สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อที่มีการเซาะร่อง

HEAT TRANSFER AND PRESSURE LOSS IN A CHANNEL WITH GROOVED SURFACES

T069070

ดุสิต บูรณโชคไพศาล

DUSIT BURANACHOKPHAISAN

วพ.
ด764ก
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 69070
วัน,เดือน,ปี - 7 ก.พ. 2550

.b 11700592
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HEAT TRANSFER AND PRESSURE LOSS IN A CHANNEL WITH GROOVED SURFACES

DUSIT BURANACHOKPHAISAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อที่มีการเซาะร่อง
นักศึกษา	นายดุสิต บูรณโชคไพศาล
รหัสนักศึกษา	44611502
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2549
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องขนานด้วยการเซาะร่องพื้นผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวของช่องขนานเป็นแบบฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ และของไหลที่ใช้ในการทดลองคืออากาศ ในการทดลองจะใช้ความเร็วลมต่าง ๆ กัน โดยให้อยู่ในช่วงการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน (ค่า Re อยู่ในช่วง 500 ถึง 20,000) จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลระหว่างช่องขนานเรียบที่ไม่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยม กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องสี่เหลี่ยม, ช่องขนานที่มีการเซาะร่องสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววี และ ช่องขนานเซาะร่องสี่เหลี่ยมที่มีการเพิ่มครีบสี่เหลี่ยม ทั้งการจัดวางแบบแนวตรงและแนวเยื้อง เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบความเสียดทาน

จากการทดลองพบว่าช่องขนานที่มีการเซาะร่อง มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า e/D=0.33 ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีจะให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงสูงสุด ในขณะที่ค่า e/D=0.25 และ e/D=0.20 ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบจะให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงสูงสุด และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้อง จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงกว่าช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวตรงสำหรับกรณีเซาะร่องเพียงอย่างเดียว แต่จะให้ผลตรงกันข้ามในกรณีที่มีการเพิ่มครีบเข้าไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Heat Transfer and Pressure Loss in a Channel with Grooved Surfaces
Student	Mr. Dusit Buranachokphaisan
Student ID.	44611502
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Pongjet Promvonge

ABSTRACT

This paper presents the study of performance enhancement of heat transfer in a channel by grooving the heating surfaces into 3 types: rectangular grooved channel, V-shaped rectangular grooved channel and rectangular rib-grooved channel. The experiments are made by varying air velocity in the test section to cover the range of laminar and turbulent flows (Reynolds number from 500 to 20,000) at a constant heat flux condition. Experimental results are compared with the results of the channel without grooves or smooth channel. In addition, the array of grooves is placed in in-line and staggered arrangements.

The experimental result shows that the heat transfer rate and friction factor of the channel with rectangular grooved upper and lower plates are higher than those of the smooth channel. For the groove-depth-to-channel-height ratio (e/D) = 0.33, the V-shaped rectangular grooved channel is found to provide higher enhancement efficiency but for e/D = 0.25 and e/D = 0.20, the rib-grooved channel yields better enhancement efficiency. The staggered-groove arrangement provides higher heat transfer rate than the in-line groove arrangement for the cases of rectangular grooved and V-shaped rectangular grooved channel while the in-line arrangement gives an efficient heat transfer rate only for the case of the rib-grooved channel.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณนายศรัณย์ พิพัฒนศาสตร์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเรียนและการจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คุสิต บูรณโชคไพศาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญรูป.....VI

สารบัญตาราง.....IX

บทที่1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....1

1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....1

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....2

1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....2

1.6 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....3

บทที่2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

บทที่3 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....8

3.1 การไหลของของไหลภายในท่อ.....8

3.2 การสูญเสียภายในท่อ.....9

3.3 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน.....11

3.4 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน.....14

3.5 การสมดุลพลังงาน.....15

3.6 การถ่ายเทความร้อนภายในท่อผิวเรียบ.....17

บทที่4 อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง.....19

4.1 บทนำ.....19

4.2 อุปกรณ์ในการทดลอง.....22

4.3 วิธีการทดลอง.....29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่5 ผลการวิจัย.....32

