

إهداء

الحمد لله وكفى والصلاة على الحبيب المصطفى وأهله الحمد الله الذي وفقني لتثمين هذه الخطوة في مسيرتي الدراسية لمذكرتي هذه ثمرة جهدي ونجاحي بفضلته تعالى.

إلى من أفضلها على نفسي وضحت من أجلي، ولم تدخر جهدا في سبيل إسعادي على الدوام أُمي الحبيبة تنير دروب حياتي، ويبقى من يسيطر على أذهاننا في كل مسلك نسلكه صاحب الوجه الطيب والأفعال الحسنة، فلم يبخل علينا طليحة حياته والذي الغالي العزيز وروح حياتي في هذه الدنيا أطال الله في عمره، إلى أخواتي (صفاء، شيماء، قطر الندى، أميرة زينب، حنين) وأخي حبيب قلبي (عبد القهار)

إلى رفيق الدرب الذي لم يبخل عليا يوما وكان له دور في حياتي وأكن لك كل الأحرار والتقدير (عبد العالي محمد فارس)

إلى جميع من وقفوا بجواري وساعدوني بكل ما يملكون وفي أصعدة كثيرة خاصة صديقتي حياتي (نتاري الزهره)

إلى كل قسم علوم المادة وفيزياء طاقوية وطاقات متجددة وجميع دفعة 2022م

إلى كل من كان لهم أثر على حياتي وإلى من أحبهم قلبي ونسهم قلبي

عفراء

إهداء

أهدي ثمرة جهدي وخلاصة عملي إلى حكمتي وعلمي إلى أدبي...
وحلمي، إلى ينبوع الصبر والتفاؤل و الأمل إلى كل من في الوجود
بعد الله عزوجل إلى أمي وأبي الغاليين
إلى الذين تقاسموا معي عبء الحياة وفرحتها إخواني
وإلى سلطان العائلة أخي حبيبي ورفيق دربي سيف الدين إلى
صديقتي الغالية رباب حفظها الله إلى من لم يبخل علي
بالدعاء يوما إلى من تذوقت معهم أجمل اللحظات إلى من
سأفتقدهم وأتمنى أن يفقدوني
إلى رفيقات دربي في مشواري الجامعي (رباب-عفراء)، إلى كل
من ساهم في هذا الإنجاز إلى كل من علمني حرفا.
أساتذتي الكرماء إلى كل الأصدقاء الذين نسهم القلم وحفظهما القلب.

الزهرة

كلمة شكر

نشكر الله ونحمده حمدا كثيرا مباركا على هذه النعمة الطيبة والنافعة نعمة العلم والبصيرة.

لا بد لنا ونحن نخطو خطواتنا الأخيرة في الحياة الجامعية من وقفة نعود إلى أعوام قضيناها في رحاب الجامعة مع أساتذتنا الكرام الذين قدموا لنا الكثير باذلين بذلك جهودا كبيرة في بناء جيل الغد لتبعث ... الأمة من جديد

كن عالما .. فإن لم تستطع فكن متعلما ، فإن لم تستطع فأحب العلماء ، فإن لم تستطع فلا تبغضهم"
وقبل أن نمضي نقدم أسمى آيات الشكر الجزيل والامتنان والثناء الخالص والتقدير، إلى نبع العون إلى من وجهنا دون وهن إلى أستاذنا الفاضل المشرف محمد تخة الذي نقول له بـشُراك قول رسول الله
صلى الله عليه وسلم:

إن الحوت في البحر ، والطير في السماء ، ليصلون على مُعَلِّم الناس الخير"

إلى الذين مهدوا لنا طريق كما يشرفنا أن نتقدم بالشكر الجزيل إلى الذين حملوا أقدس رسالة في الحياة
.....العلم إلى جميع أساتذتنا الأفاضل

وكذلك نشكر كل من ساعد على إتمام هذا البحث وقدم لنا العون ومد لنا يد المساعدة وزودنا

بالمعلومات اللازمة لإتمام هذا البحث كل مسؤولي المنخر و العاملين به ونخص بالذكر

الأستاذ حوتي محمد

إلى من زرعوا التفاؤل في دربنا وقدموا لنا المساعدات والتسهيلات والأفكار والمعلومات فلهم منا كل

الشكر

الملخص

في مجال دراسة المبادل الحراري المتقاطع تم اقتراح نماذج شبه رياضية لضبط ومعايرة سرعة الهواء بالنسبة لصمام الخنق، وضبط العلاقة بين الضياع في الضغط الشاقولي والضياع الأفقي في المبادل، وتم في هذه الدراسة إيجاد سرعة التشغيل المناسبة لانضغاط وتخلخل مستقر في جسم المبادل الحراري. واكتملت الدراسة بإيجاد نماذج شبه تجريبية لانتقال الحرارة بالتبريد لكل عمود على حدى، ومقارنتها بنموذج مقترح من طرف الباحث zukauskas سنة 1987 لاختبار صدقية النموذج المقترح.

الكلمات المفتاحية: مبادل حراري. متقاطع. انتقال الحرارة. حمل حراري. تبريد. سرعة. ضغط شاقولي. ضغط أفقي.

Summary

In the field of cross-exchanger study, semi-mathematical models were proposed to control and calibrate the air velocity in relation to the throttle valve, and to adjust the relationship between the loss in vertical pressure and the horizontal loss in the exchanger. The study was completed by finding quasi-experimental models for cooling heat transfer for each column separately, and comparing them with a model proposed by researcher Zukauskas in 1987 to test the validity of the proposed model.

Keywords: heat exchanger. Cross. Heat transfer. Heat load. Cooling. Speed. Vertical pressure. Horizontal pressure.

فهرس العناوين

I	إهداء.....
II	تشكرات.....
IV	ملخص.....
V	فهرس العناوين.....
VIII	فهرس الأشكال.....
X	فهرس الجداول.....
XI	قائمة الرموز والمصطلحات.....
1	المقدمة العامة.....

الفصل الأول:

4	1) مقدمة.....
4	2) تركيب المبادلات الحرارية (CONSTRUCTION OF HEAT EXCHANGERS).....
5	3) تصنيف المبادلات الحرارية (CLASSIFICATION OF HEAT EXCHANGERS).....
5	1-3) التصنيف حسب التركيب (Classification according to construction):
6	2-1-3) المبادلات الحرارية الأنبوبية (Tubular heat exchangers).....
16	2-3) التصنيف وفقاً لعملية التحويل (transfer processes).....
17	1-2-3) الحرارة الملامسة غير المباشرة.....
17	2-2-3) التحويل المباشر.....
17	3-3) التصنيف حسب السطح (degrees of surface compactness).....
18	4-3) التصنيف حسب ترتيب التدفق (flow arrangements).....
18	1-4-3) المبادل الحراري المتوازي (Parallel flow exchanger).....
19	2-4-3) المبادل الحراري المتعكس (Counter flow exchanger).....
20	3-4-3) المبادل الحراري المتقاطع (Cross flow exchanger).....
20	5-3) التصنيف وفقاً لترتيبات المرور (pass arrangements).....
20	1-5-3) مبادلات متعددة المسارات Multipass.....
21	6-3) التصنيف حسب طور الموائع (phase of the process fluids).....
22	7-3) التصنيف وفقاً لتغيرات نقل الحرارة (heat transfer mechanisms).....
22	1-7-3) المكثفات.....
22	2-7-3) المبخرات.....

الفصل الثاني: دراسة نظرية حول المبادل الحراري

25	.....(1) مقدمة
25	.....(2) الظواهر الفيزيائية الأساسية في المبادل الحراري
25	.....(1-2) انتقال الحرارة
25	.....(2-2) أشكال انتقال الحرارة
25	.....(1-2-2) التوصيل الحراري (الانتشار الحراري)
26	.....(2-2-2) الحمل الحراري
27	.....(3-2-2) الإشعاع الحراري
27	.....(3-2-2) التدفق الكتلي للمائع
28	.....(4-2-2) درجات الحرارة المتوسطة للمبادل الحراري
28	.....(5-2-2) السعة الحرارية للمائع C
28	.....(6-2-2) السعة الحرارية النوعية الكتلية للمائع c
28	.....(7-2-2) السعة الحرارية في ثبوت الضغط للمائع C_p
29	.....(8-2-2) انتقال الحرارة وميزان الطاقة والكفاءة
29	.....(9-2-2) معامل الكفاءة الطاقوية C_{EB} (The Energy balance coefficient)
30	.....(10-2-2) الكفاءة المتوسطة
30	.....(11-2-2) الفرق اللوغاريتمي في درجة الحرارة
30	.....(12-2-2) معامل انتقال الحرارة U
30	.....(3-2) انتقال الحرارة حول مجموعة من الأنابيب داخل نفق مربع المقطع
31	.....(1-3-2) معادلة برنولي
32	.....(2-3-2) أنبوب بيتو
33	.....(3-3-2) حساب الكتلة الحجمية للهواء وسرعة الهواء
34	.....(4-3-2) حساب السرعة المتوسطة حول القطعة في حالة وجود جميع القطع
34	.....(5-3-2) حساب معدلات التبريد بوجود قطعة واحدة
36	.....(6-3-2) النمذجة اللابعدية لانتقال الحرارة بالحمل القسري حول أسطوانة أفقية
38	.....(4-2) إنتقال الحرارة عبر البنوك الأنبوبية

الفصل الثالث:

42	1) مقدمة الفصل الثالث.....
42	2) النماذج الأولية للأجهزة التجريبية.....
42	3) مبدأ العمل الجهاز.....
42	4) أجهزة القياس المستعملة في التجارب.....
42	1-4) الوحدة الأساسية للمراقبة و القياس.....
43	2-4) مجموعة الأنابيب تحوي قطع أسطوانية من الألمنيوم.....
43	3-4) جهاز قياس درجة الحرارة(المزدوجات الحرارية-Thermocouples).....
44	5) طريقة عرض القياسات على الشاشة.....
44	6) الأدوات المستعملة في التجارب.....
46	7) التجارب.....
74	1-7) التجربة الأولى : حساب الضغط وسرعة الهواء حول مجموعة من الأنابيب.....
47	2-7) التجربة الثانية : توزيع السرعة حول مجموعة من الأنابيب.....
49	3-7) التجربة الثالثة : التحقق من معدلات التبريد.....

الفصل الرابع:

53	1) مقدمة الفصل الرابع.....
53	2) التجربة الأولى: معايرة السرعة والضغط في المبادل الحراري.....
53	1-2) حساب وسرعة الهواء حول مجموعة من الأنابيب.....
55	2-2) حساب التغير في الضغط حول مجموعة من الأنابيب.....
56	3) التجربة الثانية: دراسة مظهر السرعة ومناطق الانضغاط والتخلخل.....
56	1-3) توزيع السرعة حول مجموعة من الأنابيب.....
58	3) التجربة الثالثة: دراسة معدلات التبريد الحراري في المبادل الحراري.....
59	1-3) التحقق من معدلات التبريد.....

الخاتمة العامة

63	النتائج.....
64	التوصيات.....
65	المراجع

فهرس الأشكال

الفصل الأول:

5	..... تصنيف المبادلات الحرارية	الشكل (1-1)
7	(Double pipe/hairpin heat exchanger) نموذج لمبادل حراري أنبوبي (دبوس الشعر)	الشكل (1-2)
8	..... (shell and tube heat exchangers) نموذج لمبادل حراري أنبوبي	الشكل (1-3)
10	.....(Plate-fin heat exchanger PFHE) مبادل حراري ذو زعانف مسطحة	الشكل (1-4)
11	.....(Plate heat exchanger -PHE) مبادل حراري لوشي	الشكل (1-5)
12	.....(SPHE Spiral plate heat exchanger-) مبادل حراري لولبي	الشكل (1-6)
13	.....(PCHEs- Printed circuit heat exchangers) المبادلات الحرارية للدائرة المطبوعة	الشكل (1-7)
14	.....(Lamella heat exchanger -LHE) مبادل حراري لامبلا	الشكل (1-8)
15	.....(Scraped surface heat exchanger) مبادل حراري للسطح المكشط	الشكل (1-9)
15	..... مبادل حراري ذو زعنفة	الشكل (1-10)
16	..... تصنيف المسترجعات	الشكل (1-11)
19	..... تصنيف المبادلات حسب التدفق	الشكل (1-12)
20	..... تصنيف المبادلات حسب التدفق	الشكل (1-13)
20	..... توزيع درجة الحرارة لترتيب التدفق العرضي المختلط وغير المختلط	الشكل (1-14)

الفصل الثاني:

31	..... رسم تخطيطي لأبعاد المبادل الحراري المتقاطع الخاصة بالتجربة	الشكل (2-1)
32	..... أنبوب بيتو	الشكل (2-2)
39	..... ترتيبان للبنوك الأنبوبية. ترتيب محاذي أو محاذي على اليسار والترتيب المتعرج على اليمين	الشكل (2-3)

الفصل الثالث:

43	..... جهاز يحمل رقم TE93 الخاص بالانتقال الحراري المتقاطع بالحمل القصري	الشكل (3-1)
44	..... رسم تخطيطي لأبعاد المبادل الحراري المتقاطع الخاصة بالتجربة	الشكل (3-2)
45	..... رسم تخطيطي لأبعاد قطعة النحاس (Total mass of copper part of the rod)	الشكل (3-3)
45	..... مقياس صمام الهواء في المروحة	الشكل (3-4)
46	..... الواجهة الألكترونية (VDAS)	الشكل (3-5)
46	..... جهاز VDAS-B	الشكل (3-6)
48	..... جهاز بيتو وطريقة تحريكه من الأعلى إلى الأسفل	الشكل (3-7)
49	..... رسم تخطيطي يوضح التوصيلات الأساسية لأنابيب الضغط	الشكل (3-8)
50	..... يوضح تموضع جميع القضبان وضبط قضيب التسخين في موضع المنبع المركزي	الشكل (3-9)

الفصل الرابع:

53	.....(التجربة 01) بدلالة الصمام (الشكل (4-1): منحني تغيرات السرعة V بدلالة الصمام (التجربة 01).....	الشكل (4-1)
55	.....(التجربة 01) ΔP_2 بدلالة ΔP_1 في الضغط (الشكل (4-2): تغيرات الفرق في الضغط ΔP_1 بدلالة ΔP_2 (التجربة 01).....	الشكل (4-2)
56	.....(التجربة 02) y موضع جهاز بيتو (الشكل (4-3): منحني تغيرات V_{moy2} بدلالة y موضع جهاز بيتو (التجربة 02).....	الشكل (4-3)
57	.....(التجربة 2) بدلالة قيمة الصمام (الشكل (4-4): تغيرات السرعة العظمى V_{max} والسرعة الصغرى V_{min} بدلالة قيمة الصمام (التجربة 2).....	الشكل (4-4)
58	.....(التجربة 3) (الشكل (5-4): ترتيب الأعمدة والصفوف في المبادل الحراري المتقاطع (التجربة 3).....	الشكل (4-5)
59	.....(التجربة 3) 01 بالنسبة للعمود (الشكل (6-4): تغيرات $\ln(T_2 - T_1)$ بدلالة الزمن بالنسبة للعمود 01 (التجربة 3).....	الشكل (4-6)
60	.....(الشكل (4-7): منحني يوضح تغيرات $\ln(Nu)$ بدلالة $\ln(Re)$ (الشكل (4-7): منحني يوضح تغيرات $\ln(Nu)$ بدلالة $\ln(Re)$	الشكل (4-7)

فهرس الجداول

الفصل الثاني:

جدول (2-1) الترتيب المتدرج - قيم الثوابت في المعادلة (2-36)..... 39

الفصل الرابع:

جدول (4-1) جدول (4-1) : القيم الخاصة بالنموذج المستنتج لتغيرات السرعة V بدلالة الصمام 54

جدول (4-2) جدول (4-2) : قيم السرعة V بدلالة قيم الصمام (%) Valve باستخدام النموذج المستنتج 54

جدول (4-3) جدول (4-3) : القيم الخاصة بالنموذج المستنتج لتغيرات الفرق في الضغط ΔP_1 بدلالة ΔP_2 55

جدول (4-4) جدول (4-4) : قيم السرعة العظمى V_{max} و السرعة الصغرى V_{min} 57

جدول (4-5) جدول (5-4) : النماذج شبه تجريبية للتبريد الخاص بالمبادل الحراري (Nu خاص بالنموذج الأول - Nu' خاص بالنموذج الثاني) 61

قائمة الرموز والاصطلاحات

الرموز	الاصطلاحات (الرموز اللاتينية)	الوحدة
A	المساحة.....	m^2
a	معامل التبريد.....	-----
C_p	الحرارة النوعية.....	$J / (Kg. ^\circ C)$
C_{EB}	معامل الكفاءة الطاقوية.....	-----
D	نصف قطر الماسورة.....	m
g	تسارع الجاذبية الأرضية.....	m / s^2
h_x	معامل الانتقال الحراري الموضعي.....	$W/m^2 .K$
h	معامل الحمل الحراري.....	$W/m^2 .K$
K	معامل الانتقال الكتلي.....	m/s
L	طول الصفيحة المستوية.....	m
M	الانبعاثية الإشعاعية للسطح الباث.....	W/m^2
M	كتلة قطعة النحاس.....	Kg
\dot{m}	التدفق الكتلي.....	Kg/s
N_u	رقم نوسالت.....	---
P_{atm}	الضغط الجوي.....	Pa
P_d	الضغط السكوني المنخفض.....	Pa
P_r	رقم برانت.....	-----
P_t	الضغط الكلي.....	Pa
P_u	الضغط السكوني المرتفع.....	Pa
\dot{Q}	الحرارة المنتقلة.....	W
\dot{Q}_a	الحرارة الممتصة.....	W
\dot{Q}_e	الحرارة المعطاة.....	W
R	ثابت الغازات المثالية.....	$J/mol. K$

-	.....	رقم رينولدز	Re
m	.....	سمك طبقات الحدية التحريكية	S
mm	.....	سمك قطري	S_d
mm	.....	سمك خطي	S_l
mm	.....	سمك مروري	S_t
s	.....	الزمن	t
$^{\circ}C$	.....	درجة الحرارة	T
m/s	.....	السرعة	U
m/s	.....	السرعة القصوى	U_{max}
m/s	.....	السرعة	V
m^3/s	.....	التدفق الحجمي	\dot{V}
--	.....	رقم برانتل	Pr
m	.....	البعد الخاص بالسريان	X

الرموز الإغريقية

-	.....	معامل الانبعاث الإشعاعي للسطح الباث	ϵ
$W/m \cdot ^{\circ}C$	.....	التوصيلية الحرارية	λ
$Pa \cdot s$	.....	اللزوجة التحريكية	μ
Kg/m^3	.....	الكتلة الحجمية	ρ
$W/m^2 \cdot K^4$	.....	ثابت ستيفان-بولتزمان	σ
-	.....	كفاءة الدورة	η
-	.....	كفاءة المتوسطة	$\bar{\eta}$

الدليل السفلي

-	.....	الوسط البارد	a
-	.....	خاصة بجمرة الدورة الباردة	c
-	.....	الضغط المنخفض	D
-	.....	الوسط الساخن	e
-	.....	خاصة بجمرة الوسط الساخن	H
-	.....	الضغط الكلي	T

المقدمة العامة

المقدمة العامة

تعرف ميكانيك الموائع بأنها هي المواد القابلة للتشكل بشكل الأوعية التي تحتويها وتكون قادرة على السريان وهي المواد السائلة و الغازية، إن أهمية ميكانيك الموائع تتضح تماما عندما نفكر في الدور الذي تلعبه في حياتنا اليومية ففي مجال التكييف والتبريد هناك الماء المثلج يضح بواسطة المضخات خلال المواسير و الهواء البارد يدفع المراوح خلال المجاري الهواء لتكييف المنازل، والكهرباء التي نستخدمها وطرق توليدها من المساقاة التي تدفع الماء خلال التربينات والتي تولد الطاقة الكهربائية أو الطاقة الحرارية من البخار الذي يدفع التربينات البخارية لتوليد الطاقة الكهربائية. وسيارتنا التي نقودها والوقود تضخ عبر الأنابيب. ومقاومة الهواء تكون كاجحة للسيارة في مجملها، بل إن حياتنا شخصية تعتمد على ميكانيك المائع فدم الحياة الذي يجري في اوردتنا و شراييننا هو يخضع لميكانيك المائع.

هناك إشكالي في ضبط معدلات إنتقال الحرارة بين مائع ساخن والمائع البارد لذلك وجب وضع نماذج لتسهيل حساب هذه التدفقات.

والهدف الأساسي هو معرفة معدلات التبريد التي تحدث بسبب مرور الهواء بسرع مختلفة. ومنه يمكن حساب معامل إنتقال الحرارة بالحمل الذي بدوره يعطينا فكرة عن رقم نوسالت، ومن جهة أخرى يمكن حساب سرعة الهواء التي تعطينا فكرة عن قيمة رقم رينولدز، وفي الأخير يمكن ربط علاقة بين الرقمين بنموذج أسي، حيث أن رقم برانتل الخاص بالهواء يكون كعامل في النموذج .

منهج شبه تجريبي يعتمد على نماذج رياضية مقترحة (أسية) وسلسلة من التجارب لحساب العوامل والاسس في كل نموذج.

نظرا للضرورة الاقتصادية للمبدلات الحرارية وإستخدامها في الصناعة كان لابد من دراستها تجريبيا و نظريا لضبط إنتقال الحرارة المتبادلة بين مائعين البارد والساخن لمعرفة معدلات إنتقالها وذلك باستخدام نماذج شبه تجريبية إستخدامها المستعمل.

