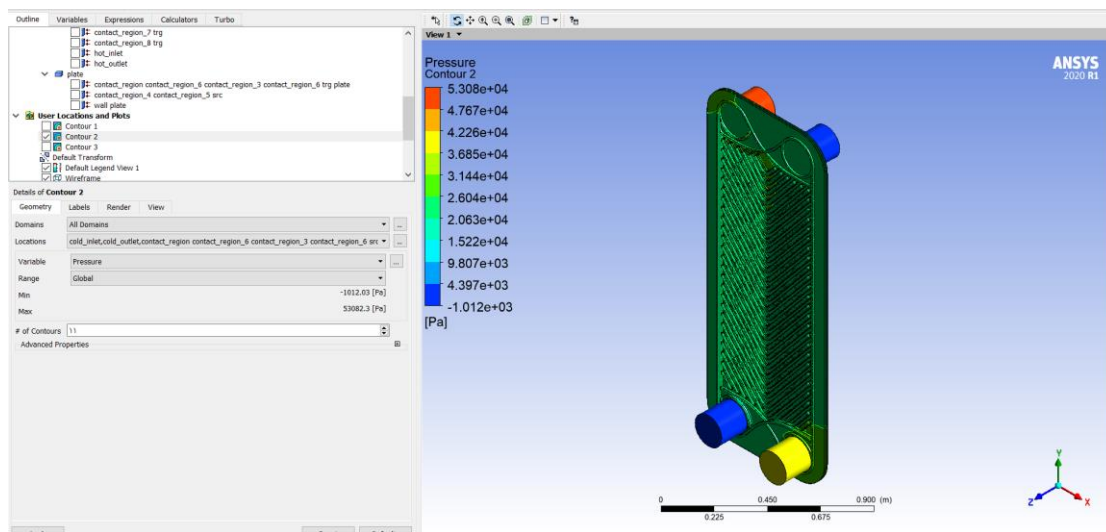
شكل (71) توزيع الحرارة على الصفیحة الوسطی بزاوية 60