5.1 กรณีช่องขนานเรียบ.....32

5.2 ช่องขนานเซาะร่อง.....33

5.3 ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววี.....44

5.4 ช่องขนานเซาะที่มีการเพิ่มครีบ.....54

5.5 ช่องขนานเซาะร่องที่ค่า e/D=0.33.....65

5.6 ช่องขนานเซาะร่องที่ค่า e/D=0.25.....66

5.7 ช่องขนานเซาะร่องที่ค่า e/D=0.20.....68

บทที่6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....70

6.1 สรปผลการวิจัย.....70

6.2 ข้อเสนอแนะ.....71

บรรณานุกรม.....72

ภาคผนวก.....73

ภาคผนวก ก.....74

ภาคผนวก ข.....76

ภาคผนวก ค.....79

ประวัติผู้เขียน.....85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

3.1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ Passive.....15

3.2 การสมดุลพลังงานภายในท่อ.....15

4.1 แสดงชุดทดลอง.....20

4.2 แสดงแผนภาพของชุดทดลอง.....20

4.3 แสดงภาพด้านข้างของแผ่นขนานที่มีการเซาะร่องสี่เหลี่ยมวางแนวตรงกัน.....21

4.4 แสดงภาพด้านข้างของแผ่นขนานที่มีการเซาะร่องสี่เหลี่ยมวางแนวเยื้องกัน.....21

4.5 แสดงชุดพัดลมที่ใช้ในการทดลอง.....23

4.6 ออริฟิส.....24

4.7 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบ Hot wire – Testo445.....24

4.8 แสดงรูปของเครื่องบันทึกความดันตกคร่อม – Testo350-M/XL-Testo454.....25

4.9 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการเก็บข้อมูลความดันตกคร่อม.....26

4.10 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์เทอร์โมคัพเพิล.....27

4.11 แสดงรูปของระบบบันทึกข้อมูล – Fluke Model 2680A.....28

4.12 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิ.....28

4.13 แสดงรูปของ Variac.....29

4.14 แสดงแผ่นล่างของช่องขนานเซาะร่องสี่เหลี่ยม.....30

4.15 แสดงแผ่นล่างของช่องขนานเซาะร่องสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววี.....31

4.16 แสดงแผ่นล่างของช่องขนานเซาะร่องสี่เหลี่ยมที่มีการเพิ่มครีบรูปสี่เหลี่ยม.....31

5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re สำหรับช่องขนานเรียบ.....32

5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re สำหรับช่องขนานเรียบ.....33

5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเซาะร่อง.....35

5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re กรณีเซาะร่อง.....35

5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีเซาะร่อง.....36

5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re กรณีเซาะร่อง.....36

5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re กรณีเซาะร่อง.....37

5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเซาะร่อง.....39

5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re กรณีเซาะร่อง.....39

5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีเซาะร่อง.....40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re กรณีเซาะร่อง.....40

5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re กรณีเซาะร่อง.....41

5.13 ความคลาดเคลื่อนจากสมการ Nu กรณีเซาะร่องแนวตรงและแนวเยื้อง.....43

5.14 ความคลาดเคลื่อนจากสมการ f กรณีเซาะร่องแนวตรงและแนวเยื้อง.....43

5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี.....45

5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี.....46

5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี.....46

5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี.....47

5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี.....47

5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี.....49

5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี.....50

5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี.....50

5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี.....51

5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี.....51

5.25 ความคลาดเคลื่อนจากสมการ Nu กรณีเซาะร่องจัดวางตัววีแนวตรงและแนวเยื้อง.....54

5.26 ความคลาดเคลื่อนจากสมการ f กรณีเซาะร่องจัดวางตัววีแนวตรงและแนวเยื้อง.....54

5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ.....56

5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ.....56

5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ.....57

5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ.....57

5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ.....58

5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ.....60

5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ.....60

5.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ.....61

5.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ.....61

5.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ.....62

5.37 ความคลาดเคลื่อนจากสมการ Nu กรณีเซาะร่องเพิ่มครีบแนวตรงและแนวเยื้อง.....64

5.38 ความคลาดเคลื่อนจากสมการ f กรณีเซาะร่องเพิ่มครีบแนวตรงและแนวเยื้อง.....64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re ช่วงการไหลราบเรียบที่ e/D=0.33.....65

5.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re ช่วงการไหลปั่นป่วนที่ e/D=0.33.....66

5.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re ช่วงการไหลราบเรียบที่ e/D=0.25.....67

5.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re ช่วงการไหลปั่นป่วนที่ e/D=0.25.....67

5.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re ช่วงการไหลราบเรียบที่ e/D=0.20.....68

5.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re ช่วงการไหลปั่นป่วนที่ e/D=0.20.....69

ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re ที่ e/D ต่าง ๆ.....77

ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Re^{0.9337}$ กับ e/D.....78

ข.3 แสดงความคลาดเคลื่อนจากความสัมพันธ์.....78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ค่าความขรุขระสัมบูรณ์ของท่อใหม่.....10