ومن أهم المبدلات الحرارية المستخدمة نجد أن المبدل الحراري ذو نظام متقاطع التدفق (Cross-flow system).

يكتسي أهمية كبيرة في الإستخدامات العادية في الأجهزة الحرارية كالمكيفات و مبردات المحركات.

يمكن إستنباط نماذج رياضية محققة بإستخدام تركيب لجهاز معين وهو عبارة عن أعمدة ألمنيوم، والمهم في هذه الدراسة كيف يتأثر الهواء بوجود هذه الأنابيب الأفقية وماهو شكل مظهر السرعة. والدراسة من الممكن أن تصل إلى تحسين تموضع هذه الأنابيب بشكل يجعل الهواء يتحرك باقل طاقة مع تبادل حراري أعظمي لتبريد المائع داخل الأنابيب.

تحتوي هذه المذكر إجمالاً على أربع فصول حيث نتطرق في البداية في الفصل الأول تصنيف المبادلات الحرارية بالتفصيل و بالرسومات لكل نوع من الأنواع المبدلات، أما في الفصل الثاني دراسة نظرية للمبادلات الحرارية، أما الفصل الثالث سنتطرق الى دراسة تجريبية لمبدل حراري متعامد حيث سنقوم بدراسة تجارب الإنتقال الحراري حول مجموعة من الأنابيب داخل نفق مربع المقطع. الدراسة والنتائج المحصل عليها من خلال سلاسل التجارب ومناقشتها، والفصل الرابع يهتم بالجانب التحليلي ويربط بين الشق النظري والتجريبي، وفي الأخير الخروج بملخصة عامة.

الفصل الأول

تصنيف المبادلات الحرارية

يحتوي هذا الفصل على مختلف التعريفات والتصنيفات الخاصة بالمبادلات الحرارية والمتمثلة في

- تركيب المبادلات الحرارية
- تصنيف المبادلات الحرارية

1 مقدمة الفصل:

المبادل الحراري عبارة عن وسيط لتبادل الحرارة يستخدم لنقل الطاقة الحرارية الداخلية بين مائعين أو أكثر متاحين في درجات حرارة مختلفة. في معظم المبادلات الحرارية، يتم فصل الموائع بواسطة سطح ناقل للحرارة. تُستخدم المبادلات الحرارية في الصناعة والطاقة، والبتزول، والنقل، وتكييف الهواء، والتبريد، واستعادة الحرارة، وغيرها من الصناعات. الأمثلة الشائعة للمبادلات الحرارية المألوفة لنا في الاستخدام اليومي هي مشعات السيارات، والمكثفات، والمبخرات، ومسخنات الهواء، ومبردات الزيت. يمكن تصنيف المبادلات الحرارية إلى عدة اصناف مختلفة وفق معايير معينة.

2 تركيب المبادلات الحرارية (CONSTRUCTION OF HEAT EXCHANGERS):

يتكون المبادل الحراري من عناصر التبادل الحراري مثل القلب أو المصفوفة التي تحتوي على سطح ناقل للحرارة، وعناصر توزيع الموائع مثل الرؤوس أو الخزانات، وفوهات المدخل والمخرج أو الأنابيب، وعادةً لا توجد أجزاء متحركة في المبادل. ومع ذلك، هناك استثناءات، مثل الدوار يتم دفع المصفوفة للدوران، حيث يدور عنصر دوار مع شفرات بشكل مستمر داخل أنبوب نقل الحرارة. يكون سطح نقل الحرارة على اتصال مباشر بالموائع التي تنتقل الحرارة من خلالها بالتوصيل. يسمى السطح الذي يفصل الموائع على أنه سطح الاتصال الأساسي أو المباشر. لزيادة مساحة نقل الحرارة، قد يتم ربط الأسطح الثانوية المعروفة باسم الزعانف بالسطح الأساسي. يوضح الشكل (1.1) مجموعة من أنواع قليلة من المبادلات الحرارية.

3 تصنيف المبادلات الحرارية (CLASSIFICATION OF HEAT EXCHANGERS)

بشكل عام تصنف المبادلات الحرارية الى معايير تتعلق بالشكل الهندسي و اخرى تتعلق بسريان الموائع.

(1) التركيب construction .

(2) عمليات التحويل الحراري transfer processes .

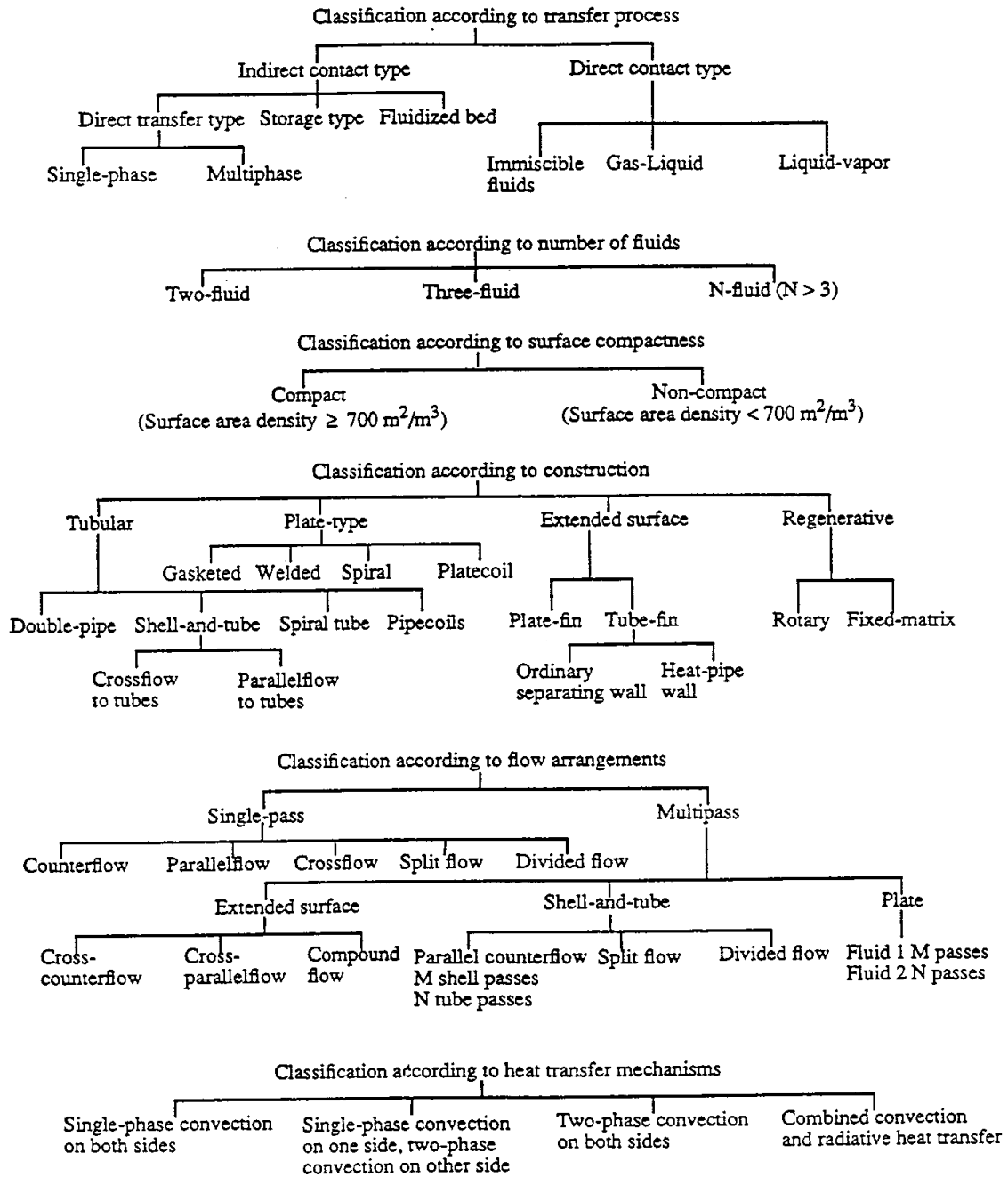
(3) درجات انضغاط السطح degrees of surface compactness .

(4) ترتيب التدفق flow arrangements .

(5) ترتيبات المرور pass arrangements .

(6) طور الموائع الخاص بالعملية phase of the process fluids .

(7) آليات نقل الحرارة heat transfer mechanisms (Walker 1983)



الشكل (1-1) : تصنيف المبادلات الحرارية (Kreith and Boehm 1999)

3-1) التصنيف حسب التركيب (Classification according to construction):

تصنف المبادلات الحرارية بالاعتماد على التركيب الى عدة اصناف نذكر المشهور منها حسب الباحث (Shah 1981)

- المبادلات الحرارية الأنبوبية (Tubular heat exchangers)

- مبادلات ذات أنبوب مزدوج (scoiled tube).

- مبادلات ذات غلاف وأنبوب (Shell and tube).
- مبادلات ذات أنبوب ملفوف (double pipe).
- مبادلات حرارية بالألواح (Plate heat exchangers (PHEs))
- مبادلات مغطاة بالنحاس، ملحومة، حلزونية، ملف لوحة
- مبادلات حرارية بصفحة ذات سطح ممتد (lamella Extended surface heat exchangers)
- مبادلات بزعنفة أنبوبية (tube-fin)، أو بزعنفة مصفحة (plate-fin)
- مبادلات مزودة مسترجعات (Regenerators)
- مبادلات بها مصفوفة ثابتة (fixed matrix)، أو مصفوفة دوارة (rotary matrix)

3-1-2 المبادلات الحرارية الأنبوبية (Tubular heat exchangers):

ونجد منها عدة أشكال وأنواع ونذكر منها

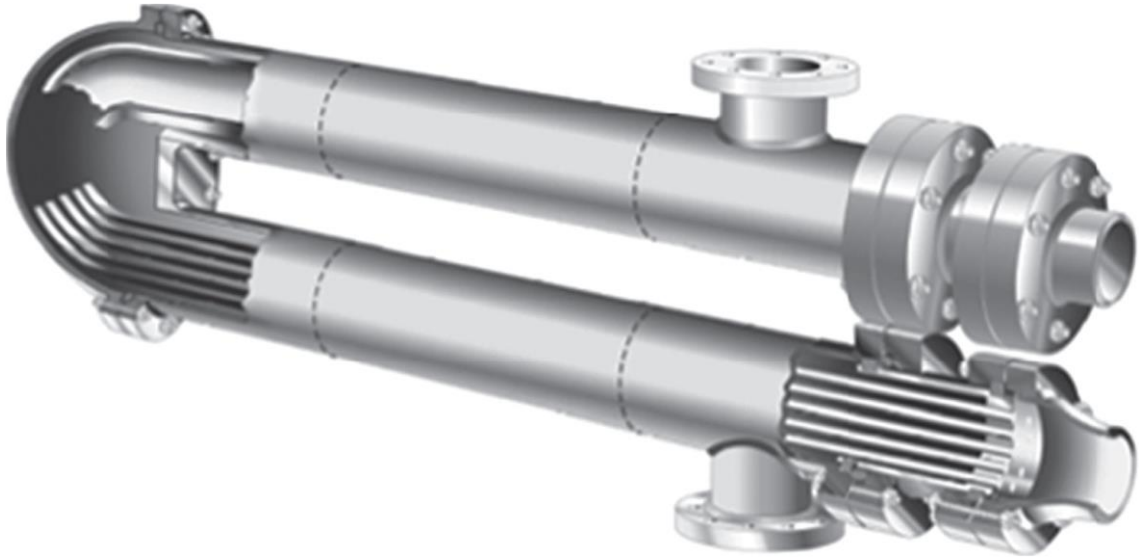
أولاً: مبادلات ذات أنبوب مزدوج (scoiled tube).

يحتوي المبادل الحراري ثنائي الأنبوب على أنبوبين متحدي المركز، وعادة ما يكون ذلك على شكل تصميم منحني على شكل حرف U. تُعرف مبادلات الحرارة ذات الأنبوب المزدوج بتصميم U-bend بالمبادلات الحرارية على شكل دبائيس الشعير. ترتيب التدفق هو تيار معاكس خالص. يمكن توصيل عدد من المبادلات الحرارية ذات الأنبوب المزدوج في سلسلة أو متوازية حسب الضرورة. يتم تطبيقها المعتاد في المهام الصغيرة التي تتطلب عادةً أقل من 300 قدم مربع وهي مناسبة للضغوط العالية ودرجات الحرارة والواجبات الطويلة حراريًا (Larowski and Taylor 1982). يتمتع هذا بميزة المرونة حيث يمكن إضافة الوحدات أو إزالتها حسب الحاجة، والتصميم سهل الخدمة ويتطلب مخزوناً منخفضاً من قطع الغيار بسبب توحيدده. يلزم وجود زعانف طويلة أو زعانف محيطية داخل الحلقة الموجودة على جدار الأنبوب الداخلي لتعزيز نقل الحرارة من مائع الأنبوب الداخلي إلى مائع الحلقة. تتشابه ضغوط التصميم ودرجات الحرارة إلى حد كبير مع المبادلات الحرارية للغلاف والأنبوب (STHEs). التصميم واضح ومباشر ويتم تنفيذه باستخدام طريقة Kern (Kern and Kern 1950) أو البرامج الاحتكارية. شركة Koch Heat Transfer Company LP، الولايات المتحدة الأمريكية، هي الشركة الرائدة في تصميم المبادلات الحرارية لدبائيس الشعير. تُظهر الأشكال من 1.2 إلى 1.4 المبادلات الحرارية ذات الأنبوب المزدوج.

ثانيا : مبادل حراري أنبوبي مزدوج (دبوس الشعر)

:Double pipe(hair pin) heat exchanger

مبادل حراري يحتوي المبادل الحراري للأنايب المزدوجة على أنبوبين متحد المركز ، وعادة ما يكون ذلك على شكل تصميم منحنى على شكل حرف U. يُعرف تصميم U-bend بالمبادلات الحرارية لدبابيس الشعر. ترتيب التدفق هو تيار معاكس خالص. تتراوح مساحة السطح من 300 إلى 6000 قدم مربع (أنابيب ذات زعانف). قدرات الضغط عبارة عن تفريغ كامل لأكثر من 14000 رطل / بوصة مربعة (محدودة بالحجم والمواد وظروف التصميم) ودرجة الحرارة من -100 درجة مئوية إلى 600 درجة مئوية (-150 درجة فهرنهايت إلى 1100 درجة فهرنهايت). من حيث ميزات الاداء الخدمات القابلة للتطبيق: ينتج عن العملية تقاطع لدرجة الحرارة ، تيار عالي الضغط على جانب الأنبوب ، مطلوب انخفاض ضغط منخفض مسموح به على جانب واحد ، عندما يتعرض المبادل لصدمات حرارية ، عندما يكون الاهتزاز الناجم عن التدفق مشكلة.



الشكل(1-2): نموذج لمبادل حراري أنبوبي (دبوس الشعر)

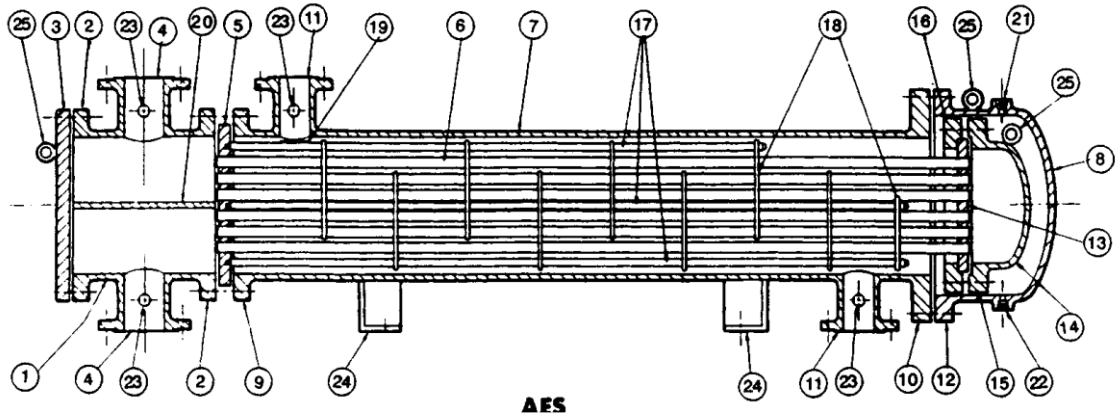
(Double pipe/hairpin heat exchanger)

ثالثا : مبادل حراري بالغللاف والأنايب (STHE)

المبادل الحراري الأكثر استخدامًا لعملية نقل الحرارة في العمليات الصناعية. ويسمى المبادل الحراري بالغللاف والأنايب (Shell and tube heat exchanger) يتم استخدامها كمبرد زيت، مكثف سطح، سخان مياه التغذية، إلخ.

المكونات الرئيسية لمبادل الصدفة والأنبوب هي الأنايب، والحواجز، والصدفة، والرأس الأمامي، والرأس الخلفي ،

والفوهات.(Stevens, Fernandez, and Woolf 1957).



- | | |
|---|--|
| 1. Stationary Head-Channel | 13. Floating Tubesheet |
| 2. Stationary Head Flange-Channel or Bonnet | 14. Floating Head Cover |
| 3. Channel Cover | 15. Floating Head Cover Flange |
| 4. Stationary Head Nozzle | 16. Floating Head Backing Device |
| 5. Stationary Tubesheet | 17. Tierods and Spacers |
| 6. Tubes | 18. Transverse Baffles or Support Plates |
| 7. Shell | 19. Impingement Plates |
| 8. Shell Cover | 20. Pass Partition |
| 9. Shell Flange-Stationary Head End | 21. Vent Connection |
| 10. Shell Flange-Rear Head End | 22. Drain Connection |
| 11. Shell Nozzle | 23. Instrument Connection |
| 12. Shell Cover Flange | 24. Support Saddle |
| | 25. Lifting Lug |

الشكل (3-1): نموذج لمبادل حراري أنبوبي (shell and tube heat exchangers)

المزايا: تصميم مرن وقوي للغاية، سهل الصيانة والإصلاح.

سليبات: أولاً: تتطلب مساحة موقع كبيرة (مساحة) للتثبيت وغالبًا ما تحتاج إلى مساحة إضافية لإزالة الحزمة، ثانياً: الحجم الكبير.

رابعاً: مبادل حراري أنبوب ملفوف (CTHE) :

يتضمن بناء هذه المبادلات الحرارية لف عدد كبير من الأنابيب صغيرة التجويف بطريقة حلزونية حول أنبوب مركزي، ويسمى مبادل حراري أنبوب ملفوف (Coiled tube heat exchanger) ويرمز له بالاختصار (CTHE) مع كل مبادل يحتوي على طبقات عديدة من الأنابيب على طول كل من المحاور الرئيسية والشعاعية. يمكن تمرير سوائل مختلفة في تدفق معاكس. تسمى الزعانف العادية الموجودة على الأنابيب الفردية بالأنابيب ذات الزعانف الفردية (Singh 1981).

خصائص: نظراً لوجود أنابيب تجويف صغيرة على كلا الجانبين، لا تسمح CTHE بالتنظيف الميكانيكي، وبالتالي تُستخدم للتعامل مع سوائل أو سوائل نظيفة وخالية من المواد الصلبة يمكن تنظيف رواسبها الملوثة بالمواد الكيميائية.

خامسا: مبادل حراري ذو زعانف (Finned-tube heat exchanger-FTHE)

1. تسمى الزعانف العادية الموجودة على الأنابيب الفردية بالأنابيب ذات الزعانف الفردية.
2. الزعانف الطولية على أنابيب فردية تستخدم بشكل عام في تطبيقات التكثيف والسوائل اللزجة في المبادلات الحرارية ذات الأنابيب المزدوجة.
3. زعانف خارجية مسطحة أو مستمرة (عادية، موجة، متقطعة) على مجموعة من الأنابيب (إما أنبوب دائري أو مسطح).
4. نمط تخطيط الأنبوب متداخلة في الغالب.

المزايا: مخزون صغير، وزن خفيف، نقل أسهل، أساس أقل، تحكم أفضل في درجة الحرارة في تطبيقات

المكثفات والمبخرات الخاصة بمكثفات الهواء، ومشعات لمحركات الاحتراق الداخلي، ومبردات هواء الشحن ومبردات داخلية لتبريد هواء سحب المحرك فائق الشحن بالديزل، إلخ

سادسا: مبادل حراري لتبريد الهواء (Air cooled heat exchanger -ACHE)

1. حزمة أنبوب ذات زعنفة فردية. تتكون الحزمة من مجموعة من الأنابيب ذات الزعانف بين الإطارات الجانبية، يمر بين الرأس مربعات في كلا الطرفين
2. جهاز ضخ الهواء (مثل التدفق المحوري مروحة أو منفاخ) عبر حزمة الأنبوب.
3. هيكل دعم مرتفع بما يكفي للسماح بدخول الهواء.