شكل (72) توزيع الحرارة على كامل المبادل بزاوية 30

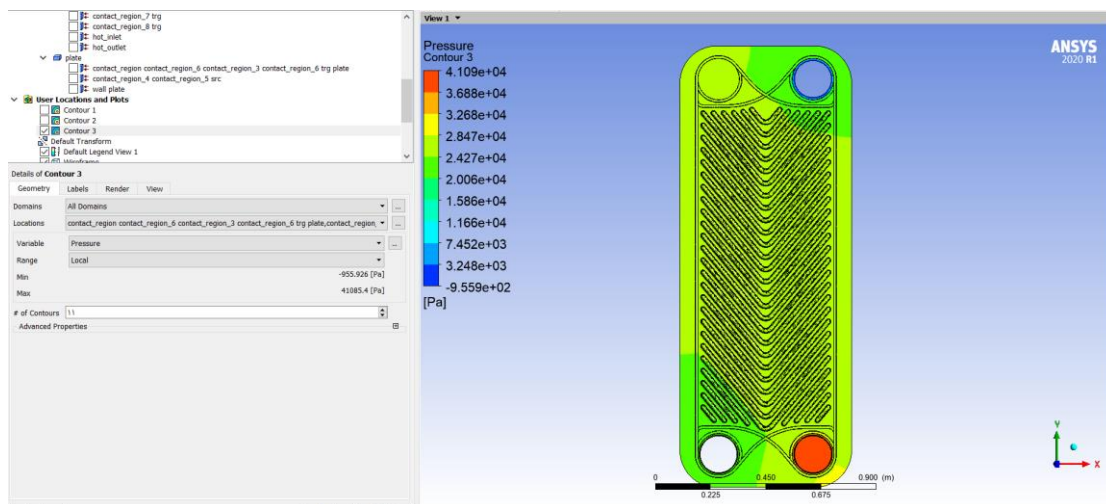


شكل (73) توزيع الحرارة على الصفیحة الوسطی بزاوية 30

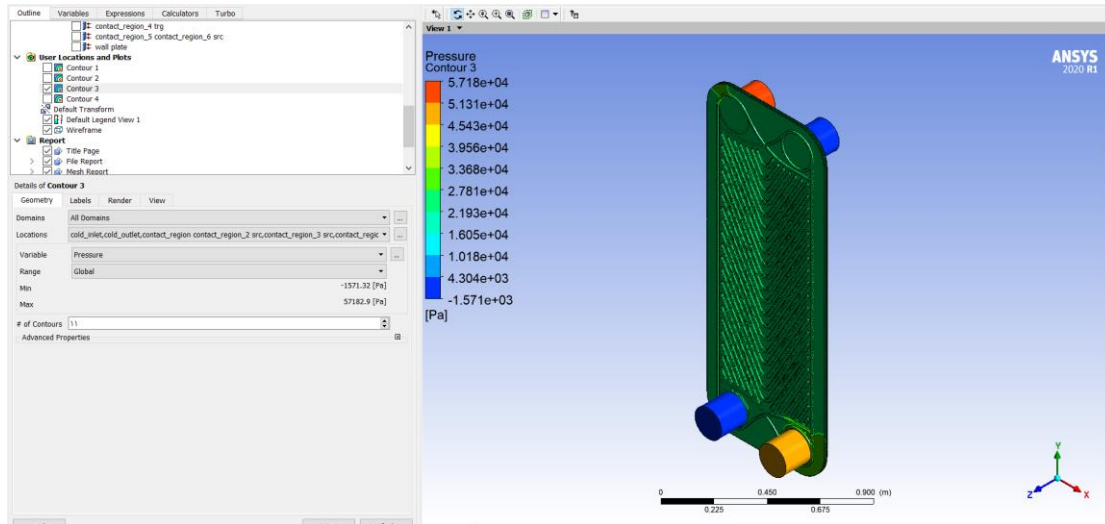


شكل (74) توزيع الضغط على المبادل بزواوية 50

- بلغ قيمة هبوط الضغط على المبادل بزواوية 50 0.52 bar

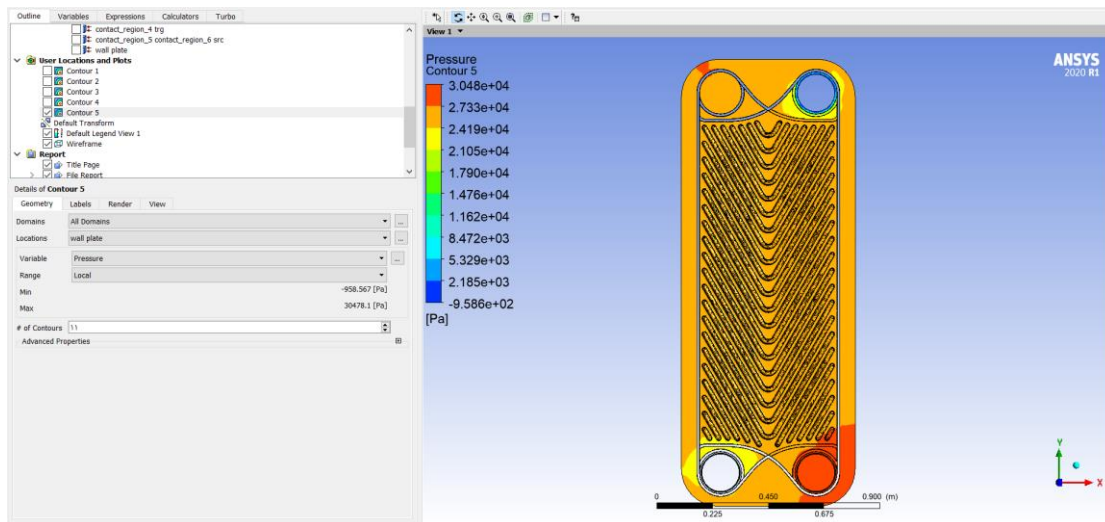


شكل (75) توزيع الضغط على الصفیحة الوسطی بزواوية 50

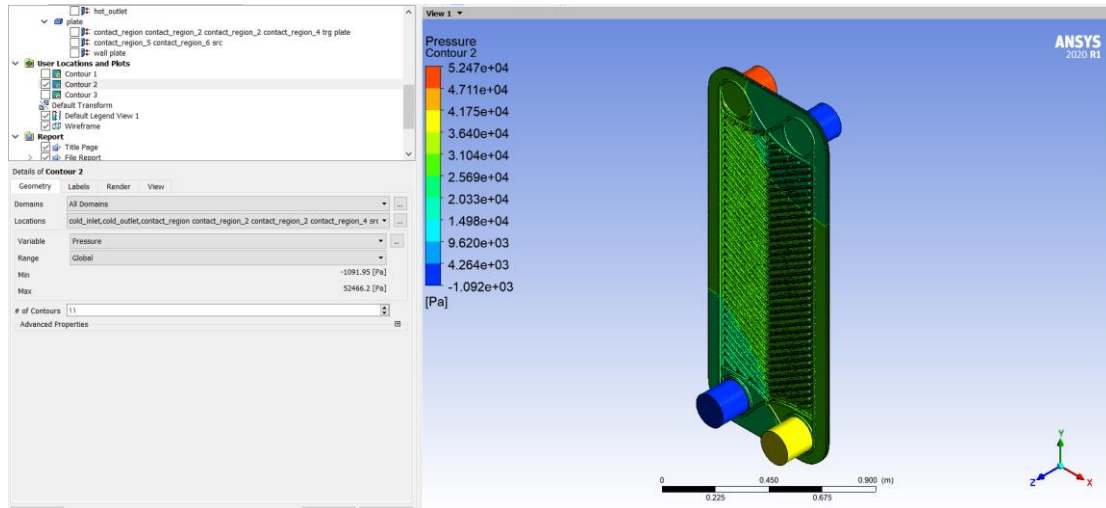


شكل (76) توزيع الضغط على كامل المبادل بزاوية 60