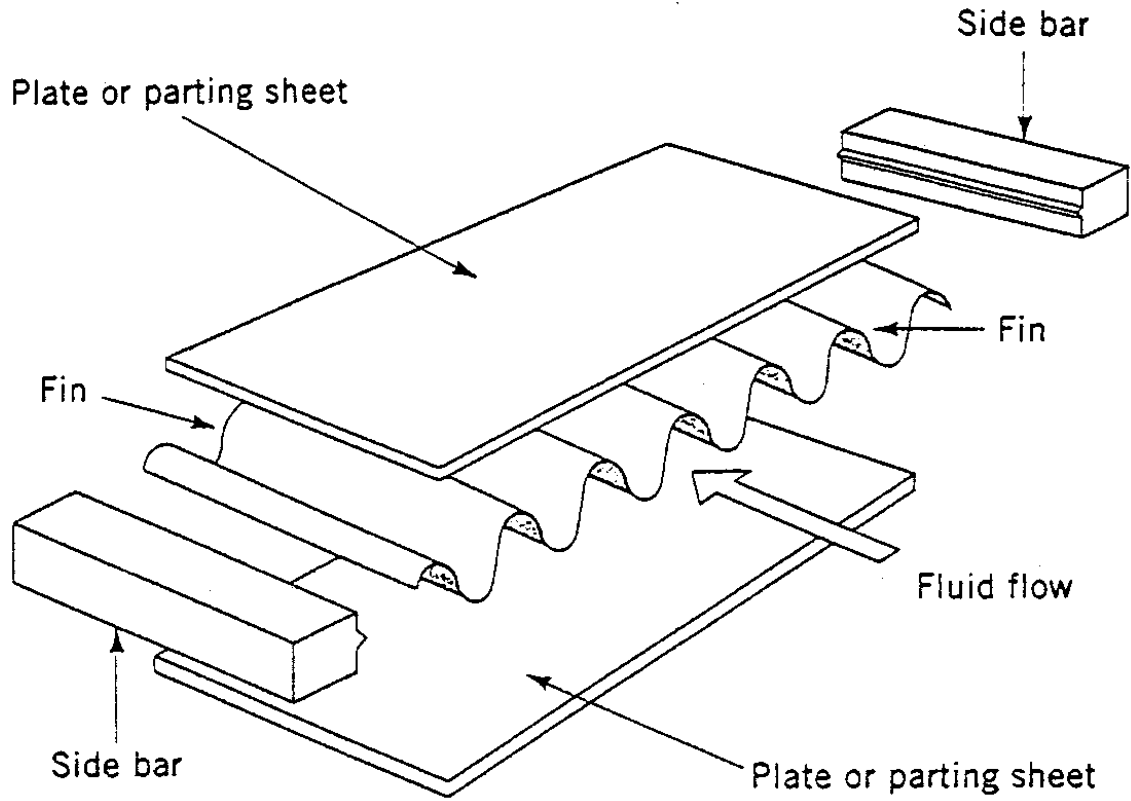
المزايا: تصميم ACHE أبسط مقارنةً ب STHE ، منذ ضغط الهواء ودرجة الحرارة ذات الصلة بالظروف المحيطة. تصميم Tubeside هو نفس STHE. تكلفة الصيانة عادة أقل من ذلك لأنظمة التبريد بالماء. شاي يمكن تنظيف القاذورات على جانب الهواء بسهولة عيوبACHES تتطلب ACHE أسطحًا كبيرة لنقل الحرارة بسبب انخفاض معامل انتقال الحرارة على جانب الهواء والحرارة المنخفضة للهواء. ضوضاء هو عامل معACHES

سابعًا : مبادل حراري ذو زعانف مسطحة (Plate-fin heat exchanger PFHE):

المبادلات الحرارية لزعانف مسطحة (PFHEs) هي شكل من أشكال المبادلات الحرارية، يتكون من كومة من ألواح مسطحة، ملحومة معًا ككتلة. مختلف الزعانف (مثل المثلث العادي، اللوفر، لوحات لتطبيقات مختلفة. وتستخدم هذه المبادلات بشكل شائع في تحويل الحرارة من غاز إلى غاز.

1. يقدم PFHE أداءً حراريًا متفوقًا مقارنة بالمبادلات الحرارية ذات الأسطح الممتدة.

2. يمكن أن يحقق PFHE تخفيض لدرجة الحرارة ذات القيم التالية: تصل إلى 1 درجة مئوية بين التدفقات أحادية الطور و3 درجات مئوية بين التدفقات متعددة الأطوار.
3. مع سطح تبادلها الحراري المدمج بقيمة عالية، والقدرة على التعامل مع تدفقات متعددة، ومع استخدام معدن الألومنيوم ذو الخصائص الجيدة في نقل الحرارة سوف يحقق تبادل حراري جيد.
4. يمكن تحقيق فعالية حرارية عالية جدا. للتطبيقات المبردة، فعالية 95% فما فوق.



الشكل (1-4): مبادل حراري ذو زعانف مسطحة
(Plate-fin heat exchanger PFHE)

ثامنا: مبادل حراري لוחي (Plate heat exchanger -PHE)

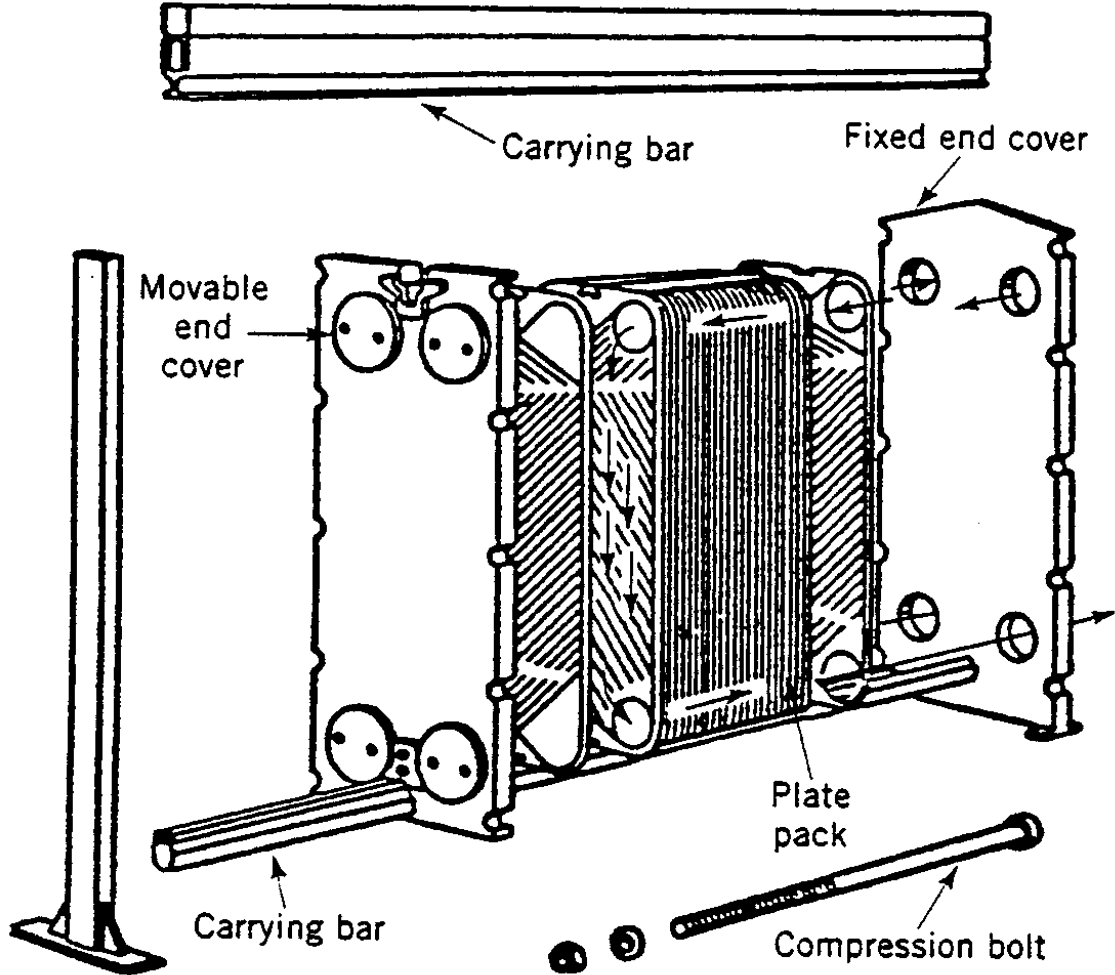
عادة ما يتكون المبادل الحراري اللوحى من مجموعة من الصفائح المعدنية المموجة أو المنقوشة في اتصال متبادل، ولكل لوحة أربع فتحات تعمل كمنافذ مدخل ومخرج، وموانع تسرب مصممة لتوجيه السوائل في ممرات تدفق بديلة.

المزايا: التدفقات اتصنف على انها متعاكسة، وأداء نقل حراري عالي. ودرجة حرارة متقاربة بين المائعين.

ومن أهم الخصائص القضاء على التلوث المتبادل. إجراءات متعددة مع وحدة واحدة. قابل للتوسيع. سهل الفحص والتنظيف. انخفاض حجم السائل والتحكم السريع في العملية. وأقل تكلفة.

السليبيات:

1. الحد الأقصى لدرجة حرارة التشغيل والضغط محددان بمواد الداخلة في التصنيع. لا تستطيع المواد التعامل مع الوسائط المسببة للتآكل.
2. تركيب المبادل يسبب إمكانية التسرب.



الشكل (1-5): مبادل حراري لويحي (Plate heat exchanger -PHE)

تاسعا: مبادل حراري لولبي (Spiral plate heat exchanger -SPHE)

يتم تصنيع SPHE عن طريق لف زوج من شرائح طويلة نسبياً من الألواح لتشكيل زوج من الممرات الحلزونية. يتم الحفاظ على تباعد القنوات على طول الممرات اللولبية عن طريق مسامير فاصلة ملحومة بشرائط الألواح (Shah, 1981).

المزايا: لمعالجة الطين والسوائل ذات الألياف المعلقة، ومعالجة المعادن الخام حيث يصل المحتوى الصلب إلى 50٪. يعتبر

SPHE هو الخيار الأول بالنسبة إلى اللزوجة العالية للغاية، خاصة في مهام التبريد.
التطبيقات: تجد SPHE تطبيقات في إعادة الغلي، والتكثيف، والتدفئة أو التبريد للسوائل اللزجة، والطين، والحمأة.



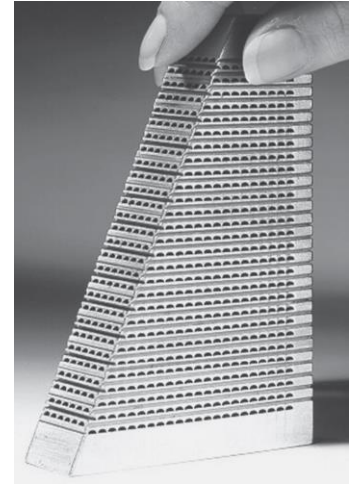
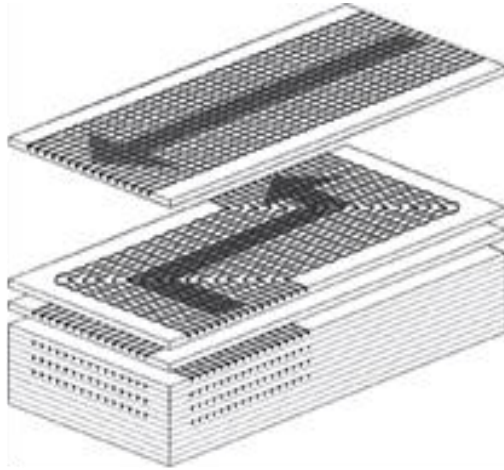
الشكل (1-6): مبادل حراري لولبي (-SPHE Spiral plate heat exchanger)

عاشرا: المبادلات الحرارية للدائرة المطبوعة

(PCHEs – Printed circuit heat exchangers):

تتكون المبادلات الحرارية للدائرة المطبوعة من قلب مبادل حراري يعمل بالانتشار، ويتم إنشاؤه من ألواح معدنية مسطحة، حيث تكون قنوات تدفق السوائل محفورة. ويمكن تحمل ضغط 600 بار بدرجات حرارة قصوى، تتراوح من المبردة إلى 700 درجة مئوية.

المزايا: يمكن أن يكون تدفق السوائل متوازي التدفق، أو تدفق متعاكس، أو تدفق متقاطع، أو مزيجًا من هذه العوامل لتلائم متطلبات العملية. تبلغ الفعالية الحرارية 98% في وحدة واحدة. يمكنهم دمج أكثر من تدفقات عملية في وحدة واحدة.



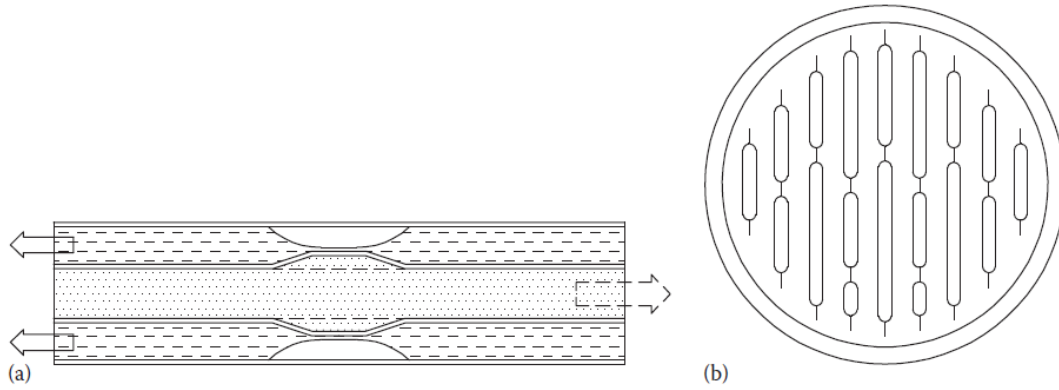
الشكل (7-1): المبادلات الحرارية للدائرة المطبوعة

(PCHEs– Printed circuit heat exchangers)

الحادي عشر: مبادل حراري لامبلا (Lamella heat exchanger –LHE)

يتكون المبادل الحراري الصفائحي عادة من غلاف أسطواني يحيط بعدد من الصفائح التي تنقل الحرارة. يمكن مقارنة التصميم بالمبادل الحراري للأنبوب ولكن مع استبدال الأنابيب الدائرية بقنوات رفيعة وواسعة، صفائح. يعمل المبادل الحراري الصفائحي مع الوسائط بتدفق تيار عكسي كامل. يقلل عدم وجود لوحات الحاجز من انخفاض الضغط ويجعل التعامل مع معظم الوسائط ممكنًا.

المزايا: نظرًا لأنه يمكن فك حزمة الصفائح بسهولة من الغلاف، يصبح الفحص والتنظيف أمرًا سهلاً.



الشكل (8-1): مبادل حراري لامبلا (Lamella heat exchanger -LHE)

الثان عشر: مبادل حراري للأنايب الحرارية (Heat pipe heat exchanger)

إن المبادل الحراري للأنايب الحرارية المستخدم لاستعادة حرارة (من غاز إلى غاز) هو في الأساس حزمة من الأنايب ذات الزعانف المجمعمة مثل مبادل حراري تقليدي مبرد بالهواء. يتكون الأنبوب الناقل للحرارة من ثلاثة عناصر: (1) سائل يعمل داخل الأنايب (2) فتيل مبطن داخل جدار الأنايب (3) فراغ بين الأنايب مدعم بزعانف. يتكون المبادل الحراري من قسم يتدفق من خلاله غاز العادم الساخن وقسم يتدفق من خلاله الهواء البارد. يتم فصل هذين القسمين بجدار فاصل.

التطبيق: تُستخدم أنابيب الحرارة من أجل (1) استرداد الحرارة من سائل في عملية تسخين مسبق للهواء لتدفئة حيز، (2) استرداد الحرارة الضائعة من هواء العادم لتسخين هواء الوارد عملياً للجهاز. (3) لا يحتاج إلى صيانة ميكانيكية، حيث لا توجد أجزاء متحركة. (4) أنظمة استرداد الحرارة للأنايب الحرارية قادرة على العمل عند درجة حرارة 300 درجة مئوية - 315 درجة مئوية مع قدرة 60% - 80% استرداد الحرارة.

الثالث عشر: مبادل حراري ملفوف الصفائح

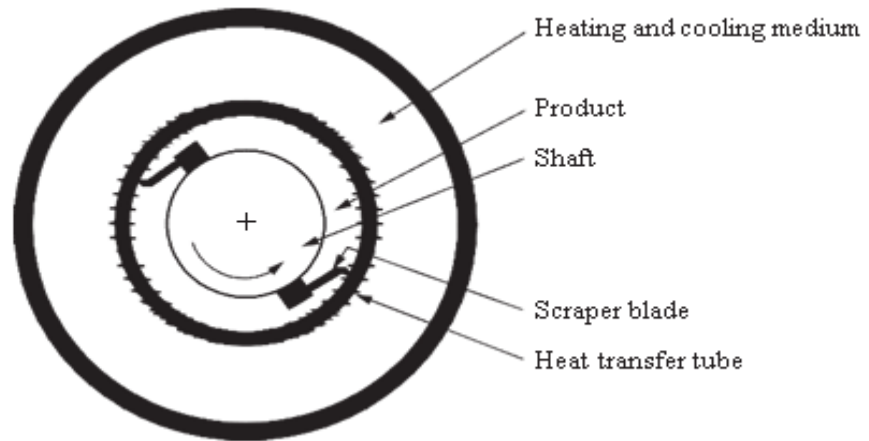
(Plate coil heat exchanger -PCHE)

مصنعة من صفيحتين من المعدن، أحدهما أو كلاهما منقوش. عند اللحام معاً، تشكل النقوش سلسلة من الممرات المحددة جيداً والتي تتدفق من خلالها وسائط نقل الحرارة.

تتوفر مجموعة متنوعة من التركيبات، مثل ملف الأنايب، ونصف الأنايب، والخزانات المغلفة والأوعية، والسخانات والمبردات الغاطسة، وسخانات صهاريج التخزين، وما إلى ذلك. ويؤدي الوصول السهل إلى الألواح والأسطح إلى تقليل أعباء الصيانة.

الرابع عشر: مبادل حراري للسطح المكشط (Scraped surface heat exchanger)

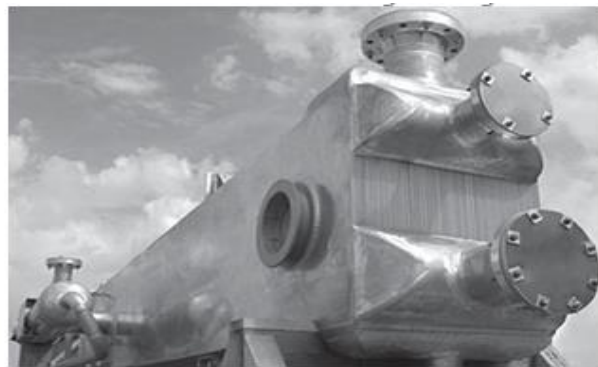
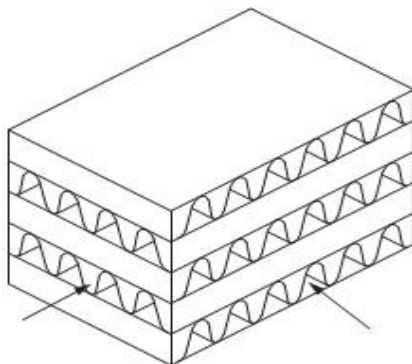
المبادلات الحرارية للسطح المكشط عبارة عن تركيبة من أنبوب مزدوج، حيث هناك سائل في الأنبوب الداخلي، والتبريد يتم بالماء، يوجد عنصر دوار داخل الأنبوب ومجهز بشفرات زنبركية، وبالتالي تعزيز نقل الحرارة. واستخدام مبادل سطحي مكشط يمنع تراكم الرواسب الصلبة بشكل كبير. (Timmerhaus and Flynn 1989, Larowski and Taylor 1982).



الشكل (1-9): مبادل حراري للسطح المكشط (Scraped surface heat exchanger)

الخامس عشر: المبادلات السطحية الممتدة

في المبادل الحراري الذي يعمل بالغازات أو بعض السوائل، إذا كان معامل نقل الحرارة منخفضاً جداً، يلزم وجود مساحة كبيرة لنقل الحرارة لزيادة معدل نقل الحرارة. يتم تحقيق هذا المطلوب عن طريق زعانف متصلة بالسطح الأساسي. تعد المبادلات الحرارية ذات النهايات الأنبوبية والمبادلات الحرارية ذات نهاية الصفائح أكثر الأمثلة شيوعاً للمبادلات الحرارية السطحية الممتدة.



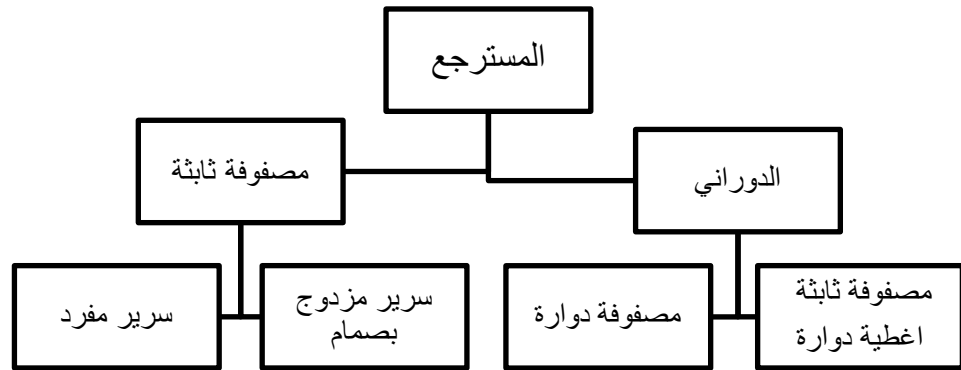
الشكل (1-10): مبادل حراري ذو زعانف.

(a) رسم تخطيطي للمبادل (b) مبادل حراري ذو زعانف ألنيوم ملحوم.

السادس عشر: المبادلات الحرارية المسترجعة للحرارة

الاسترجاع هي تقنية قديمة يعود تاريخها إلى أول المواقد المفتوحة ومواقد الأفران العالية. مثال على ذلك الصناعات التحويلية والعملية مثل الزجاج والأسمنت والمعادن الأولية والثانوية جزءاً كبيراً من إجمالي الطاقة المستهلكة. ويتم التخلص من الكثير من هذه الطاقة في شكل غاز عادم عالي الحرارة. يمكن أن يؤدي استرجاع الحرارة الضائعة من غاز العادم عن طريق المبادلات الحرارية المعروفة باسم المسترجعات إلى تحسين الكفاءة الكلية للمصنع.

أنواع المسترجعات: تُصنف المسترجعات عمومًا على أنها ذات مصفوفة ثابتة ودوارة. مزيد من التصنيفات للمولدات الثابتة والدوارة موضحة في الشكل (1-11).



الشكل (1-11): تصنيف المسترجعات

مبدأ العمل:

يتم تحقيق استرجاع الحرارة عن طريق التبادل الحراري المباشر بين المائع الساخن والبارد. يتم استخدام المجدد الدوار بشكل شائع في محطات توليد الطاقة بتوربينات الغاز حيث يتم استخدام الحرارة الضائعة من غازات العادم الساخنة لرفع درجة حرارة الهواء المضغوط قبل أن يتم توفيره لغرفة الاحتراق. يظهر مبدأ عمل المسترجع الدوار، تندرج المسترجعات الدوارة في فئة المبادلات الحرارية المدجة نظرًا لأن مساحة سطح نقل الحرارة إلى نسبة حجم المجدد عالية جدًا.

(2-3) التصنيف وفقاً لعملية التحويل (transfer processes):

هذه التصنيفات هي كما يلي: نوع الاتصال غير المباشر - نوع النقل المباشر، ونوع التخزين، أبراج التبريد.

3-2-1) الحرارة الملامسة غير المباشرة :

في المبادل الحراري من نوع التلامس غير المباشر، تظل تيارات السوائل منفصلة ويتم نقل الحرارة بشكل مستمر من خلال جدار فاصل غير نافذ.

3-2-2) التحويل المباشر :

في هذا النوع، هناك تدفق مستمر للحرارة من السائل الساخن إلى السائل البارد عبر جدار فاصل. لا يوجد خلط مباشر للسوائل لأن كل مائع يتدفق في ممرات سوائل منفصلة. لا توجد أجزاء متحركة. والمبادلات الأنبوبية هي مثال على المبادلات الحرارية من نوع التحويل المباشر، ويمكن اعتبار PHEs ، المبادلات السطحية الممتدة من النوع المباشر. يتم تصنيف أجهزة الاسترداد أيضاً على أنها مبادلات سطحية أولية، والتي لا تستخدم زعانف أو أسطحاً ممتدة على السطح الرئيسي. المبادلات الأنبوبية العادية ومبادلات الغلاف والأنبوب ذات الأنابيب العادية و PHEs هي أمثلة على المبادلات السطحية الأولية.

3-3) التصنيف حسب السطح (degrees of surface compactness)

تعتبر المبادلات الحرارية المدمجة مهمة عندما تكون هناك قيود على حجم ووزن المبادلات. يشتمل المبادل الحراري المدمج على سطح نقل حراري بكثافة منطقة عالية ، β القيمة 700 م² / م³ وأعلى حسب الباحث (Shah 1981). كثافة السطح الحجمية هي نسبة سطح نقل الحرارة A إلى حجم الوحدة V. المبادل الحراري المدمج يستخدم سطحاً على جانب واحد أو أكثر من مائعين أو مبادل حراري متعدد الموائع. يمكنها في كثير من الأحيان تحقيق فعالية حرارية أعلى من المبادلات ذات الغلاف والأنابيب (95% مقابل 60% - 80% النموذجية للمبادلات الحرارية)، والتي يجعلها مفيدة بشكل خاص.

في الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة (Butterworth and Mascone 1991). لأقل تكلفة يجب أن يكون حجم الوحدة في حده الأدنى. وهناك بعض المزايا الإضافية للحجم الصغير على النحو التالي:

مخزون صغير، مما يجعلها جيدة لاستخدام المواد باهظة الثمن أو الخطرة (Butterworth and Mascone 1991)، الوزن الخفيف أسهل نقل ، ويمكن تحكّم أفضل في درجة الحرارة . ومن بين العوائق التي تحول دون استخدام المبادلات الحرارية المدمجة ما يلي:

(1) عدم وجود معايير شبيهة برموز ومعايير وعاء الضغط ، على الرغم من أنه يتم الآن تصحيح ذلك في مجالات المبادلات ذات الزعانف (Taylor 1987).

3-4) التصنيف حسب ترتيب التدفق (flow arrangements):

تكون ترتيبات التدفق الأساسية للسوائل في المبادل الحراري كما يلي:

Parallel flow

Counter flow

Cross flow

يعتمد اختيار ترتيب تدفق معين على فعالية المبادل المطلوبة، ومسارات تدفق السوائل، وظروف التشغيل، والمجالات الحرارية المسموح بها، ومستويات درجة الحرارة، ومعايير التصميم الأخرى. تتم مناقشة ترتيبات التدفق الأساسية على النحو التالي:

3-4-1) المبادل الحراري المتوازي (Parallel flow exchanger)

في هذا النوع، يدخل كلا تيارات المائع من نفس النهاية، ويتدفقان بالتوازي مع بعضهما البعض في نفس الاتجاه، ويخرجان عند الطرف الآخر (بالنسبة للتغيرات درجة حرارة للموائع، هذا الترتيب له أقل فعالية للمبادل بين المبادلات أحادية التمرير لنفس معدلات التدفق، ونفس معدل السعة الحرارية (الكتلة × الحرارة النوعية) ونفس مساحة السطح. (أ) عند تسخين السوائل شديدة اللزوجة، يوفر التدفق المتوازي تسخيناً سريعاً. ويؤدي التغيير السريع في اللزوجة إلى انخفاض الحرارة المتبادلة من خلال المبادل الحراري، (ب) حيث تكون درجات الحرارة المتوسطة الأكثر اعتدالاً لجدران الأنابيب مطلوبة يصبح هذا النوع مناسب (ج) حيث أن التحسينات في معدلات نقل الحرارة تتطلب انخفاض LMTD لذلك فإن ترتيب التدفق هذا لا يستخدم على نطاق واسع، إلا أنه مفضل للأسباب التالية (Shah and Sekulic 2003):

1. عندما يكون هناك احتمال أن درجة حرارة السائل البارد قد تصل إلى نقطة التجمد.
2. يستخدم في تطبيقات الغليان.
3. يسمح التطبيق بالأنابيب المناسبة فقط للانسحاب المتوازي.
4. يستخدم للسوائل الحساسة لدرجة الحرارة مثل المنتجات الغذائية، والمستحضرات الصيدلانية، والمنتجات البيولوجية هي أقل عرضة للتلف الحراري في المبادل الحراري المتوازي.
5. يستخدم من أجل الحالات التالية: مثل إنقاص التلوث الناتج من التفاعل الكيميائي، والقشور، والتقليل من التآكل، والعوائق الناتجة من التجميد. ومنه عندما يكون التحكم في التلوث الناتج من درجة الحرارة مصدر قلق كبير، فمن المفيد

استخدام التدفق المتوازي.

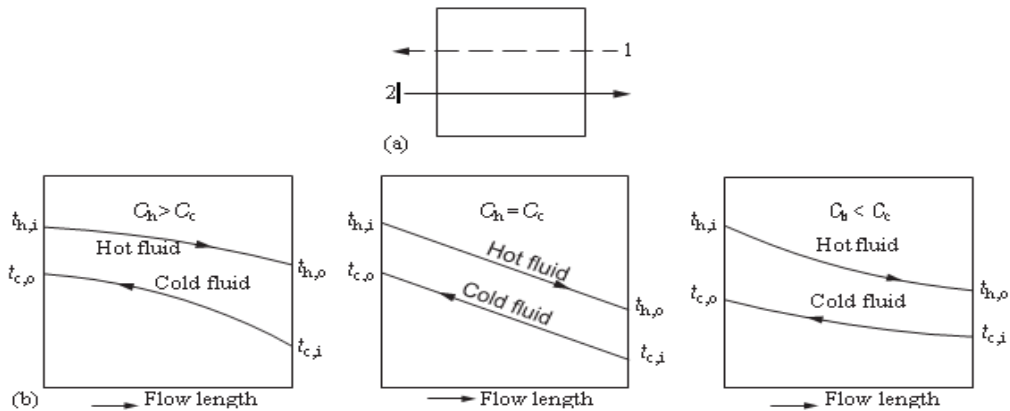
3-4-2) المبادل الحراري المتعكس (Counter flow exchanger)

في هذا النوع، كما هو موضح في الشكل (1-12)، يتدفق السائلين بالتوازي مع بعضهما البعض ولكن في اتجاهين متعاكسين، وقد يكون توزيع درجة الحرارة مثاليًا. وهو الأكثر كفاءة من بين جميع ترتيبات التدفق تحت نفس الشروط. نظرًا لأن الاختلاف في درجة الحرارة عبر جدار المبادل عند مقطع عرضي معين هو الأدنى، فإنه ينتج أداء مكافئ مقارنة بترتيبات التدفق الأخرى. في أنواع معينة من المبادلات الحرارية، لا يمكن تحقيق ترتيب التدفق المتعكس بسهولة، بسبب صعوبات التصنيع المرتبطة بفصل السوائل في كل طرف، وبسبب تصميم مدخل ومخرج المبادل المعقد والصعب (Shah and Sekulic 2003).

3-4-3) المبادل الحراري المتقاطع (Cross flow exchanger)

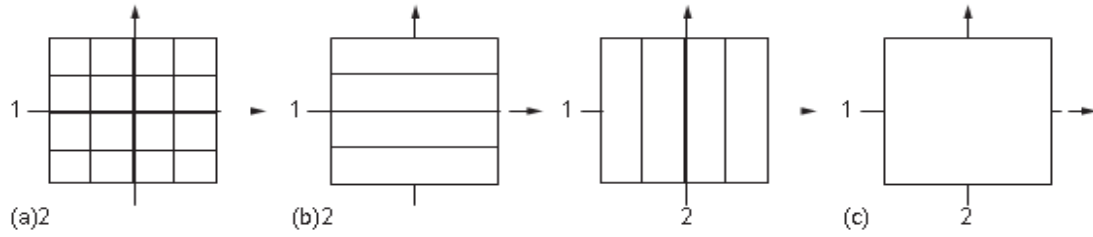
في هذا النوع، كما هو موضح في الشكل (1-13)، يتدفق المائعان بشكل طبيعي لبعضهما البعض. تتضمن الأنواع المهمة من مجموعات ترتيب التدفق لمبادل التدفق الأحادي ما يلي:

- كلا المائعين غير مختلطين.
 - أحد الموائع غير مخلوط والمائع الآخر مختلط.
 - تم خلط المائعين.
- ويقصد بالخلط هو عدم وجود مسارات للمائع. أما عدم الخلط وجود أنابيب أو مسارات للمائع.



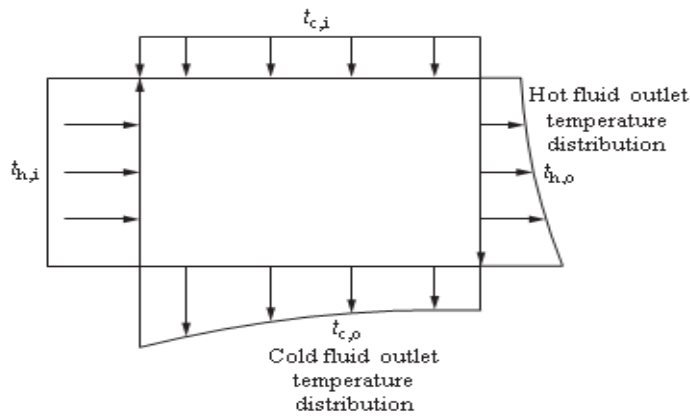
الشكل (1-12): تصنيف المبادلات حسب التدفق

(a) ترتيب التدفق المتعكس و (b) توزيع درجة الحرارة. (ملاحظة: C_h و C_c هما معدل السعة الحرارية للسائل الساخن والسائل البارد على التوالي، i تشير إلى المدخل، o تشير إلى المخرج و t تشير إلى درجة حرارة السائل.)



الشكل (1-13): تصنيف المبادلات حسب التدفق

ترتيب التدفق المتقاطع: (a) غير مختلط - غير مختلط، (b) غير مختلط - مختلط، (c) مختلط - مختلط.



الشكل (1-14): توزيع درجة الحرارة لترتيب التدفق العرضي المختلط وغير المختلط.

3-5) التصنيف وفقاً لترتيبات المرور (pass arrangements)

هذه إما تمريرة واحدة أو متعددة. يعتبر السائل قد مر مرة واحدة إذا كان يتدفق عبر جزء من المبادل الحراري عبر طوله الكامل مرة واحدة. في الترتيب متعدد المسارات ، ينعكس السائل ويتدفق عبر طول التدفق مرتين أو أكثر.

3-5-1) مبادلات متعددة المسارات Multipass

عندما ينتج عن تصميم المبادل الحراري إما طول شديد ، أو سرعة منخفضة بشكل ملحوظ ، أو فعالية منخفضة ، أو بسبب معايير تصميم أخرى ، يتم استخدام مبادل حراري متعدد الكميات أو عدة مبادلات أحادية المسار متسلسلة أو مزيج من الاثنين معاً. على وجه التحديد ، يتم اللجوء إلى تعدد الأصوات لزيادة الفعالية الحرارية للمبادل على فعالية التمرير الفردي. مع زيادة عدد الممرات ، يقترب الاتجاه العام للمائع من اتجاه مبادل التدفق المعاكس النقي. يمكن إجراء ترتيبات تعدد المسارات باستخدام المبادلات المدجة والهيكليّة والأنبوبية واللوحية.

3-6) التصنيف حسب طور الموائع (phase of the process fluids):

أولاً : الغاز – السائل :

المبادلات الحرارية الغازية السائلة هي في الغالب مبادلات حرارية مدججة من النوع الأنبوبي مع السائل على جانب الأنبوب. يعتبر المبرد إلى حد بعيد النوع الرئيسي من المبادلات الحرارية للغاز السائل ، وعادةً ما يبرد غلاف المحرك بالماء عن طريق الهواء. تعتبر الوحدات المماثلة ضرورية لجميع المحركات الأخرى المبردة بالمياه المستخدمة في الشاحنات والقاطرات والمعدات التي تعمل بالديزل ومحطات توليد الطاقة التي تعمل بالديزل. ومن الأمثلة الأخرى مبردات الهواء ، ومبردات الزيت للطائرات ، والمبردات البينية والمبردات اللاحقة في الضواغط ، ومكثفات ومبخرات مكيفات هواء الغرفة. عادة ، يتم ضخ السائل من خلال الأنابيب ، التي لها معامل انتقال حراري مرتفع للغاية. يتدفق الهواء في تدفق متقاطع فوق الأنابيب. سيكون معامل انتقال الحرارة على جانب الهواء أقل من معامل نقل الحرارة على جانب السائل. سيتم استخدام الزعانف بشكل عام على السطح الخارجي للأنابيب لتعزيز معدل نقل الحرارة.

ثانياً: سائل – سائل :

معظم المبادلات الحرارية السائلة والسائلة هي من النوع الصدفي والأنبوب ، و PHES بدرجة أقل. يتم ضخ كلا الموائع من خلال المبادل، وبالتالي فإن الطريقة الرئيسية لنقل الحرارة هي التحويل القسري. ينتج عن الكثافة العالية نسبياً للسوائل معدل نقل حرارة مرتفع جداً ، لذلك لا تُستخدم الزعانف أو الأجهزة الأخرى في العادة لتعزيز نقل الحرارة (Walker 1983). في بعض التطبيقات، يتم استخدام الأنابيب ذات الزعانف المنخفضة وأنابيب الميكروفين وأجهزة زيادة نقل الحرارة لتعزيز نقل الحرارة (London and Seban 1980).

ثالثاً: الغاز – الغاز :

يوجد هذا النوع من المبادلات في أجهزة التعافي المسبق للتسخين المسبق لغاز العادم والهواء ، والمولدات الدوارة، والمبردات البينية، و / أو المبردات اللاحقة لتبريد هواء سحب المحرك فائق الشحن لبعض مجموعات الطاقة الأرضية وقاطرات الديزل ، وأنظمة تسييل الغازات المبردة. في كثير من الحالات، يتم ضغط أحد الغازات بحيث تكون الكثافة عالية بينما يكون الآخر عند ضغط منخفض وكثافة منخفضة. بالمقارنة مع المبادلات السائلة والسائلة، سيكون حجم مبادل الغاز والغاز أكبر بكثير، لأن معامل نقل الحرارة بالحمل الحراري على جانب الغاز منخفض مقارنةً بجانب السائل. لذلك، يتم استخدام الأسطح الثانوية في الغالب لتعزيز معدل نقل الحرارة.

3-7) التصنيف وفقاً لتغييرات نقل الحرارة (heat transfer mechanisms)

آليات نقل الحرارة الأساسية المستخدمة لنقل الحرارة من مائع إلى آخر هي: (1) الحمل الحراري أحادي الطور، القسري أو الحر، (2) الحمل الحراري على مرحلتين (التكثيف أو التبخير) بالحمل الحراري القسري أو الحر (3) الحمل الحراري والإشعاع يمكن أن تكون أي من هذه الآليات بشكل فردي أو مجتمعة ونشطة على كل جانب من جوانب المبادل. بناءً على آليات تغيير الطور، يتم تصنيف المبادلات الحرارية على أنها (1) مكثفات و (2) مبخرات.

3-7-1) المكثفات

عبارة عن أجهزة تقوم بتحويل الأبخرة إلى سوائل وذلك بوجود مائع آخر بارد، والأبخرة عند ملامستها السطح البارد تتكاثف حوله مشكلة قطرات من السائل فيما يسمى بظاهرة التقطير.

3-7-2) المبخرات :

يمكن تقسيم هذه المجموعة المهمة من المبادلات الحرارية الأنبوبية إلى فئتين:

أنظمة الحرق: تشمل منتجات احتراق الوقود الأحفوري في درجات حرارة عالية جداً، وعند الضغط الجوي يتم توليد البخار بقيم منخفضة، تسمى هذه الأنظمة بالغلايات. قد يكون النظام عبارة عن غلاية أنبوب تعمل بالاحتراق أو غلاية أنبوب الماء.

الأنظمة غير المشغولة: تتضمن هذه الأنظمة مجموعة كبيرة ومتنوعة من مولدات البخار التي تمتد على نطاق واسع من درجات الحرارة، ومن مولدات البخار النووي ذات درجة الحرارة العالية.

4) خاتمة الفصل

اختيار المبادل الحراري المناسب هو العملية التي يختار فيها المصمم نوعاً معيناً من المبادلات الحرارية لتطبيق معين من مجموعة متنوعة من المبادلات الحرارية. هناك عدد من البدائل لاختيار معدات نقل الحرارة، ولكن واحداً منها فقط هو الأفضل لمجموعة معينة من الظروف. تتم مناقشة معايير اختيار المبادل الحراري بعد ذلك.

معايير الاختيار:

معايير الاختيار كثيرة، وأهم المعايير الأساسية هي نوع السوائل التي يجب التعامل معها، وضغوط التشغيل ودرجات الحرارة، والحرارة، والتكلفة. ويمكن وصف الموائع المشاركة في نقل الحرارة بالحرارة، والضغط، والخصائص الفيزيائية، والسمية، والتآكل. وتختلف ظروف تشغيل المبادلات الحرارية على نطاق واسع جداً، ويتم فرض مجموعة واسعة من

المتطلبات لتصميمها وأدائها.

يؤخذ في الاعتبار عند تقييم نوع الوحدة التي سيتم استخدامها (Gollin 1989). عند اختيار مبادل حراري لعملية معينة، ويجب مراعاة النقاط التالية:

- مواد البناء
- ضغط التشغيل ودرجة الحرارة وبرنامج درجة الحرارة والقوة الدافعة لدرجة الحرارة
- معدلات التدفق
- ترتيبات التدفق
- معايير الأداء - الفعالية الحرارية وانخفاض الضغط
- أنواع الموائع وأطوارها
- إمكانيات الصيانة والفحص والتنظيف والإصلاح
- تقنيات التصنيع
- ترتيبات التركيب: أفقية أو رأسية

متطلبات المبادلات الحرارية :

يجب أن تستوفي المبادلات الحرارية المتطلبات التالية:

- فعالية حرارية عالية
- انخفاض الضغط إلى أدنى مستوى ممكن
- الموثوقية ومتوسط العمر المتوقع
- منتج عالي الجودة وتشغيل آمن
- توافق المواد مع موائع المستعملة
- حجم مناسب، سهل التركيب، موثوق في الاستخدام
- سهل للصيانة والخدمة
- خفيف الوزن ولكنه قوي في البناء لتحمل ضغوط التشغيل والاهتزازات خاصة المبادلات الحرارية للتطبيقات العسكرية
- بساطة التصنيع
- تكلفة منخفضة

الفصل الثاني

دراسة نظرية حول المبادل الحراري

يحتوي هذا الفصل على مختلف العلاقات النظرية الخاصة بالظواهر الفيزيائية الداخلة في لانتقال الحرارة والتمثلة في

- انتقال الحرارة
 - مبدأ عمل المبادل الحراري
 - انتقال الحرارة حول مجموعة من الأنابيب
-

(1) مقدمة الفصل

من أهم الظواهر الفيزيائية التي يمكن تطبيقها في المبادلات الحرارية، نجد قوانين إنتقال الحرارة وقوانين التيرموديناميك وميكانيك الموائع. حيث أن قوانين إنتقال الحرارة تتلخص في التوصيل والحمل والأشعاع وميكانيك الموائع تدخل في ضبط المقادير الفيزيائية القابلة للإنتقال كالكتلة وكمية الحركة والطاقة، ومنه يمكن التفصيل في الظواهر الفيزيائية في العناوين التالية :

- انتقال الحرارة.
- مبدأ عمل المبادل الحراري
- انتقال الحرارة حول مجموعة من الأنابيب.