- بلغ قيمة هبوط الضغط على كامل المبادل بزاوية 60 0.55 bar

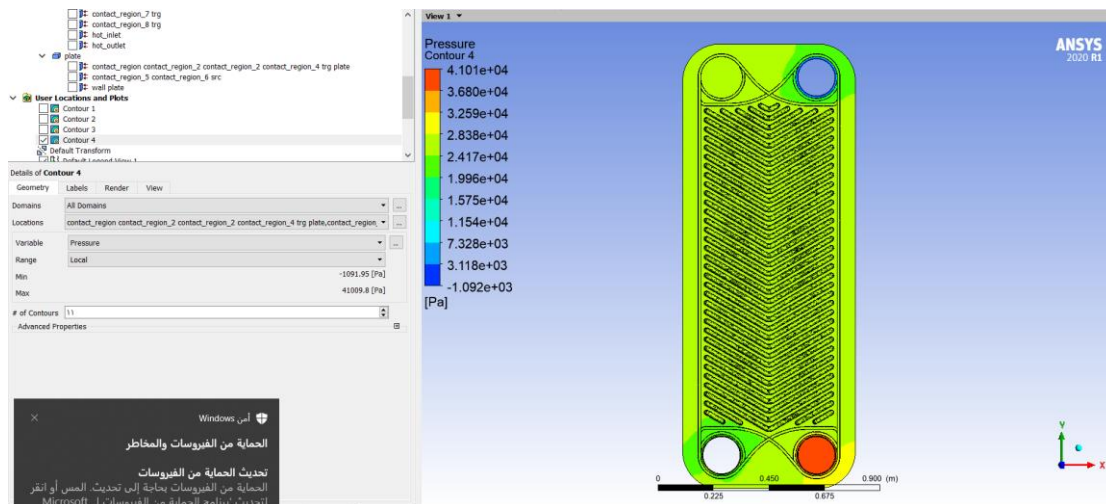


شكل (77) توزيع الضغط على الصفیحة الوسطی بزاوية 60



شكل (78) توزيع الضغط على كامل المبادل بزاوية 30

- بلغ قيمة هبوط الضغط على المبادل بزاوية 30 0.51 bar



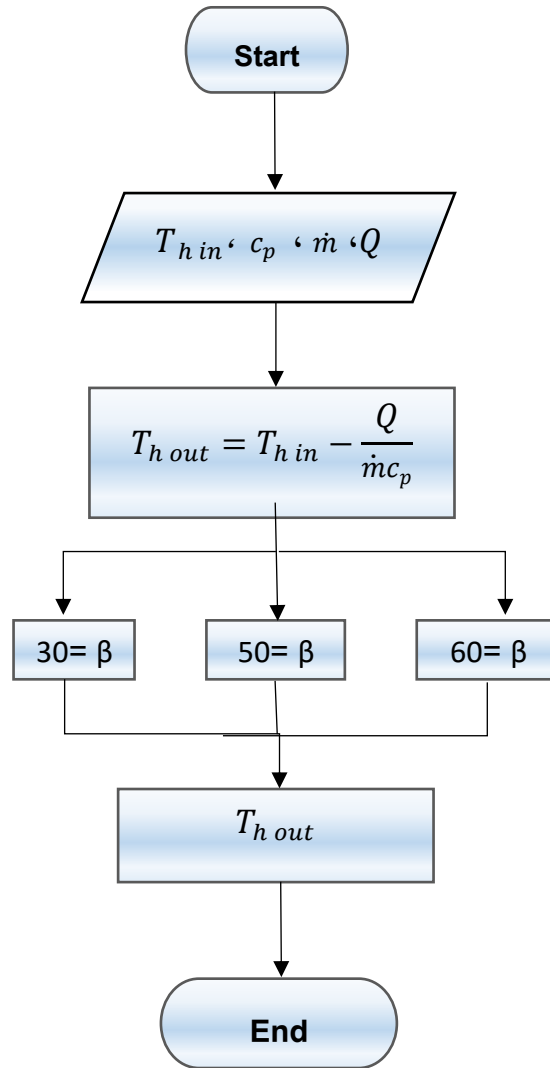
شكل (79) توزيع الضغط على الصفیحة الوسطی بزاوية 30

جدول (7) نتائج الاختبار الحاسوبي:

	مبادل β =30	مبادل β =50	مبادل β =60
درجة حرارة دخول الماء الساخن	65 C°		
درجة حرارة دخول الماء البارد	22 C°		
تدفق الماء الساخن عبر القناة	2.6 kg/s		
تدفق الماء البارد عبر القناة	2.6 kg/s		
النتائج			
درجة حرارة خروج الماء الساخن	42 C°	37 C°	30 C°
درجة حرارة خروج الماء البارد	33 C°	40 C°	45 C°
انخفاض الضغط	bar 0.51	bar 0.52	bar 0.55

- من الاختبار الحاسوبي لتوزيع الحرارة على الصفائح الثلاث حصلنا على أعلى توزيع عند الصفيحة ذات زاوية التمرج 60 وكما أن انخفاض الضغط كان أعلى قيمة عندها من باقي الزوايا وهذا ما نتج عن الدراسة العددية للمبادل الكامل.