(2) الظواهر الفيزيائية الأساسية في المبادل الحراري**(1-2) انتقال الحرارة**

تعريف: "انتقال الحرارة" هو تحرك كمية الحرارة من نقطة إلى نقطة بوجود تدرج في درجة الحرارة والانتقال يتم مهما كان نوع الوسط، حتى بعدم وجود وسط مادي (مثلا فراغ في حالة الإشعاع)، ويتم الانتقال ب :

- (1) التفاعل المباشر لجسيمات المادة المتقاربة (بالتصادم مثلا)، وهذا يحدث في التوصيل الحراري.
- (2) الامتصاص أو البث للإشعاعات الكهرومغناطيسية، وهذا يحدث في الإشعاع الحراري .
- (3) وفي حالة الغازات أو السوائل، بالحمل الحراري تحمل جسيمات المادة الطاقة الحرارية بشكل عشوائي بين نقطتين من الوسط المادي.

(2-2) أشكال انتقال الحرارة**(1-2-2) التوصيل الحراري (الانتشار الحراري)**

و يكون في الأوساط غير المتحركة (الحركة النسبية للجسيمات مهملة)، كالأوساط الصلبة. أما في الموائع فحركة الجسيمات ماكروسكوبية (عيانية)، لذلك فالتوصيل يكون ضعيفا، ويكون للتوصيل قيمة معتبرة في الطبقات الحدية الحرارية (couche limite thermique) قرب سطوح الأجسام الصلبة، أو مائع داخل مسام صغير الأبعاد في جسم صلب.

قانون " فورييه " (1^{er} loi de Fourier) الأول في الانتشار الحراري

نعتبر وسط غير متحرك (مستقر حركيا) ومتجانس (متشابه الخواص) محدود بصفيحتين متوازيتين هُما مساحة تساوي A ومسافة بينية dx، وبينهما فرق في درجة الحرارة dT، يكون بينهما تيار حراري (استطاعة حرارية كمية الحرارة المنقولة في وحدة الزمن $Q = \frac{dQ}{dt}$ مقاسة بـ W=J/s) من الصفيحة الساخنة إلى الصفيحة الباردة، هذه الاستطاعة الحرارية تعطى بقانون " فورييه " الأول :

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \frac{dT}{dx} \quad (1 - 2)$$

بحيث المُعامل λ خاصية ذاتية لمادة الوسط، تسمى التوصيلية الحراريّة (تقاس بـ $[\lambda]_{SI} = W/m \cdot ^\circ C$).

2-2-2 الحمل الحراري

في الانتقال الحراري بالحمل، تُنقل الحرارة مباشرة بالحركة الماكروسكوبية (العينية) للمائع، و عندها يسمى المائع بـ: المائع الحامل للحرارة، والحمل هو شكل من أشكال الانتقال جد سريع بالمقارنة بالتوصيل. وعند ترك المائع يتحرك لوحده أو بفعل التيار الحراري الناتج من التسخين، نسمي هذا النوع بالحمل الحراري الطبيعي (الحر)، لكن عند التأثير على المائع بقوة فتعطيه عملا ميكانيكيا (مروحة - رَج - ضَخ - ...) نسميه الحمل الحراري القسري .

قانون " نيوتن " :

نعتبر مائع حراري ذو درجة حرارة T_∞ في تماس مع سطح جسم صلب، مساحته A ودرجة حرارته T_s ، يُحدّث بينهما تبادل حراري (تسخين أو تبريد)، وينتقل تيار حراري $\frac{dQ}{dt}$ قيمته حسب قانون " نيوتن ":

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot A (T_\infty - T_s) \quad (2 - 2)$$

بحيث h معامل الانتقال الحراري السطحي أو معامل الحمل الحراري، ويعبر عن فعالية الحمل في نقل الحرارة (وحدته $[h]_{SI} = W/m^2 \cdot ^\circ C$).

3-2-2 الإشعاع الحراري

انتقال الحرارة بالإشعاع يتم بين سطحين، سطح باث و سطح ماص للإشعاعات الكهرومغناطيسية بعكس ما يحدث في التوصيل والحمل، الإشعاعات الكهرومغناطيسية تنتشر بدون وجود وسط مادي ناقل للحرارة، فهي تنتشر حتى في الفراغ المثالي .

قانون "ستيفان- بولتزمان"

يعبر عن التدفق الحراري المُنبث من السطح الباث :

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3 - 2)$$

بحيث: M الانبعاثية الإشعاعية للسطح الباث ($[M]_{SI} = W/m^2$)

ε معامل الانبعاث الإشعاعي للسطح الباث (بدون وحدة).

σ ثابت "ستيفان-بولتزمان" ($\sigma = 5.669 \cdot 10^{-8} (W/m^2 \cdot K^4)$).

3-2-2 التدفق الكتلي للمائع:

كمية المائع المارة خلال وحدة الزمن لها أهمية كبيرة في حساب الحرارة المنتقلة من المائع الساخن إلى المائع البارد، ووحدة الحساب الخاصة بالتدفق الكتلي يمكن ضبطها حسب الحاجة، وعلاقة التدفق الكتلي مع التدفق الحجمي هي العلاقة التالية:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (4 - 2)$$

بعض التحويلات في وحدات التدفق الحجمي:

الوحدة الأساسية تقيس التدفقات بالوحدة m^3/sec ، الوحدة المطلوبة هي L/min .

$$1 \frac{L}{min} = 1 \cdot \frac{10^{-3} m^3}{60sec} = 1.67 \times 10^{-5} m^3 / sec \quad (5 - 2)$$

2-2-4 درجات الحرارة المتوسطة للمبادل الحراري:

- وتستعمل درجة الحرارة المتوسطة للمائع البارد أو الساخن للتعويض في معادلات التي تعطي قيم الخواص الفيزيائية للمائع كالكتلة الحجمية والسعة الحرارية النوعية وغيرها.

- وتحسب درجة الحرارة المتوسطة في الوسط بين المدخل والمخرج أو أنها تساوي المجموع على 2.

- ومنه درجات الحرارة المتوسطة للساخن والبارد تعطى بالعلاقة التالية :

$$\bar{T}_H = \frac{T_{H1} + T_{H2}}{2} \quad \bar{T}_C = \frac{T_{C1} + T_{C2}}{2} \quad (6 - 2)$$

2-2-5 السعة الحرارية للمائع C:

- هي الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كمية من المائع درجة حرارة واحدة °C.

2-2-6 السعة الحرارية النوعية الكتلية للمائع c:

- هي الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كمية من المائع كتلتها $m = 1kg$ درجة حرارة واحدة °C .

- لذلك العلاقة بين السعات هي:

$$C = m \cdot c \quad (7 - 2)$$

2-2-7 السعة الحرارية في ثبوت الضغط للمائع C_p

- هي الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كمية من المائع كتلتها $m = 1kg$ كتلتها $m = 1kg$ درجة حرارة واحدة °C لكن في ثبوت

الضغط، و هي حاصل قسمة الحرارة Q المنتقلة في ثبوت الضغط على التغير في درجة

الحرارة ΔT على الكتلة الكلية للمائع.

$$c_p = \frac{C_p}{m} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} ; \quad J/K \cdot kg \quad (8 - 2)$$

8-2-2 انتقال الحرارة وميزان الطاقة والكفاءة

في المبادل الحراري قيمة الحرارة المنتقلة للمائع البارد تعطي بالعلاقة التالية :

$$Q = mC_p\Delta T \Rightarrow \dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T \quad (9 - 2)$$

في التبادل المثالي لا يكون هناك ضياع للحرارة حول المبادل الى الخارج ومنه الحرارة الممتصة \dot{Q}_a من البارد تساوي الحرارة المعطاة \dot{Q}_e من طرف الساخن اي:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_a = \dot{Q}_e = \dot{m}_H \cdot C_{pH} \cdot \Delta T_H = \dot{m}_C C_{PC} \cdot \Delta T_C \quad (10 - 2)$$

علاقة بين التدفق الكتلي \dot{m} والحجمي \dot{V} كما يلي $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$

يصبح ميزان الحرارة المثالي :

$$\dot{Q} = \dot{Q}_a = \dot{Q}_e = \rho_H \dot{V}_H C_{pH} \cdot \Delta T_H = \rho_C \dot{V}_C \cdot C_{PC} \cdot \Delta T_C \quad (11 - 2)$$

9-2-2 معامل الكفاءة الطاقوية (C_{EB} The Energy balance coefficient)

هو حاصل قسمة الطاقة الممتصة من البارد على الطاقة المنبثة من الساخن:

$$C_{EB} = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_e} \quad (12 - 2)$$

في حالة مثالية $\dot{Q}_a = \dot{Q}_e$ ومنه $C_{EB} = 1$ حالة حقيقة $\dot{Q}_a < \dot{Q}_e$ ومنه $C_{EB} < 1$

كفاءة درجة الحرارة للدورة الساخنة η_H

$$\eta_H = \frac{T_{H2} - T_{H1}}{T_{H2} - T_{C1}} \cdot 100 \quad (13 - 2)$$

كفاءة درجة الحرارة للدورة الباردة η_C

$$\eta_c = \frac{T_{C2} - T_{C1}}{T_{H2} - T_{C1}} \cdot 100 \quad (14 - 2)$$

10-2-2 الكفاءة المتوسطة

هو حاصل قسمة الطاقة الممتصة من البارد على الطاقة المنبثقة من الساخن:

$$\bar{\eta} = \frac{\eta_H + \eta_c}{2} \quad (15 - 2)$$

11-2-2 الفرق اللوغاريتمي في درجة الحرارة:

ويعطى بالعلاقة التالية

$$LMTD = \frac{(T_{H2} - T_{C2}) - (T_{H1} - T_{C1})}{\ln\left(\frac{T_{H2} - T_{C2}}{T_{H1} - T_{C1}}\right)} \quad (16 - 2)$$

12-2-2 معامل انتقال الحرارة U :

وهو معامل انتقال الحرارة عبر الجدران الناقلة للحرارة و المائع نفسه وعبارته كالتالي

$$U = \frac{\dot{Q}_e}{A \cdot (LMTD)} \quad (17 - 2)$$

3-2 انتقال الحرارة حول مجموعة من الأنابيب داخل نفق مربع المقطع

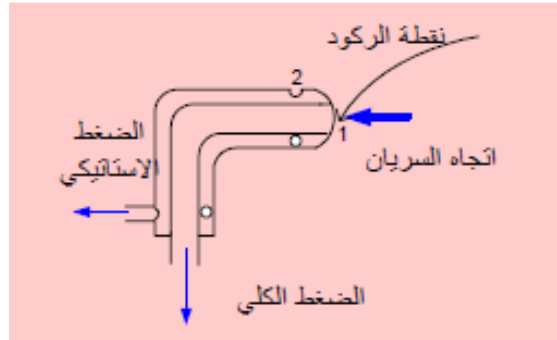
نعتمد في الدراسة على المخطط الموضح في الشكل التالي، حيث يمكن استخدام 18 عمود أو عمود واحد، اما الدراسة الحالية اعتمدت على 18 عمود، الشكل (1-2) يوضح الأبعاد الخاصة بالتجربة

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \quad (18 - 2)$$

يمكن إن يختلف باختلاف المقطع ولكن الطاقة الكلية تظل ثابتة، وهذه قاعدة ثابتة في حل كثير من التطبيقات في سريان الموائع.

2-3-2) أنبوب بيتو:

يتألف أنبوب بيتو من أنبوبة زجاجية تشكل نهايتها زاوية قائمة، كما هو مبين بالشكل يوضع أنبوب بيتو في مجرى السائل بحيث تكون فتحة نهايته نحو الاتجاه المعاكس للسريان المائع وتحدد الإشارة هنا الى أن انبوب بيتو يقيس السرعة عند النقطة التماس مع المائع فقط.



شكل (2-2): أنبوب بيتو

بتطبيق معادله برنولي بين النقطتين 1 و 2 نحصل على المعادله التالية:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \quad (19 - 2)$$

المائع عند النقطة 1 يكون في حاله سكون والتغير في الطاقة الوضع يساوي صفرا. عليه فان المعادله تختصر الى:

$$\frac{P_1}{\rho} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} \quad (20 - 2)$$

$$\frac{V_2^2}{2} = \frac{P_1 - P_2}{\rho} \Rightarrow V_2 = \sqrt{2 \frac{(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (21 - 2)$$

حيث P_2 هو الضغط استاتيكي و P_1 هو الضغط الكلي أو مجموع الضغط الستاتيكي زائد الضغط السرعة،

ويمكن توصيل أنبوب البيتو بمانومتر لقراءة فرق الضغط مباشرة كما يمكن أيضا تصميم أنبوب في شكل انبوبين متمركزين. يقيس الانبوب الداخلي منهما الضغط الكلي بينما يعطي الانبوب الخارجي الضغط الأستاتيكي من خلال الثقب في نهايته.

2-3-3 حساب الكتلة الحجمية للهواء وسرعة الهواء

يمكن حساب السرعة القصوى عند أي نقطة موضوع فيه pitot باستعمال الفرق في الضغط بين الوسط P_t والضغط في الحواف الذي يمثل انعدام السرعة نظريا أو الضغط السكوني P_u .

تتحول طاقة الضغط بين النقطتين إلى طاقة حركية بالعلاقة التالية :

$$P_t - P_u = \frac{\rho (V_1)^2}{2} \quad ; \quad P_t - P_d = \frac{\rho (V_2)^2}{2} \quad (22 - 2)$$

الكتلة الحجمية يمكن حسابها باعتبار الهواء غاز مثالي:

$$\rho = \frac{P_A}{\bar{R} \cdot T_1} \quad (23 - 2)$$

حيث T_1 هي درجة حرارة الهواء عند المدخل. و P_A هو الضغط الجوي أو البارومتري يقاس بالبارومتر.

و \bar{R} هو ثابت الغاز المثالي الخاص بالهواء و يساوي:

$$\bar{R} = \frac{R}{M} = \frac{8.31}{29.10^{-3}} = 276.55 \text{ J/Kg.K}$$

و منه يمكن حساب السرعة في المدخل والمخرج الخاص بالمقطع المدروس بالعلاقات التالية :

$$\begin{cases} V_1 = \sqrt{\frac{2(P_t - P_u)\bar{R}T_1}{P_A}} \\ V_2 = \sqrt{\frac{2(P_t - P_d)\bar{R}T_1}{P_A}} \end{cases} \quad (24 - 2)$$

2-3-4) حساب السرعة المتوسطة حول القطعة في حالة وجود جميع القطع:

كل قطعة لها قطر حوالي تقريبا 12.5 مم، ويوجد 5 قطع موضوعة ومقابلة للتيار مع وجود 5 فراغات يمر بها الهواء، ومنه المجموع الكلي للقطع المعترضة للتيار يساوي 12.5 مم مضروب في 5 و يساوي 62.5 مم.

الارتفاع الكلي للمقطع يساوي 12.5 مم مضروب في 10 (5 قطع+5 فراغات) و يساوي 125 مم .

ومنه القطع الموجودة في المدخل في العمود الأول تعترض نصف المساحة ، ونستنتج أن السرعة المتوسطة V :

$$V_1 = \frac{1}{2}V \Rightarrow V = 2.V_1 \quad (25 - 2)$$

حيث: V_1 هي السرعة المقاسة أمام القطع مباشرة وهي تساوي نصف السرعة المتوسطة الحقيقية التي من المفروض أن تمر عبر المقطع.

2-3-5) حساب معدلات التبريد بوجود قطعة واحدة.

قيمة الحرارة الضائعة من القطعة الساخنة بالتبريد الهوائي:

العلاقة هي:

$$\dot{q} = \alpha.A_1(T_2 - T_1) \quad (26 - 2)$$

خلال زمن dt هناك تبريد بقيمة dT_2 سالب يعطى بما يلي:

$$-\dot{q}dt = mcdT_2 \quad (27 - 2)$$

عند دمج المعادلتين (26 - 2) و (27 - 2) تنتج المعادلة التالية:

$$\frac{dT_2}{(T_2 - T_1)} = \left(-\frac{\alpha \cdot A_1}{mc} \right) \cdot dt \quad (28 - 2)$$

عند تكامل المعادلة الأخيرة ينتج:

$$\int_{T_0}^{T_2} \frac{dT_2}{(T_2 - T_1)} = \left(-\frac{\alpha \cdot A_1}{mc} \right) \cdot \int_{t=0}^t dt$$

$$\ln \left(\frac{T_2 - T_1}{T_0 - T_1} \right) = \left(-\frac{\alpha \cdot A_1}{mc} \right) \cdot t$$

$$\ln(T_2 - T_1) = \left(-\frac{\alpha \cdot A_1}{mc} \right) \cdot t + \ln(T_0 - T_1) \quad (29 - 2)$$

بالمطابقة بين العلاقة النظرية ومعادلة المستقيم نجد:

$$b = \frac{-\alpha A_1}{m_c} = \text{slope} \Rightarrow \alpha = \frac{-b m_c}{A_1} \quad (30 - 2)$$

لاستعمال اللوغاريتم العشري لدينا التحويل التالي:

$$\log_{10} N = \frac{\ln N}{\ln 10} = \frac{\ln N}{2,3026}$$

m : كتلة القطعة من النحاس مكتوبة على نهاية الحافة الخشبية.

A_1 : مساحة سطح الانتقال الحراري على القطعة التي على شكل أسطوانة.

2-3-6) النمذجة الالبعدية لانتقال الحرارة بالحمل القصري حول أسطوانة أفقية :

نقصد بالنمذجة هو إيجاد علاقة رابطة بين مقادير فيزيائية و اعتبار تلك العلاقات نماذج شبه تجريبية لذلك النظام.

نعتبر البعد الخاص بالنظام هو قطر الأسطوانة (الأنبوب) الساخنة d

إن الأرقام الالبعدية الداخلة في العلاقات الرياضية المفسرة للظواهر الفيزيائية قي أرقام مقارنة بين ظاهرتين أو أكثر ومن بينها تلد الارقام المستعملة في الظاهرتين إنتقال الحرارة و الكتلة وكمية الحركة نجد: رينولدز، نيوسالت، وبرانتل (Tansley et al. 2001).

لتعريف هذه الارقام نعرف الابعاد الفيزيائية التالية:

X : البعد الخاص بالسريان في نظام سريان.

d : نصف قطر الماسورة خاصة بالسريان المائع.

S : السمك طبقات الحديدية التحريكية الحرارية الكتلية.

L : طول الصفيحة المستوية.

رقم رينولدز:

الاسس الفيزيائية لرقم رينولدز :

عندما يسري مائع في انبوب بسرعة محددة ولتكون في إي لحظة وجود نوعين من القوى تؤثر على هذا المائع قوة إستمرارية السريان تسمى قوة القصور الذاتي وهي تتناسب مع الكثافة ومربع السرعة. وقوة أخرى تقاوم الاجهاد القص وهي ما يعرف بقوة اللزوجة وتتناسب هذه القوة طرديا مع السرعة واللزوجة العكسيا مع قطر الانبوب. والنسبة بين القوة القصور الذاتي الى قوة اللزوجة هي ما يعرف برقم رينولدز وعليه فان رقم رينولد يعطي بالمعادلة التالية:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (31 - 2)$$

حيث:

ρ هي كثافة المائع.

μ هي لزوجة المائع

واضح انه كلما زادت قوى القصور الذاتي نسبة لقوى اللزوجة كلما اقترب السريان المائع من حالة الاضطراب وكلما زادت قوة اللزوجة على حساب قوى القصور الذاتي كلما كان السريان هادئا واقترب من السريان الرقائقي ولذلك الكثير ما يسمى بالسريان الرقائقي بالسريان اللزج.

تحدد قيمة رقم رينولدز نوع انسياب المائع . فعندما تكون قيمه رينولدز اصغر من أوتساوي 2100 يكون الانسياب رقائقا .وعندما تكون قيمه رينولدز أكبر أو تساوي 10,000 فان الانسياب يسمى انسيابا مضطرب أو دواميا . وعندما يكون رقم رينولدز أكبر من 2000 أو أصغر من 2300 فان الانسياب يسمى انسيابا انتقاليا اي بين الرقائق والمضطرب.

(قوة اللزوجة)/(قوة العطالة)

$$Re = X = \frac{\rho U_x}{\mu} = \frac{\rho U^2 / x}{\frac{\mu U}{x^2}} \quad (32 - 2)$$

يقارن بين قوه العطاله للماء وعمل قوة اللزوجة في بعد خاص للسريان الماء ونجد بعد اخذ مرجع لقياس هذا البعد في حاله السريان داخل انبوب او قناة السريع d يساوي x الخاص.

رقم نيوستال: وله ثلاثة اشكال حسب هندسة النظام:

العلاقة 1: كميته حرارة المتبادلة بالتوصيل /كمية الحرارة المتبادلة بالحمل

$$Nu = \frac{hs. \Delta T}{\lambda. s. \left(\frac{\Delta T}{x}\right)} = \left(\frac{hx}{\lambda}\right) \quad (33 - 2)$$

العلاقة 2: متوسط التدرج درجة الحرارة /التدرج درجة الحرارة على الجدار

$$Nu = \frac{\left(-\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0}}{\frac{\Delta T}{L}} \quad (33 - 2)$$

العلاقة 3: سمك طبقة الحدية الحرارية / طول الصفيحة المستوية

$$Nu = \frac{L}{\delta} \quad (34 - 2)$$

رقم برانتل:

يقارن بين انتشار مقدارين فيزيائيين حرارة والكتلة، ونقصد بانتشار الحرارة هو التوصيل الحراري وانتشار كتلة الجزئي للمادة. ويقارن كذلك بين التوزيع السرعة الخطية وتوزيع درجة الحرارة.

(الانتشارية الحرارية)/(الانتشارية الحركية)

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/(\frac{C_p}{\rho})} = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad (35 - 2)$$

4-2) انتقال الحرارة عبر مجموعة من الأنابيب والنماذج المقترحة:

نموذج 1: تم اقتراحه (بسيط وبدون معامل شكل):

هذا النموذج يعتمد على الأرقام اللابعدية فقط وصياغته هي:

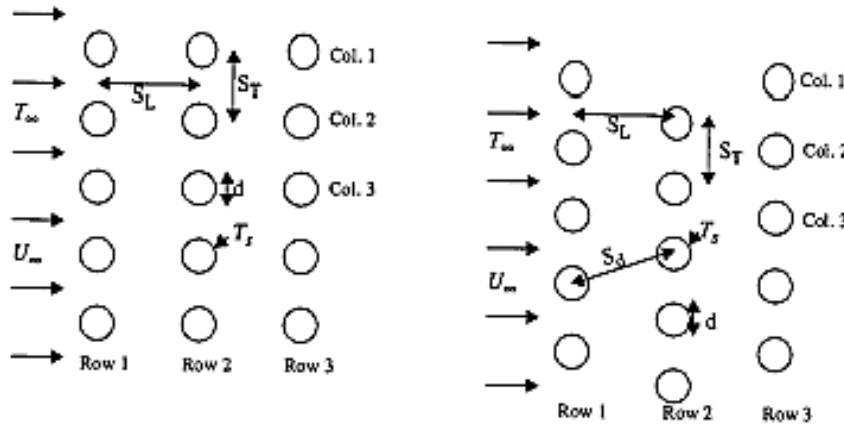
$$Nu_d = C \cdot Re_d^m Pr^n \quad (36 - 2)$$

نموذج 2: تم اختياره لصدق النموذج 1 المقترح

هذا النموذج أقرح من طرف الباحث ((zukauskas(1987): وهو من استخدام مجموعة من الانابيب في المبادلات الحرارية. يعتمد مدى التعديل على التباعد بين الأنابيب يوصي الباحث بالشكل:

$$Nu_d = \hat{C} \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^p Re_d^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25} \quad (37 - 2)$$

في المعادلة (2-36) يتم تقييم جميع الخصائص بالمتوسط الحسابي لدرجات حرارة مدخل ومخرج المائع، باستثناء Pr_s التي يتم تقييمها عند درجة حرارة السطح T_s . يتم إعطاء قيم الثوابت \hat{C} و p و m و n في الجدول (2-1) للترتيب المتدرج (staggered arrangement).



الشكل (2-3): ترتيبان لمجموعة أنابيب. ترتيب منظم على اليمين والترتيب غير منظم (متداخل) على اليسار .

$$(a = S_T / d ; b = S_L / d.)$$

الجدول (2-1): الترتيب غير المنتظم (متداخل) - قيم الثوابت في المعادلة (2-36)

Re_d	C	P	N	M
1-500	1.04	0	0.4	0.36
500-1000	0.71	0	0.5	0.36
$10^3 - 2 \times 10^5$	0.35	0.2	0.6	0.36
$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0.031	0.2	0.8	0.36

في الحساب يتم استخدام الحد الأقصى لمتوسط السرعة بين الأنابيب. السرعات القصوى للترتيبات المنظمة وغير المنظمة والمتداخلة التي يتم تقديمها بواسطة (Lefevre et al. 1949):

$$U_{max} = \frac{U_{\infty} S_T}{S_T - d} \quad (37 - 2)$$

$$S_d > \frac{S_T + d}{2} \quad U_{max} = \frac{U_{\infty} S_T}{S_T - d} \quad (38 - 2)$$

$$S_d < \frac{S_T + d}{2} \quad U_{max} = \frac{U_{\infty} S_T}{2(S_d - d)} \quad (39 - 2)$$

$$S_d = \left[S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (40 - 2)$$

الفصل الثالث

دراسة تجريبية لمبدل حراري متقاطع

يحتوي هذا الفصل على مختلف التجارب العلمية التي تم دراستها في هذا البحث والمتمثلة في

- التجربة 1 : حساب الضغط وسرعة الهواء حول مجموعة من الأنابيب.
 - التجربة 2 : توزيع السرعة حول مجموعة من الأنابيب.
 - التجربة 3 : التحقق من معدلات التبريد.
-

1) مقدمة الفصل الثالث

التجارب العلمية لهذا البحث تمت في مخبر الطاقات المتجددة للمناطق الصحراوية (LENREZAS) -قسم الفيزياء بكلية الرياضيات وعلوم المادة- بجامعة ورقلة، والتجارب إعدمت لوضع نماذج شبه تجريبية يمكن الاستفادة منها ومقارنتها مع نماذج تجريبية سابقة.

وفي علم الانتقال الحراري يتم الاعتماد دوما على المبدلات الحرارية، وكل دارس لهذه المبدلات يجب أن يلم بمبادئ التبادل الحراري. وذلك لاختيار أحسن وأفضل انتقال يحققه أي نظام، ونعتمد على مبادئ في علم ميكانيك الموائع لتدعيم الجانب الحراري، ومن أهم تصنيف لأنظمة المبدلات الحرارية نجد التالي:

1. النظام المتوازي. Parallel-Flow system

2. النظام المتعاكس. Conter-Flow system

3. النظام المتقاطع. Cross-Flow system

2) النماذج الأولية للأجهزة التجريبية

جهاز التجربة مصنع من طرف شركة TQ الذي يحمل رقم TE93 الخاص بالانتقال الحراري المتقاطع بالحمل القصري، مع سرعة ناتجة من مروحة كهربائية ثابتة السرعة على طول النفق كما في الشكل الموضح للجهاز (مع صمام يغير السرعة حسب الضرورة) و وجود واجهة شفافة مدعومة بجوانب من الزجاج و حواف معدنية، ولدنا قطعة من النحاس الأصفر تأخذ مواضع مختلفة في هذا النفق (المقطع المدروس) وتسخن خارجيا في الوحدة الأساسية للتحكم و القياس. درجات الحرارة مقاسة بالمزدوجات الحرارية، والضغط مقاسة بمانومتر (بيتو) و أنابيب موصولة بالمقطع المدروس التي بدورها تعطي نتائجها لجهاز الوحدة الأساسية للقياس، والسرعة تتغير بصمام موصول بالمخرج في نهاية النفق .

3) مبدأ العمل للجهاز: يعتمد على حساب درجات الحرارة و الضغوط بجوار القطعة النحاسية الساخنة ومعرفة الضياع في الحرارة بجانبها و حسب موقعها و سرعة الهواء وغيرها من المتغيرات. ومعرفة مظهر السرعة من المدخل إلى غاية المخرج في المقطع المدروس.

4) أجهزة القياس المستعملة في التجارب : جهاز التجربة ينقسم إلى قسمين :

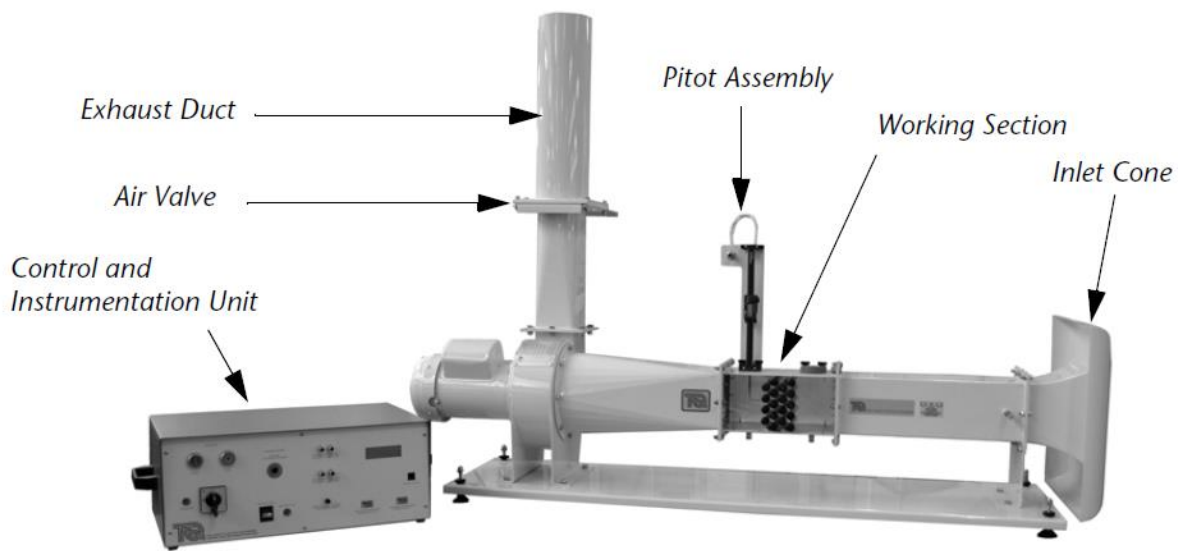
1. الوحدة الأساسية للمراقبة و القياس.

2. مجموعة الأنابيب تحوي قطع أسطوانية من الألمنيوم .

4-1) الوحدة الأساسية للمراقبة و القياس مختصة فيما يلي:

- تتحكم في تغذية المروحة بالأمر ON/OFF.

- تتحكم في تسخين قطعة النحاس (على شكل أسطوانة لها أبعاد معينة) محل الدراسة.
- تقيس الضغوط في نقاط محددة من المقطع المدروس من الأنبوب.
- تقيس درجات الحرارة في نقاط محددة من المقطع المدروس من الأنبوب.
- لديها شاشة صغيرة تعطي قيم الضغوط و درجات الحرارة المقاسة.
- تحوي على جميع الدارات الكهربائية المغذية للواحد التجريفة.
- و لها قدرة الارتباط بالكمبيوتر بواجهة إلكترونية تسمى VDAS



الشكل (1-3) جهاز يحمل رقم TE93 من الشركة TQ الخاص بالانتقال الحراري المتقاطع بالحمل القصري

2-4) مجموعة الأنابيب تحوي ما يلي :

- مدخل على شكل قمع مخروطي يسمح بدخول الهواء (يمنع وضع أجسام قرب المدخل) .
- مزدوجة حرارية عند مدخل الأنبوب لقياس درجة حرارة الهواء T_1 .
- المقطع المدروس عبارة عن أنبوب مربع المقطع .
- محرك كهربائي يدير مروحة سحب الهواء.
- مخرج مزود بصمام تعديل السرعة.

3-4) جهاز قياس درجة الحرارة (المزدوجات الحرارية- Thermocouples) : وهي عبارة عن زوج من المعدن على شكل سلكين ملتحمين التحاماً ذاتياً، تربط كل مزدوجة حرارية بجهاز ميلي فولطمتر خاص، به شاشة

رقمية يحول هذا الجهاز درجة الحرارة إلى تيار كهربائي، يقرأ على إثره قيمة درجة الحرارة في المكان الموضوعه فيه المزدوجة. وكان عدد المزدوجات كافيا لكي نقيس درجة الحرارة في كل السطوح والمواضع في النماذج الأولية.

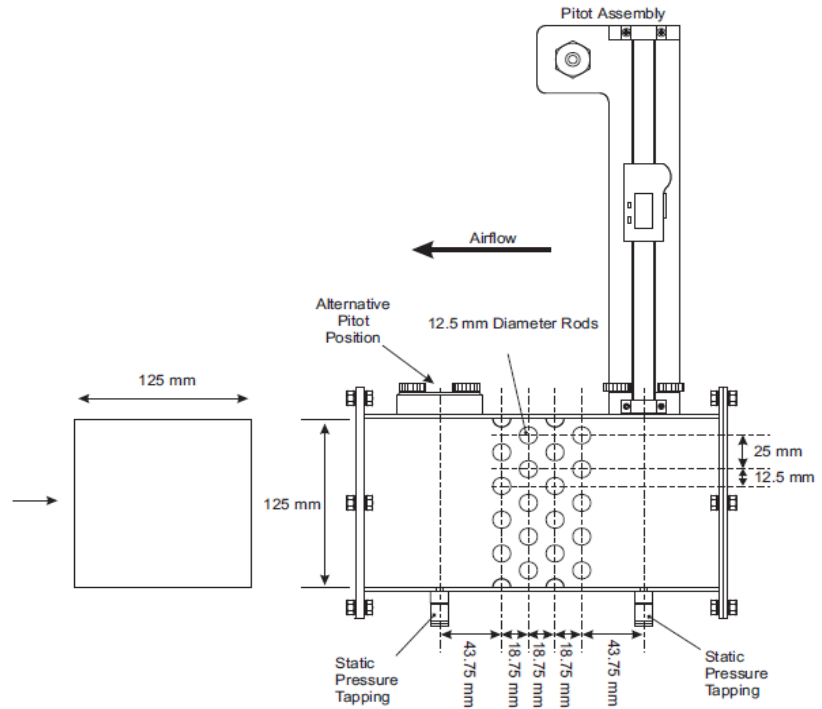
(5) طريقة عرض القياسات على الشاشة:

- يتم عرض درجات الحرارة كما يلي؛ T1 تمثل المدخل ، T2 تمثل القطعة الساخنة.
- أما الضغط فله الإشارات + و - .

- جهاز قياس الضغط الجوي(البارومتر-Baromètre) : لقياس الضغط الجوي نستخدم البارومتر وهو يقيس الضغط المطلق في المنطقة التي تمت فيها التجربة

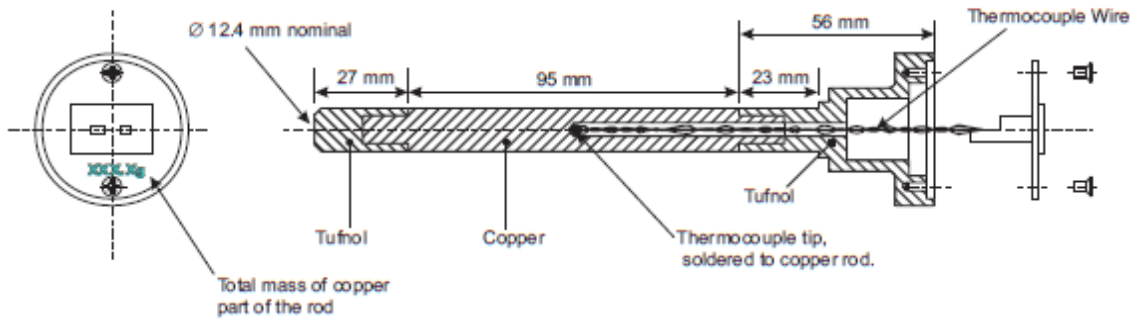
(6) الأدوات المستعملة في التجارب :

- انابيب و مانومتر (بيتو pitot) يقيس الضغط السكوني واحدة في الدخول و الاخرى في المخرج وهي اساس لقياس سرعة الهواء أنبوب.
- (pitot) له موضعين (1 في المدخل و 2 في المخرج). ويجب تحديد الموضع و التأكد منه قبل القراءة. أنبوب (pitot) له زالقة تحدد الموقع الرأسي بالنسبة للمقطع، هذه الزالقة مزودة بشاشة إلكترونية قابلة للتحويل للصفر في أي مكان يعتبر مرجع للصفر في المقطع.



الشكل (2-3) رسم تخطيطي لأبعاد المبدل الحراري المتقاطع الخاصة بالتجربة

- قطعة النحاس لها الابعاد التالية الطول الفعلي الذي يتعرض للهواء يساوي 95 مم ، وله حافتين تحملانه على المقطع طولهما 23مم و الأخرى 27 مم. مزودة بمزدوجة حرارية في الوسط لقياس درجة الحرارة. لها قطر خارجي يساوي 12.4مم . و منه يمكن حساب المساحة الجانبية بعلاقة بسيطة تعتمد على كون هذه القطعة أسطوانة.
- تسخين قطعة النحاس : يتم إلى غاية 75°C تقريبا و يتم قطع التغذية أوتوماتكيا لحماية هذه القطعة من الزيادة في درجة الحرارة. تحمل القطعة الكتلة m على الجانب الخارجي لهذه القطعة.



الشكل (3-3) رسم تخطيطي لأبعاد قطعة النحاس (Total mass of copper part of the rod)

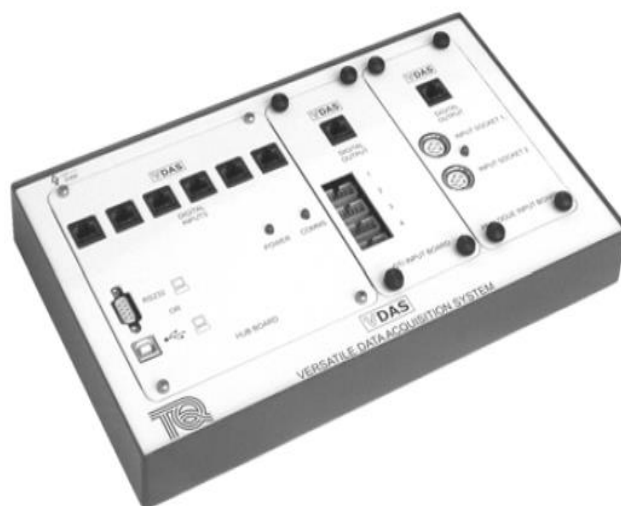


الشكل (3-4): مقياس صمام الهواء في المروحة

- الواجهة الإلكترونية (Versatile Data Acquisition System-VDAS) له الجهة التالية في الكمبيوتر.



الشكل (3-5) الواجهة الإلكترونية (VDAS)



الشكل (3-6) جهاز VDAS-B

7) التجارب

7-1) التجربة الاولى : حساب الضغط وسرعة الهواء حول مجموعة من الأنابيب

وصف التجربة الأولى: تهدف التجربة الى تحديد الضياع في الضغط عبر القطع داخل المقطع المدروس و رسم مخطط لهذا الضغط وتحديد قيمة سرعة الهواء عند المدخل وكذلك السرعة المتوسطة عند المقطع المدروس.

خطوات العمل:

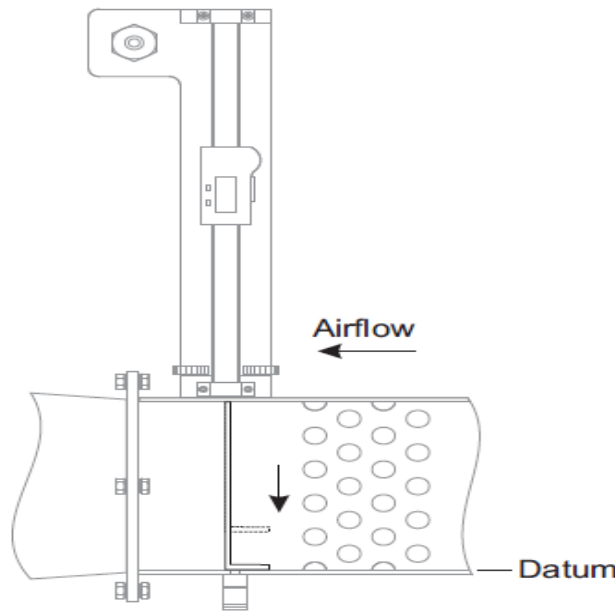
- تم وضع كل القطع من الألمنيوم في المواقع المخصصة لها و وضع pitot في الوسط دوما أمام القطعة الساخنة، وألصق أنابيب قياس الضغط في نقطة التيار المرتفع (upstream)، ونقطة التيار المنخفض (downstream).
- لقياس الضغط المرتفع P_u الخاص ب upstream عند مدخل المقطع المدروس.
- و لقياس الضغط المنخفض P_d الخاص ب downstream عند مخرج المقطع المدروس.
- نقوم بربط أنبوب قياس الضغط P_u الخاص ب upstream في وحدة القياس عند 2 INPUT في (+)
- وربط أنبوب قياس الضغط P_d الخاص ب downstream في وحدة القياس عند 2 INPUT في (-)
- ونربط أنبوب قياس الضغط P_t الخاص ب pitot في وحدة القياس عند 1 INPUT في (+).
- عند وضع pitot في الوضعية 1 في مدخل المقطع نربط (-) عند 1 INPUT بالوصلة على شكل حرف T ب P_d الخاص ب downstream. و عند وضع pitot في الوضعية 2 في مدخل المقطع نربط (-) عند 1 INPUT بالوصلة على شكل حرف T ب P_u الخاص ب upstream .
- و ذلك راجع لأن . الوضعية 1 في المقطع المدروس تقابل P_d الخاص ب downstream .
- . الوضعية 2 في المقطع المدروس تقابل P_u الخاص ب upstream .
- نقوم بفتح وحدة المراقبة و القياس و نتأكد أن قفل (Heater power) في وضعية (off).
- اضغط على قفل الخاص بالصفير بالنسبة للضغط المسمى (press and hold to zero pressure reading)
- نفتح صمام المروحة 100% ، ثم شغل المروحة.

7-2) التجربة الثانية : توزيع السرعة حول مجموعة من الأنابيب

وصف التجربة الثانية : تهدف الى تحديد توزيع السرعة (مظهر السرعة) في منطقة التيار المنخفض الخاصة بالقطع.