إيجاد درجة حرارة خروج الماء الساخن من المبادل تحليليا:



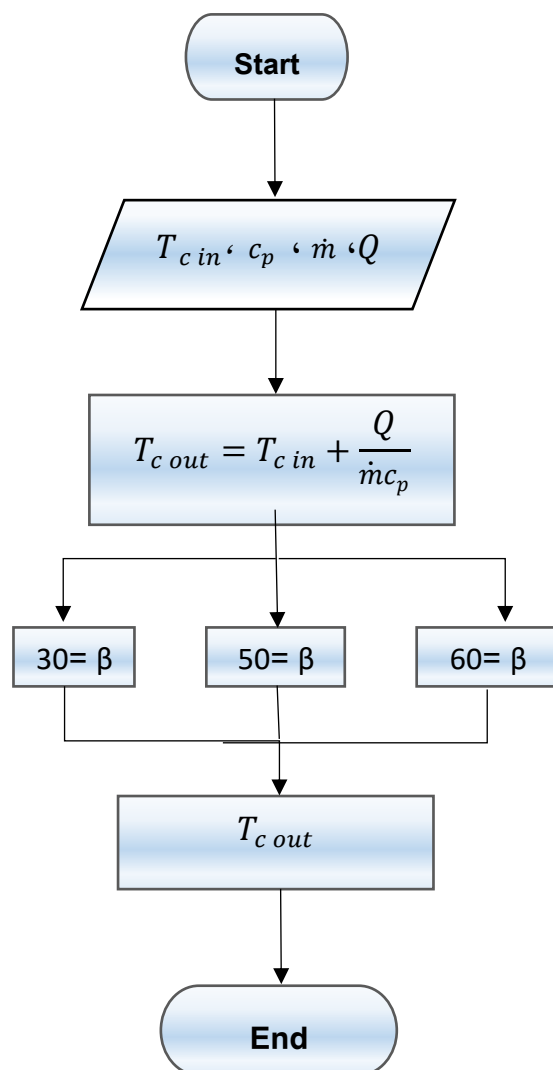
شكل (80) المخطط الصندوقي لحساب درجة حرارة خروج الماء الساخن

جدول (8) نسبة الخطأ لدرجة حرارة خروج الماء الساخن من المبادل

زاوية التموج للصفحة	درجة حرارة خروج الماء الساخن من المبادل		نسبة الخطأ
	حاسوبيا (Ansys)	تحليليا	
$30 = \beta$	42 C°	46 C°	8%
$50 = \beta$	37 C°	41 C°	9%
$60 = \beta$	30 C°	33 C°	9%

- نلاحظ ان نسبة الخطأ لا تتجاوز 9% مما يدل على تطابق النتائج التحليلية مع نتائج النمذجة الحاسوبية على برنامج Ansys .

إيجاد درجة حرارة خروج الماء البارد من المبادل تحليليا:



شكل (81) المخطط الصندوقي لحساب درجة حرارة خروج الماء البارد

جدول (9) نسبة الخطأ لدرجة حرارة خروج الماء البارد من المبادل:

زاوية التمرج للصفحة	درجة حرارة خروج الماء البارد من المبادل		نسبة الخطأ
	حاسوبيا (Ansys)	تحليليا	
$30 = \beta$	33 C°	30.5 C°	8%
$50 = \beta$	40 C°	36.5 C°	9%
$60 = \beta$	45 C°	41 C°	9%

- نلاحظ ان نسبة الخطأ لا تتجاوز 9% مما يدل على تطابق النتائج التحليلية مع نتائج النمذجة الحاسوبية على برنامج Ansys .

النتائج:

- 1- أهمية اختيار المعدن المدروس للحالة المطلوبة للمبادل الحراري وسماكة الصفيحة للحصول على أعلى فعالية حرارية.
- 2- تلعب سماكة الصفائح دوراً مهماً في ارتفاع أداء المبادل الحراري، ولكن يجب الأخذ بعين الاعتبار ضغط المائع المتدفق خلال الممرات.
- 3- عند اختيار المبادل الحراري يجب الموازنة بين فعالية الأداء الحراري وهبوط الضغط خلال المبادل.
- 4- تمكن المخططات السابقة من اختيار المبادل الحراري عند عدد صفائح معين فعالية المبادل وهبوط الضغط خلاله وعند سماكات مختلفة.
- 5- إن استخدام زاوية تموج عند زاوية ($\beta = 50$) مناسب حيث فعالية المبادل تصل وسطياً لأكثر من 80 % عند عدد صفائح 100 .
- 6- إن زيادة عدد الممرات يسهم في حل مشكلة انخفاض الغزارة، لما له من أثر في رفع عدد رينولدز دون التسبب في أي عبء أو تكاليف إضافية.
- 7- إن انخفاض الغزارة في القناة يؤثر في طبيعة الجريان، مما يتسبب في انخفاض عدد رينولدز الأمر الذي ينعكس سلباً على فعالية المبادل الحراري.
- 8- تصبح الزيادة في عدد الممرات غير مجدية عندما يزيد انخفاض الضغط عن الحد المسموح به.
- 9- نلاحظ أن نسبة الخطأ لا تتجاوز 9% مما يدل على تطابق النتائج التحليلية مع نتائج النمذجة الحاسوبية على برنامج Ansys .

التوصيات:

- نوصي بدراسة أثر عمق الموجة في أداء المبادل الحراري الصفائحي لما لها من أثر في الفعالية وانخفاض الضغط.
- نوصي بإجراء اختبار حاسوبي على مبادل صفائحي متعدد الممرات.

- [1] Sclünder, E. U. et al., Eds., Heat Exchanger Design Handbook, Hemisphere, Washington, DC, 1988
- [2] Shah, R. K., Classification of heat exchangers, in Heat Exchangers—Thermo-Hydraulic Fundamentals and Design, Kakaç, S., Bergles, A. E., and Mayinger, F., Eds., John Wiley & Sons, New York, 1981
- [3] M.K. Bassiouny, H. Martin, Flow distribution and pressure drop in plate heat exchangers—I, U-type arrangement, Chem. Eng. Sci. 39 (4) (1984) 693–700
- [4] B.P. Rao, P.K. Kumar, S.K. Das, Effect of flow distribution to the channels on the thermal performance of a plate heat exchanger, Chem. Eng. Process. 41 (2002) 49–58
- [5] Muley A. Heat transfer and pressure drop in plate heat exchangers [Ph.D. Dept Mechanical Industrial and Nuclear Engineering, Div Graduate thesis]. Studies an Research, University Of Cincinnati; 1997
- [6] R. K. Shah, A. S. Wanniarachchi, Plate heat exchanger design theory, in: J.M. Buchlin (Ed.), Industrial Heat Exchangers, von Karman Institute Lecture Series, (1991).
- [7] W. M. Kays, A. L. London, Compact heat exchangers, 3rd ed., Krieger Publ. Co., Florida, USA, (1998).
- [8] H. Martin, A theoretical approach to predict the performance of chevron-type plate heat exchangers, Chem. Eng. Proc. 35 (1996) 301–310.
- [9] Naik, Vishal R., Matawala, V. K. 2013, ‘Expermental Investigation of Single Phase Chevron Type Heat Exchanger’, International Journal of Engineering and Advanced Technology, Vol. 2, Issue 4, pp 2249–8958
- [10] Masubuchi, M.; Ito, A., “Dynamic Analysis of a Plate Heat Exchanger System”, Bulletin of the JSME, v.20, n.142, pp.434–441, April 1977