خطوات العمل

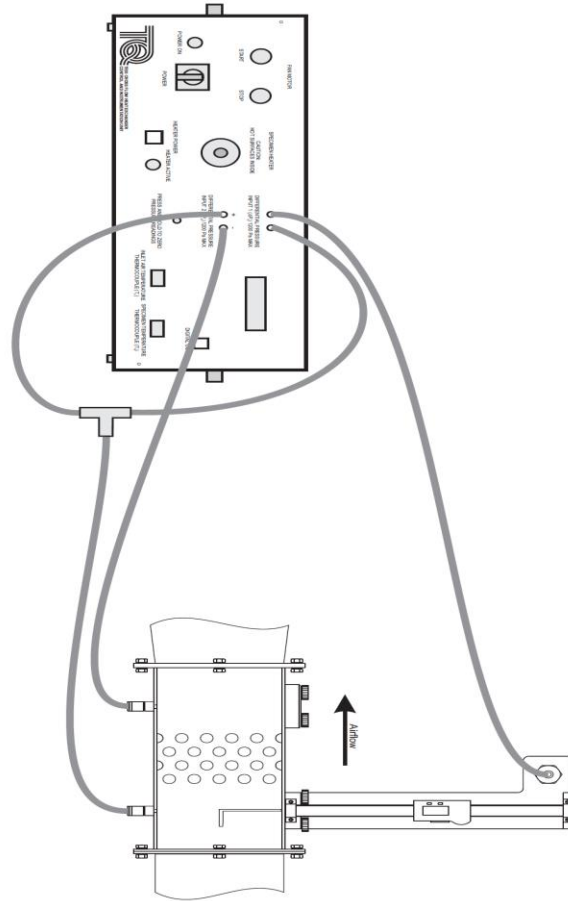
وضع كل القطع من الألمنيوم في المواقع المخصصة لها و وضع Pitot في خلف القطع النقطة 2 ونربطه عند الإشارة (+) في وحدة المراقبة و القياس عند INPUT1 , وكذلك نربط نقطة Downstream عند الإشارة (+) في وحدة المراقبة و القياس عند INPUT1، نضع pitot في الأسفل حسب الرسم، و نحول شاشة pitot إلى الصفر.



الشكل (7-3) : جهاز بيتو وطريقة تحريكه من الأعلى إلى الأسفل

بما أن أنبوب pitot له قطر يساوي 2 مم فإنه عندما يؤثر pitot إلى 2 مم فإن البعد الفعلي فوق السطح السفلي هي القيمة 1 مم، دائما هناك 1 مم منقوص من قيمة المؤشر، نشغل وحدة المراقبة و القياس و نغلق قفل التسخين، ونضغط على قفل تعديل الضغط إلى صفر قبل تشغيل المروحة، ونحدد 100% لصمام المروحة، نقوم بتسجيل درجة حرارة الجو و الضغط الجوي، ونحرك pitot ب 3 مم في كل مرة ونسجل الفرق في درجة الحرارة عند

INPUT1



الشكل (8-3): رسم تخطيطي يوضح التوصيلات الأساسية لأنابيب الضغط

7-3 التجربة الثالثة: التحقق من معدلات التبريد

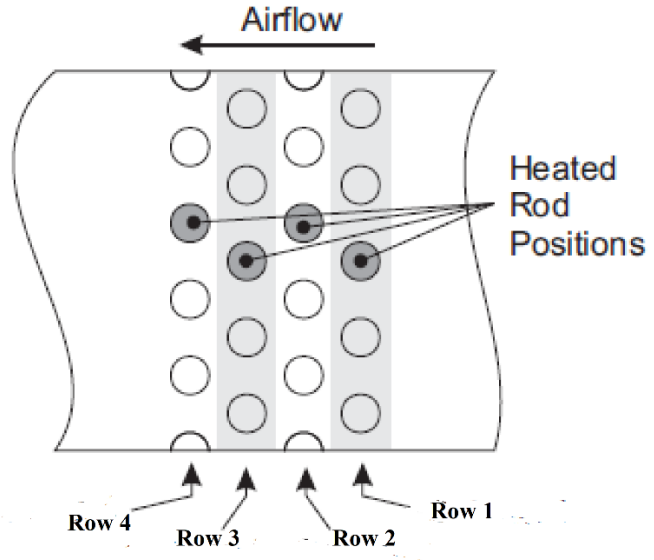
وصف التجربة الثالثة: تهدف التحديد معدلات التبريد من قطعة ساخنة في حالة وجود جميع القطع و في حالة وجود القطعة لوحدها ورسم مخطط الموضع لمنحني التبريد و تحديد معامل الانتقال الحراري α في مواضع مختلفة للقطعة الساخنة بالنسبة للقطع الأخرى.

خطوات العمل:

الطريقة 1 : معدلات التبريد بوجود جميع القطع.

نقوم بوضع كل القطع من الألمنيوم في المواقع المخصصة لها، و وضع pitot في الوسط دوما أمام القطعة الساخنة، نترك فراغ حر لوضع القطعة الساخنة فيه، وليكن في البداية عند العمود الأول في الوسط، نقوم بتشغيل وحدة المراقبة و القياس و وضع القطعة النحاسية في مكانها لإجراء عملية التسخين، ونقوم كذلك بتشغيل القفل الخاص بالتسخين (Heater)

(power) فيشتغل الضوء الأخضر، مع مراعاة مواضع المزدوجات الحرارية. نفتح صمام المروحة 100% و نسجل القيم كل 10 ثواني حتى تكمل 2 دقيقة ونصف. ونقوم باعادة القياس بتشكيل مجموعة من الجداول الخاص ب 10%، 20%، 30%، 40%، 50%، 60%، 70%، 80%، 90% . نعيد نفس الجداول من أجل المواضع الثلاثة الباقية مع عدم ترك أي ثقب فارغ بدون قطعة. في الاخير نغلق جميع الأجهزة.



الشكل (9-3): رسم تخطيطي يوضح تموضع جميع الأعمدة وضبط عمود التسخين في موضع المنبع المركزي

الفصل الرابع

تحليل النتائج

يحتوي هذا الفصل على مختلف النماذج المقترحة في هذا البحث

- التجربة الأولى : معايرة السرعة والضغط في المبادل الحراري.
 - التجربة الثانية : دراسة مظهر السرعة ومناطق الانضغاط والتخلخل.
 - التجربة الثالثة : دراسة معدلات التبريد الحراري في المبادل الحراري.
-

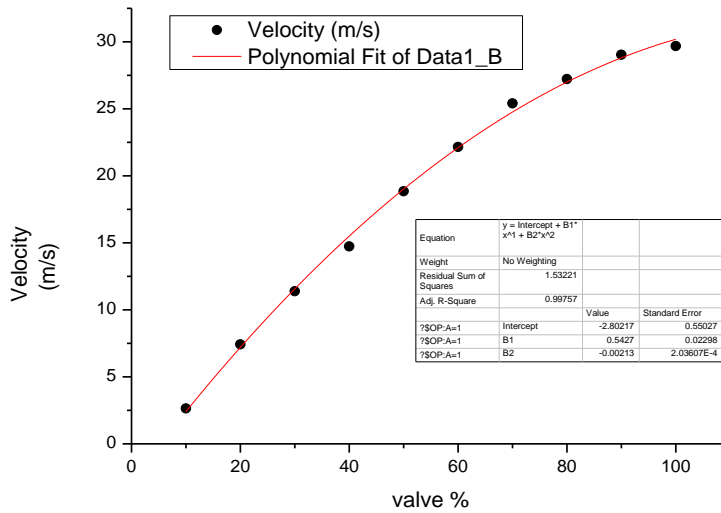
1 مقدمة الفصل الرابع:

بعد الدراسة التجريبية لمبادل حراري متقاطع به نفق هوائي ومجموعة من الأعمدة المموضعة بشكل متراكب، استنباط المنحنيات من التجارب الثلاث وتفسير النتائج منها، وكانت النتائج كما يلي:

2 التجربة الأولى: معايرة السرعة والضغط في المبادل الحراري.

1-2 حساب وسرعة الهواء حول مجموعة من الأنابيب

في التجربة الأولى تم تغيير الصمام وحساب السرعة بالمعادلة (2 - 24) في الفصل الثاني وكانت النتائج كما هي في الشكل (1-4).



الشكل (1-4): منحنى تغيرات السرعة V بدلالة الصمام (التجربة 01).

تفسير المنحني: المنحني في الشكل (1-3) يمثل تغيرات السرعة V بدلالة الصمام، حيث يتضح أن السرعة تزداد كلما زادت نسبة الصمام، ومنه يمكن القول إن هناك علاقة طردية بين السرعة ونسبة الصمام. وسوف يستخدم النموذج المستنبط من هذا المنحني في معرفة السرعة مباشرة وذلك بمعرفة نسبة الصمام.

ومن خلال المنحني نستنتج أن النموذج سوف يكون خطيا وعلاقته: (حيث x تعبر عن قيمة الصمام)

$$V = A + (B_1)x + (B_2)x^2$$

$$V = 2.80217 + (0.5427)x + (-0.00213)x^2$$

جدول (4-1) : القيم الخاصة بالنموذج المستنتج لتغيرات السرعة V بدلالة الصمام

	A	B_1	B_2
Value	2.80217	0.5427	-0.00213
Standard Error	0.55027	0.02298	$2.03607 \cdot 10^{-4}$
R-square	$R^2 = 0.99757$		

نموذج ذو مصداقية عالية

وهذا النموذج صالح لجهاز التجربة بعينه، ويتغير مع تغير الجهاز ويعتبر معايرة لقيمة السرعة بدلالة قيمة الصمام.

والجدول (4-2) يلخص جميع قيم السرعة الممكن استنتاجها من معرفة قيمة الصمام.

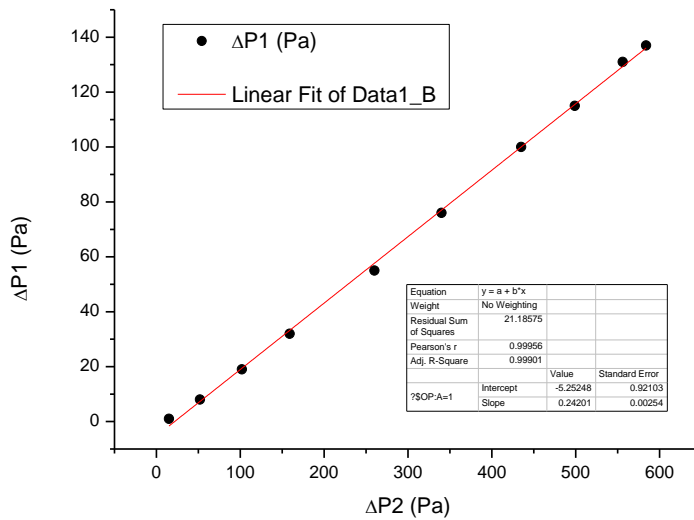
جدول (4-2) : قيم السرعة V بدلالة قيم الصمام (%) باستخدام النموذج المستنتج

Valve (%)	V	Valve (%)	V	Valve (%)	V	Valve (%)	V
1	3.34274	26	15.47249	51	24.93974	76	31.74449
2	3.87905	27	15.9023	52	25.26305	77	31.9613
3	4.4111	28	16.32785	53	25.5821	78	32.17385
4	4.93889	29	16.74914	54	25.89689	79	32.38214
5	5.46242	30	17.16617	55	26.20742	80	32.58617
6	5.98169	31	17.57894	56	26.51369	81	32.78594
7	6.4967	32	17.98745	57	26.8157	82	32.98145
8	7.00745	33	18.3917	58	27.11345	83	33.1727
9	7.51394	34	18.79169	59	27.40694	84	33.35969
10	8.01617	35	19.18742	60	27.69617	85	33.54242
11	8.51414	36	19.57889	61	27.98114	86	33.72089
12	9.00785	37	19.9661	62	28.26185	87	33.8951
13	9.4973	38	20.34905	63	28.5383	88	34.06505
14	9.98249	39	20.72774	64	28.81049	89	34.23074
15	10.46342	40	21.10217	65	29.07842	90	34.39217
16	10.94009	41	21.47234	66	29.34209	91	34.54934
17	11.4125	42	21.83825	67	29.6015	92	34.70225
18	11.88065	43	22.1999	68	29.85665	93	34.8509
19	12.34454	44	22.55729	69	30.10754	94	34.99529
20	12.80417	45	22.91042	70	30.35417	95	35.13542
21	13.25954	46	23.25929	71	30.59654	96	35.27129
22	13.71065	47	23.6039	72	30.83465	97	35.4029
23	14.1575	48	23.94425	73	31.0685	98	35.53025
24	14.60009	49	24.28034	74	31.29809	99	35.65334
25	15.03842	50	24.61217	75	31.52342	100	35.77217

2-2) حساب التغير في الضغط حول مجموعة من الأنابيب

في التجربة الأولى تم تغيير الصمام وحساب قيمة الضغط بشكل مباشر من الوحدة المركزية الموضحة في الشكل (3-1) والشكل (3-8) في الفصل الثالث، والتغير في الضغط المحسوب في الوحدة المركزية ينقسم إلى نوعين ؛ التغير الشاقولي $\Delta P1$ والتغير الأفقي $\Delta P2$ ، ومن الفصل الثاني تم تعريف هذه الفروق في المعادلة (2-22).

والسؤال المطروح في هذه التجربة: كيف يتغير الشاقولي بدلالة الأفقي في هذا النفق الهوائي؟ وذلك عند تغيير السرعة V . وبعد الحسابات وكانت النتائج مدونة في المنحني الموضح في الشكل (3-2).



الشكل (4-2) : تغيرات الفرق في الضغط $\Delta P1$ بدلالة $\Delta P2$ (التجربة 01).

تفسير الشكل (4-2) : المنحني في الشكل (3-2) يمثل تغيرات الفرق في الضغط $\Delta P1$ بدلالة $\Delta P2$ ، حيث يتضح أن العلاقة خطية، ومنه يمكن القول إن هناك علاقة طردية بين $\Delta P1$ و $\Delta P2$. والنموذج المستنبط

$$(P_t - P_u) = 0.24201(P_u - P_d) - 525248$$

جدول (4-3) : القيم الخاصة بالنموذج المستنتج لتغيرات الفرق في الضغط $\Delta P1$ بدلالة $\Delta P2$

	A	B
Value	525248	0.24201
Standard Error	0.92103	0.00254
R-square	$R^2 = 0.99901$	نموذج ذو مصداقية عالية

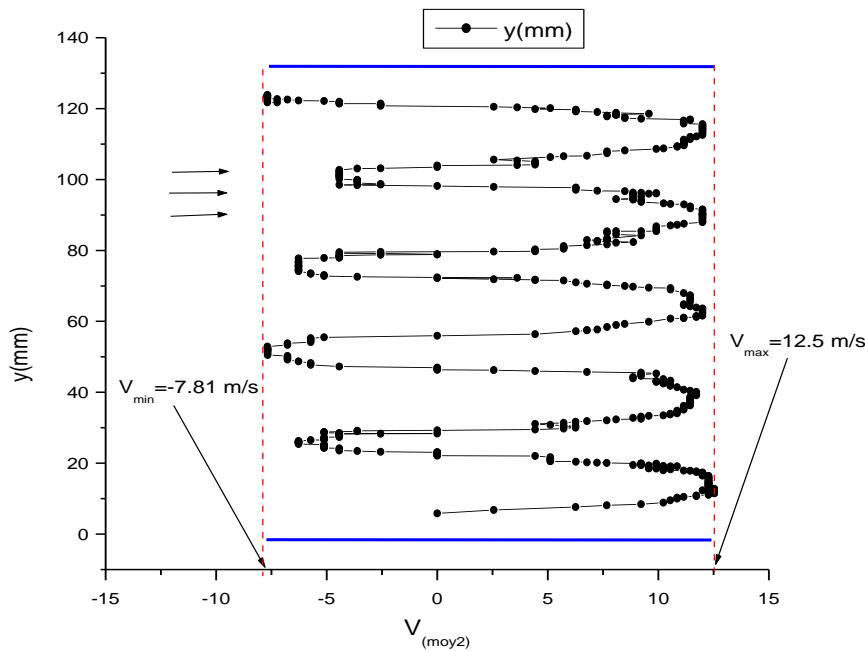
3 التجربة الثانية: دراسة مظهر السرعة ومناطق الانضغاط والتخلخل

يقصد بالانضغاط هو الضغط الموجب والمحرك في اتجاه الحركة، أما التخلخل فهو ناتج من الضغط السالب وهو معاكس للحركة ومقاوم للتيار الهوائي في المبادل الحراري.

3-1 توزيع السرعة حول مجموعة من الأنابيب:

تهدف هذه التجربة الى تحديد توزيع السرعة (أي مظهر السرعة) في منطقة التيار المنخفض الخاصة بالقطع. والتجربة موضحة في الفصل الثالث في الفقرة (2-7).

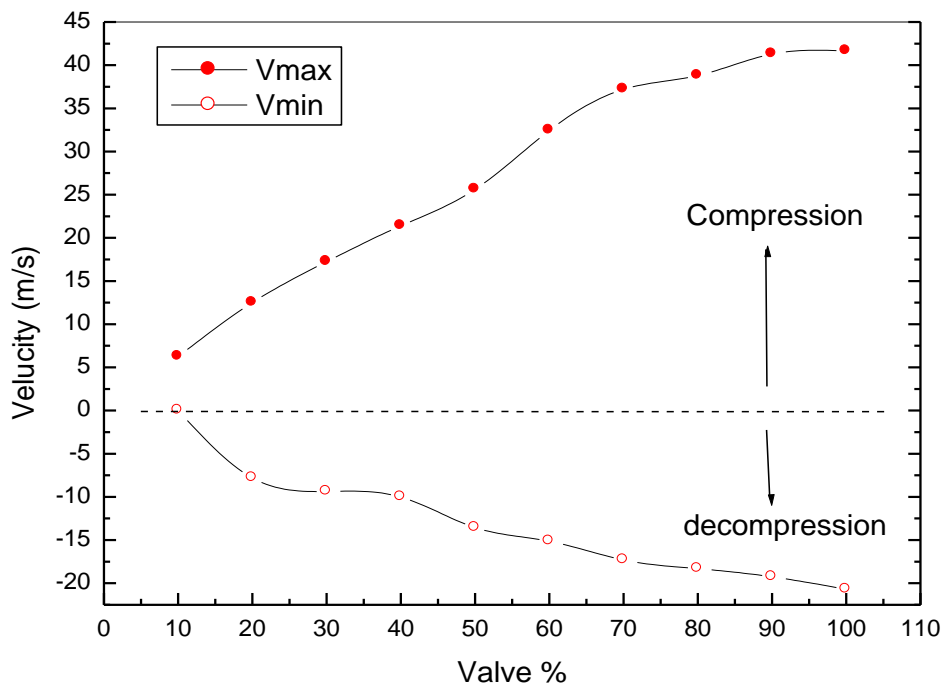
والنتائج موضحة في الشكل (3-4)، حيث أن العملية تكررت 10 مرات، من أجل كل قيمة للصمام. ومن الشكل يتضح لدينا أن هناك منطقتين؛ منطقة انضغاط تكون فيها السرعة موجبة ومنطقة تخلخل تكون فيها السرعة سالبة (أي عكس حركة الهواء)، وهناك قيمتين تحدان السرعة، V_{max} في جهة الانضغاط و V_{min} جهة التخلخل، ومن أجل قيم الصمام المأخوذة في التجربة كانت النتائج متشابهة في الشكل لكن تختلف في قيم السرعة القصوى والسرعة الدنيا. والنتائج مدونة في الجدول (4-4)



الشكل (3-4): منحنى تغيرات V_{moy2} بدلالة y موضع جهاز بيتو (التجربة 02).

جدول (4-4) : قيم السرعة العظمى V_{max} و السرعة الصغرى V_{min}

Valve (%)	V_{max}	V_{min}$	|V_{max}| - |V_{min}|$	$(|V_{max}| - |V_{min}|)/|V_{min}|$
10	6.25	0.0043	6.2457	1452.488
20	12.5	-7.81	4.69	0.600512
30	17.24	-9.38	7.86	0.837953
40	21.39	-10.03	11.36	1.132602
50	25.62	-13.55	12.07	0.890775
60	32.45	-15.13	17.32	1.144746
70	37.21	-17.31	19.9	1.149624
80	38.81	-18.32	20.49	1.11845
90	41.29	-19.27	22.02	1.142709
100	41.65	-20.71	20.94	1.011106



شكل (4-4): تغيرات السرعة العظمى V_{max} و السرعة الصغرى V_{min} بدلالة قيمة الصمام (التجربة 2).