- [10] W. W. Focke, J. Zachariades, I. Olivier, The effect of the corrugation inclination angle on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers, *Int. J. Heat mass transfer* 28 (1985) 1469–1497.
- [11] H. Heavner, R. L. Kumar, A. S. Wanniarachchi, Performance of an industrial plate heat exchanger: Effect of chevron angle, in: *AIChE Symposium Ser. Heat transfer*, Am. Inst. Chem. Eng. Atlanta, GA, (1993).
- [12] Aydın D, Hüseyin D, B, İrfan K, Hasan G. Investigation of heat transfer and pressure drop in plate heat exchangers having different surface profiles. *Int J Heat Mass Transf* 2009;52:1451–7.
- [13] Marjan Goodarzi, et al. Investigation of heat transfer and pressure drop of a counter flow corrugated plate heat exchanger using MWCNT based nanofluids. *Int Commun Heat Mass Transf* 2015;66:172–9.
- [14] B.P. Rao, S.K. Das, An experimental study on the influence of flow maldistribution on the pressure drop across a plate heat exchanger, *ASME J. Fluid Eng.* 126 (2004) 680–691.
- [15] Shah, R.K.; Focke, W.W., “Plate Heat Exchangers and their Design Theory”, in: Shah, R.K.; Subbarao, E.C.; Mashelkar, R.A., Editors, “Heat Transfer Equipment Design”, pp.227–254, Hemisphere P.C., New York, 1988.
- [16] Zaleski, T., “A General Mathematical–Model of Parallel–Flow, Multichannel Heat–Exchangers and Analysis of its Properties”, *Chemical Engng Science*, v.39, n.7/8, pp.1251–1260, 1984.
- [17] Pignotti, A.; Tamborenea, P.I., “Thermal Effectiveness of Multipass Plate Exchangers”, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, v.31, n.10, pp.1983–1991, Oct. 1988.

- [18] Saunders, E. A. D., Heat Exchangers—Selection, Design, and Construction, John Wiley & Sons, New York, 1988; Kumar, H., Inst. Chem. Symp. Series, No. 86, 1275–1286, 1984
- [19] Kandlikar, S.G.; Shah, R.K., “Asymptotic Effectiveness–NTU Formulas for Multipass Plate Heat Exchangers”, ASME Journal of Heat Transfer, v.111, pp.314–321, 1989b
- [20] Zaleski, T., “A General Mathematical–Model of Parallel–Flow, Multichannel Heat–Exchangers and Analysis of its Properties”, Chemical Engng Science, v.39, n.7/8, pp.1251–1260, 1984.
- [21] Muley, A., Manglik, R. M. and Metwally, H. M. 1999. "Enhanced Heat Transfer Characteristics of Viscous Liquid Flows in a Chevron Plate Heat Exchanger," Journal of Heat Transfer, Vol. 121, p. 1011–1017.
- [22] Foote, M. R. 1967. "Effective Mean Temperature Difference in Multi–Pass Plate Heat Exchangers," Nat. Eng. Lab., U.K., Report No. 303.
- [23] Raju, K. S. N. and Jagdish, C. B., Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers, Hemisphere, Washington, DC, 1983. With permission

[24] الكتب:

د. نديم مخيبر. (2012). انتقال الحرارة. منشورات جامعة دمشق كلية الهندسة
الميكانيكية والكهربائية، ص 434

Abstract

Research background:

Designing a multi-pass plate heat exchanger according to an algorithm based on the optimal exchange surface area (at three values of the corrugation angle β of the plate) and studying the effect of some engineering variables on the efficiency of the heat exchanger and pressure drop, and conducting a computer test on the Ansys program. Where (two fluid bodies and one plate) were considered as a complete heat exchanger using water as the working fluid, at three values of the ripple angle β (60° – 50° – 30°).

Aim of the study:

Multi-pass plate heat exchanger design.

Scientific Results:

The Multi-Pass Plate Heat Exchanger is suitable for resolving flow misdistribution and improving heat exchanger performance while keeping start-up and operating costs low.

Key Words:

Plate heat exchanger - multi-pass - corrugation angle

Syrian Arab Republic

Damascus university

College of Mechanical and Electrical Engineering

Department of General Mechanics (Thermal Engineering)



Design and Experimental Test of A multi-passages

Plate Heat Exchanger

By

Marah MalAllah

Supervisor

Prof. Dr. Eng : Nasr Yassin

2023