تفسير النتيجة: جهة الانضغاط تكون السرعة موجبة يعني في اتجاه حركة التيار الهوائي، أما جهة التخلخل فتكون السرعة سالبة وعكس اتجاه التيار الهوائي، والسرعة جهة الانضغاط لها قيم أكبر من جهة التخلخل، كما هو موضح في

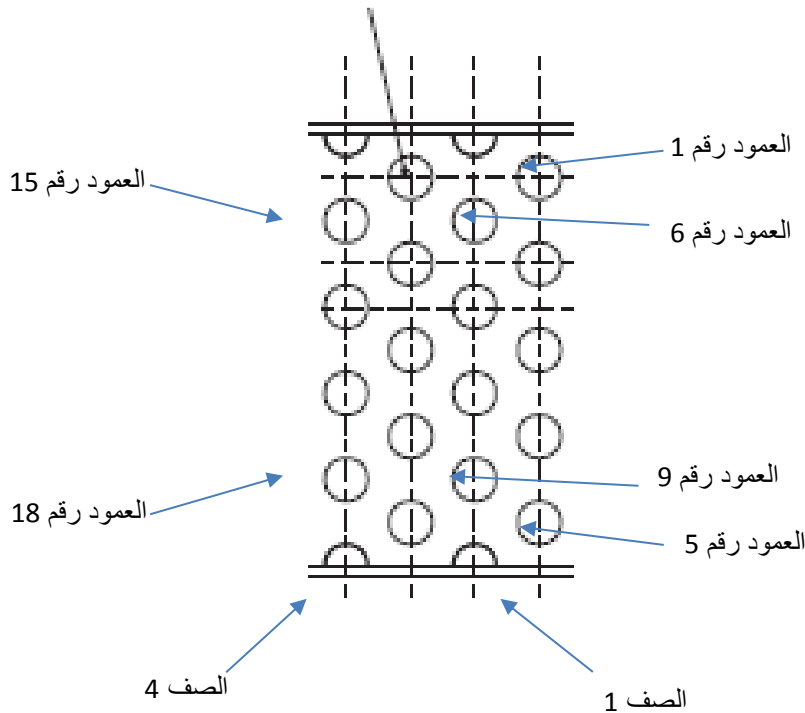
الجدول (4-4) الزيادة في قيمة السرعة بين الانضغاط والتخلخل يتراوح بين 1.01 إلى 1.14 ما عدا قيمة الصمام 10% التي كانت السرعة ضعيفة ولم تعطي نسبة مقبولة.

وهذه الدراسة تعطينا فكرة عن تصميم المبادل الذي يلائم سرعة الهواء المناسبة للتقليل من التخلخل والدوامات التي تحدث في النفق الهوائي لهذا المبادل.

3) التجربة الثالثة: دراسة معدلات التبريد الحراري في المبادل الحراري

تهدف التجربة لوضع نماذج شبه تجريبية تربط بين الأرقام اللابعدية الخاصة بالنظام، وهذه النماذج عند وضعها وضبطها يمكن استخدامها بسهولة من طرف المستخدم للمبادل الحراري. من بين أهم الأرقام اللابعدية نجد رقم Re فهو رقم يحتاج معرفة السرعة مع اللزوجة والكتلة الحجمية ومع اعتبار أن قطر العمود هو البعد الخاص في الدراسة. إذن عند تغيير السرعة يتغير هذا الرقم.

أما الرقم الثاني فهو Nu ، حيث أن هذا الرقم يرتبط ارتباطاً وثيقاً بقيمة معامل الانتقال الحراري α ، الذي بدوره يتغير قيمته تبعاً للسرعة. ومن هذا المنطلق يمكن إيجاد علاقة بين الرقمين بتغيير السرعة في كل تجربة، وقد تم تغيير السرعة بفضل الصمام (10%-20%-.....-100%). حيث تم ترقيم الأعمدة وترتيبها كما يلي:



شكل (4-5): ترتيب الأعمدة والصفوف في المبادل الحراري المتقاطع (التجربة 3).

1-3) التحقق من معدلات التبريد

منحنيات التجربة الثالثة:

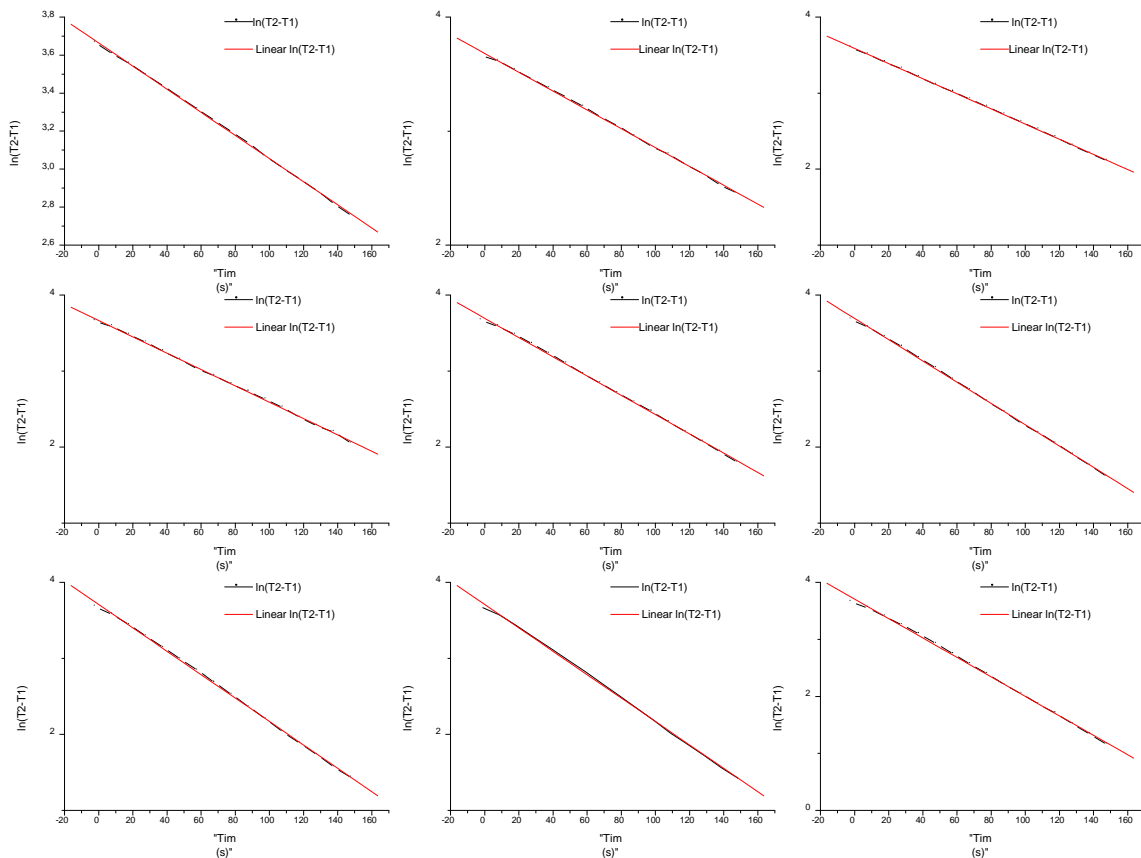
من أجل كل عمود (Rod) نرسم تغيرات $\ln(T_2 - T_1)$ بدلالة الزمن t ، فنستنتج 10 منحنيات

(100%----20%-10%) والشكل التالي خاص ب العمود رقم 01، ويوضح 09 منحنيات -20%-10%

(90%---) كنموذج للدراسة، والأعمدة الأخرى (1-2-3-----18) متشابهة في سلوك درجة الحرارة بالنسبة

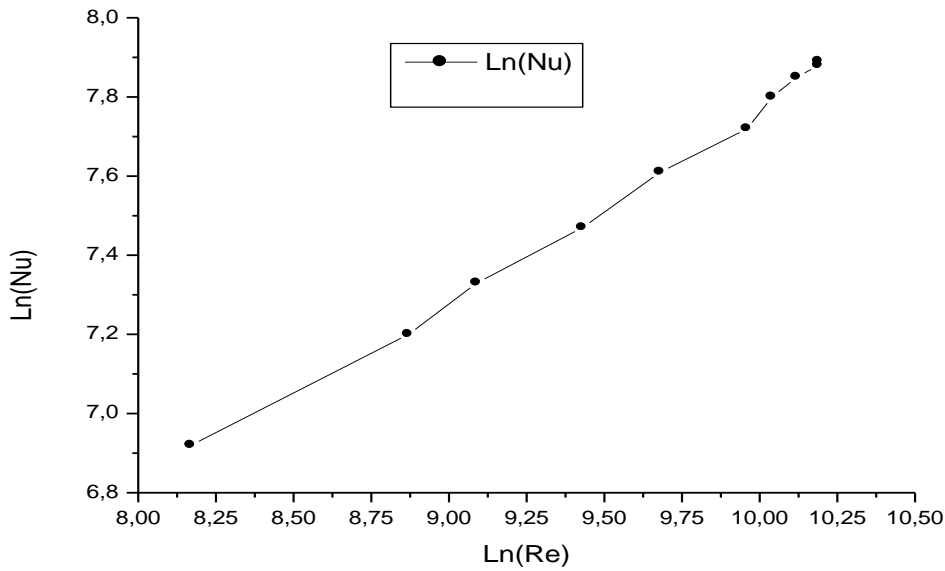
للزمن، وتختلف في قيم الميل ونقطة التقاطع مع محور الترتيب.

والجدول (4-2) يدون النتائج الخاصة بالميل، والميل له علاقة بمعامل الانتقال الحراري α .



شكل (4-6): تغيرات $\ln(T_2 - T_1)$ بدلالة الزمن بالنسبة للعمود 01 (التجربة 3).

من أجل كل أنبوب (Rod) نرسم تغيرات $\ln(Nu)$ بدلالة $\ln(Re)$ ، فنستنتج 18 منحنى خاصة بكل قيمة للصمام (10% 20%.....100%) ، واخترنا العمود رقم 01 كنموذج لدراسة ، والأعمدة الأخرى (1-2-3-18) متشابهة في سلوك Nusselt بالنسبة Reynolds ، وتختلف في قيم الميل ونقطة تقاطع مع محور الترتيب والقيم مدونة في الجدول (4-5)



الشكل (4-7) : منحنى يوضح تغيرات $\ln(Nu)$ بدلالة $\ln(Re)$.

تفسير النتائج: تغيرات $\ln(Nu)$ بدلالة $\ln(Re)$ خطية مهما كان رقم العمود، ومما أقتح هو نموذجين نموذج أول موضح في المعادلة (2-36) بدون معامل شكل وبسيط، ونموذج ثان به معامل شكل موضح في المعادلة (2-37):

$$Nu = C \cdot Re_d^m Pr^n \quad (36 - 2)$$

$$Nu' = \acute{C} \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^p Re_d^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25} \quad (37 - 2)$$

جدول (4-5) : النماذج شبيهة تجريبية للتبريد الخاص بالمبادل الحراري (Nu خاص بالنموذج الأول -Nu' خاص بالنموذج الثاني)

Nu'	النموذج الخاص Nu	ميل (slope) لكل صمام											Row
		100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	Rod	
$Nu' = 13.173(Re)^{0.5476}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 10.575(Re)^{0.5476}(Pr)^{0.36}$	-0.01743	-0.01709	-0.01544	-0.01544	-0.014	-0.01266	-0.01074	-0.00995	-0.00825	-0.00609	1	1
$Nu' = 29.371(Re)^{0.5091}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 23.578(Re)^{0.5091}(Pr)^{0.36}$	-0.01678	-0.01666	-0.01618	-0.01538	0.0142	0.01269	-0.01101	-0.00956	-0.00841	-0.00633	2	
$Nu' = 4.924(Re)^{0.3304}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 3.953(Re)^{0.3304}(Pr)^{0.36}$	-0.01575	-0.01601	-0.01504	-0.01464	-0.01366	-0.01244	-0.01076	-0.00933	-0.00801	-0.00602	3	
$Nu' = 66.140(Re)^{0.3911}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 53.094(Re)^{0.3911}(Pr)^{0.36}$	-0.01644	-0.01631	-0.1637=	-0.01523	-0.01455	-0.01289	-0.0113	-0.00989	-0.00833	-0.00609	4	
$Nu' = 24.431(Re)^{0.3355}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 19.612(Re)^{0.3355}(Pr)^{0.36}$	-0.01712	-0.01706	-0.01601	-0.01527	-0.01406	-0.01311	-0.01083	-0.00967	-0.00808	-0.00609	5	
$Nu' = 2.141(Re)^{0.6477}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 1.719(Re)^{0.6477}(Pr)^{0.36}$	-0.02386	-0.02357	-0.02265	-0.02084	-0.18880	-0.01675	-0.01446	-0.01241	-0.01031	-0.00609	6	2
$Nu' = 16.382(Re)^{0.5590}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 13.151(Re)^{0.5590}(Pr)^{0.36}$	-0.02325	-0.02314	-0.02213	-0.02096	-0.01858	-0.01643	-0.01469	-0.01273	-0.00609	-0.00609	7	
$Nu' = 33.426(Re)^{0.4832}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 26.833(Re)^{0.4832}(Pr)^{0.36}$	-0.02248	-0.02247	-0.02129	-0.02038	-0.01833	-0.01633	-0.01495	-0.01258	-0.01064	-0.00768	8	
$Nu' = 69.210(Re)^{0.4887}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 55.558(Re)^{0.4139}(Pr)^{0.36}$	-0.02222	-0.02189	-0.02133	-0.02016	-0.01850	-0.01673	-0.01412	-0.1223	-0.1020	-0.00609	9	
$Nu' = 5.745(Re)^{0.5578}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 4.612(Re)^{0.5578}(Pr)^{0.36}$	-0.02825	-0.02700	-0.02579	-0.02488	-0.02225	-0.02003	-0.01758	-0.01470	-0.01214	-0.006009	10	3
$Nu' = 2.316(Re)^{0.8197}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 1.782(Re)^{0.8197}(Pr)^{0.36}$	-0.29540	-0.02960	-0.02691	-0.02652	-0.02353	-0.02014	-0.01775	0.01527	-0.01276	-0.00609	11	
$Nu' = 66.774(Re)^{0.5760}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 53.603(Re)^{0.5760}(Pr)^{0.36}$	-0.02958	-0.02899	-0.02785	-0.02543	-0.02359	-0.02053	-0.01757	-0.01537	-0.01241	-0.00609	12	
$Nu' = 20.225(Re)^{0.56121}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 16.236(Re)^{0.56121}(Pr)^{0.36}$	-0.02752	-0.02752	-0.02593	-0.02540	-0.02337	-0.02013	-0.01779	-0.01517	-0.01228	-0.00609	13	
$Nu' = 2.023(Re)^{0.5606}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 1.624(Re)^{0.5606}(Pr)^{0.36}$	-0.0283	-0.02774	-0.02586	-0.02404	-0.02322	-0.01986	-0.01779	-0.01517	-0.01228	-0.00609	14	
$Nu' = 19.234(Re)^{0.5655}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 15.440(Re)^{0.5655}(Pr)^{0.36}$	-0.02781	-0.02756	-0.02418	-0.02482	-0.02269	-0.02011	-0.01759	-0.01559	-0.01226	-0.00609	15	4
$Nu' = 23.270(Re)^{0.5430}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 18.680(Re)^{0.5430}(Pr)^{0.36}$	-0.02856	-0.02446	-0.02554	-0.02427	-0.02185	-0.02011	-0.01639	-0.01469	-0.01240	-0.00609	16	
$Nu' = 23.296(Re)^{0.5443}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 18.701(Re)^{0.5443}(Pr)^{0.36}$	-0.02695	-0.02706	-0.02527	-0.02467	-0.02161	-0.02031	-0.01734	-0.01512	-0.01249	-0.00609	17	
$Nu' = 25.136(Re)^{0.5389}(Pr)^{0.36}$	$Nu = 20.178(Re)^{0.5389}(Pr)^{0.36}$	-0.02812	-0.02799	-0.02670	-0.02497	-0.02342	-0.02051	-0.01824	-0.01577	-0.01324	-0.00953	18	

الخاتمة العامة

النتائج:

نتيجة 1: تم استنتاج نموذج شبه تجريبي يعطي قيمة السرعة بدلالة قيمة الصمام وهو:

$$V = 2.80217 + (0.5427)x + (-0.00213)x^2$$

طريقة استنباط النموذج يمكن تطبيقها على أي مبدل حراري لضبط قيمة السرعة انطلاقاً من قيمة الخنق التي يحققها الصمام.

نتيجة 2: تم استنتاج نموذج شبه تجريبي يعطي تغيرات الفرق في الضغط ΔP_1 الشاقولي بدلالة ΔP_2 الأفقي وهو:

$$\Delta P_1 = 0.24201 \cdot \Delta P_2 - 525248$$

والفائدة من هذا النموذج هو ضبط الضياع في الضغط الشاقولي بدلالة الأفقي ومعرفة قيمة السرعة المناسبة لتشغيل المبادل الحراري.

نتيجة 3: تم ضبط قيم السرعة الخاصة بالانضغاط والسرعة الخاصة بالتخلخل، ووضع نتائج تعطي فكرة عن السرعة المناسبة لكي يتم تشغيل المبادل الحراري بحيث ينتج تخلخل أقل من أجل تكلفة أقل لاستهلاك المضخة. حيث أن الزيادة في السرعة بين الانضغاط والتخلخل كانت تقارب 1.14. وهي ناتجة من قيمة الصمام من 60% - 90% والتي تناسب مع قيمة السرعة في المجال 27-35 متر في الثانية بالنسبة لهذا المبدل.

والفائدة من هذه الدراسة هي ضبط وتثبيت قيمة الانضغاط والتخلخل من أجل تبادل حراري مستقر من طرف المبادل الحراري. ويمكن تطبيقها على أي مبادل مع تغير القيم المستنتجة من هذه التجربة.

نتيجة 4: معدلات التبريد التي تتم في المبادل الحراري المتقاطع وضع لها نموذج عددي وتجريبي، وكل عمود كان له نموذج خاص به ويمكن تعميم النموذج بإيجاد القيم المتوسطة للمقادير والثوابت في النماذج 18 المقترحة من أجل كل عمود (النماذج موضحة في الجدول (4-5)). لكن الإشكالية أن الدراسة تمت على تبريد كل عمود على حدى. والحل المقترح لحل هذه الإشكالية هو تسخين الأعمدة في لحظة واحدة ودراسة انخفاض درجة حرارتها بالنسبة للزمن، ومن ثم إيجاد معامل الانتقال الحراري بالحمل الخاص بالتبريد. لكن من وجهة النظر الفيزيائية يمكن اعتبار كل عمود جملة لوحده معزولة عن الأعمدة الأخرى وتم تبريده بتيار هوائي له سرعة معينة.

التوصيات:

لدراسة المبادل الحراري المتقاطع بدقة أفضل يجب توفير جهاز يقوم بتسخين الأعمدة في وقت واحد ودراسة انخفاض درجة الحرارة مع الزمن، ووضع نموذج خاص بمجموعة الأنابيب معا. أو استبدال الأعمدة بأنبوب من المعدن يسري داخله مائع يدخل ساخنا ويخرج باردا، وذلك بتثبيت درجة حرارة المدخل ودرجة حرارة المخرج. ويجب معايرة الحرارة المنتقلة من المائع الى الهواء بدراسة خصائص المائع الداخلي والمعرض لتبريد.

المراجع باللغة العربية

- [1] محمد تخة، "دراسة مقارنة وتحسين لمختلف المقطرات الشمسية لإنتاج المياه الصالحة للشرب في المناطق الجافة الصحراوية"، مذكرة ماجستير، جامعة ورقلة، كلية العلوم والعلوم الهندسية، قسم الفيزياء (2004)

المراجع باللغة الانجليزية

- [2] Walker, G., Heat Exchangers in Cryocoolers, in Cryocoolers. 1983, Springer. p. 1-58.
- [3] Kreith, F. and R. Boehm. Mechanical Engineering Handbook Ed. Frank Kreith Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. in Intelligent Transportation Systems. 1999
- [4] Classification of heat exchangers. 1981: Hemisphere Publishing, ,Shah, R.K .Washington, DC
- [5] Larowski, A. and M. Taylor. MA. Systematic procedures for selection of heat exchangers, C58/82. in Institution of Mechanical Engineers, London. 1982
- [6] Q. Kern, Process heat transfer. Vol. 5. 1950: McGraw-Hill New .Kern, D.Q. and D .York
- [7] Stevens, R., J. Fernandez, and J. Woolf, Mean-temperature difference in one, two, and three-pass crossflow heat exchangers. Transactions of the American Society of .Mechanical Engineers, 1957. 79(2): p. 287-296
- [8] Singh, K.P., Some fundamental relationships for tubular heat exchanger thermal .performance. 1981
- [9] Timmerhaus, K.D. and T.M. Flynn, Properties of cryogenic fluids, in Cryogenic .Process Engineering. 1989, Springer. p. 13-38
- [10] Butterworth, D. and C.J.C.e.p. Mascone, Heat transfer heads into the 21st century. .1991. 87(9): p. 30-37
- [11] Taylor, M.A., Plate-fin heat exchangers: guide to their specification and use. .1987: Heat Transfer and Fluid Flow Services Amersham, UK
- [12] Shah, R.K. and D.P. Sekulic, Fundamentals of heat exchanger design. 2003: John .Wiley & Sons
- [13] London, A. and R. Seban, A generalization of the methods of heat exchanger analysis. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1980. 23(1): p. 5-16.
- [14] .Gollin, M.J.H.o.A.T.D., Heat Exchanger Design and Rating. 1989(Part 7): p. 13

- [15] Lefevre, M, and H COMPTES RENDUS HEBDOMADAIRES DES SEANCES DE L ACADEMIE DES SCIENCES Jakob. 1949. "SUR QUELQUES PROPRIETES DES SUBSTANCES ACTIVES TIREES DES CULTURES DALGUES DEAU DOUCE." 229 (3):234-236.
- [16] Tansley, Claire E, and David P. Marshall Journal of Physical Oceanography Marshall. 2001. "Flow past a cylinder on a β plane, with application to Gulf Stream separation and the Antarctic Circumpolar Current." 31 (11):3274-328

المراجع باللغة الفرنسية

- [17] Ahmed Khedim, Klemens Schwarzer, Christian Faber, Christoph Mtiler "Production de centralisée de l'eau potable l'énergie solaire", Desalination 168 (2004) 13-20.
- [18] J.F. Sacadura "Initiation aux transfert thermique" France -1977.