3.2 ค่าสภาพการนำความร้อน (ที่อุณหภูมิ 300 K).....12

3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย.....13

ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิคส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ.....75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญกับกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมมาก เช่น หม้อไอน้ำ เครื่องทำความเย็น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เป็นต้น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานค่อนข้างมากอีกด้วย ดังนั้นการหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิผลในกระบวนการผลิตและยังเป็นการลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตได้อีกด้วย

แนวทางหนึ่งที่มีการใช้ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือการเพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของของไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการเซาะร่องที่พื้นที่ถ่ายเทความร้อนก็เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มความปั่นป่วนของการไหล โดยจากการศึกษาของ Adachi and Uehara[4] ซึ่งทำการทดลองในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (ค่า Re อยู่ในช่วง 50 ถึง 500) พบว่าช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมสามารถช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งหากพิจารณาประสิทธิผลของการปรับปรุงด้วยการเซาะร่องแล้วพบว่ายังไม่ให้ผลดีเท่ากับช่องขนานเรียบ ดังนั้นในการศึกษานี้จะได้พิจารณาปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องขนานที่มีการเซาะร่องสี่เหลี่ยมและจัดวางในรูปแบบต่าง ๆ โดยจะทำการศึกษาในทั้งในช่วงการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน (ค่า Re อยู่ในช่วง 500 ถึง 20,000)

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนและความดันตกคร่อมผ่านช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ผิว (Channel with rectangular grooved surfaces) และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับกรณีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนผ่านช่องขนานผิวเรียบ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลของของไหลภายในช่องขนาน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบได้ ซึ่งการเซาะร่องหรือการติดตั้งแผ่นครีบก็เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการที่จะช่วยเพิ่มความปั่นป่วนให้กับระบบได้ แต่การติดตั้งแผ่นครีบจะมีผลทำให้ความดันตกคร่อมของระบบเพิ่มขึ้นมาก

การแก้ปัญหาข้างต้นนี้ เราจะทดลองใช้การเซาะร่องในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบ ซึ่งในที่นี้จะได้มีการพิจารณาผลของความดันตกคร่อมที่จะเกิดขึ้นกับระบบประกอบกันด้วย

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องคือการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องขนานเรียบด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant heat flux heat transfer) และการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการแบบ Passive ซึ่งไม่ต้องอาศัยงานจากภายนอก

หลักการพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลของของไหลภายในช่องขนานเป็นการถ่ายเทความร้อนกรณีผิวของช่องขนานเป็นแบบแผ่นเรียบ ซึ่งในการศึกษาจะเป็นการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในช่องขนานกรณีผิวของช่องขนานมีการเซาะร่องเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจัดวางรูปแบบต่าง ๆ กัน โดยที่การเซาะร่องจัดเป็นรูปแบบหนึ่งของการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการแบบ Passive อันจะส่งผลทำให้พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น, มีปั่นป่วนของการไหลเพิ่มขึ้น และ เป็นการทำลายชั้นขอบผิวความร้อน (Thermal boundary layer) ของระบบ

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องขนาน (Channel) ขนาดหน้าตัดกว้าง 0.20 เมตร ยาว 0.55 เมตร ที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ผิว โดยร่องที่เซาะมีขนาดกว้าง 0.010 เมตร และลึก 0.005 เมตรคงที่ จัดวางขวางทิศทางของการไหล ของไหลที่ใช้ในการทดลองคืออากาศ การให้ความร้อนกับชุดทดลองเป็นแบบฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant heat flux) ทำการทดลองในช่วงค่า Re 500 ถึง 20,000 ในการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนระยะระหว่างแผ่นขนานให้เท่ากับ 0.025 เมตร, 0.020 เมตร และ 0.015 เมตร และปรับรูปแบบของการเซาะร่องเป็นแบบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า, ร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าจัดวางรูปตัววีทำมุม 45 องศา แบบวางตัวสวนทางกับการไหล และร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเพิ่มครีบสี่เหลี่ยมที่อัตราส่วนของร่องต่อครีบเท่ากับ 2 ต่อ 1 โดยการวางตัวของร่องที่เซาะจะมีการวางตัวแบบแนวร่องตรงกันและแนวร่องเยื้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย และพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน

บทที่ 4 กล่าวถึงอุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

บทที่ 5 กล่าวถึงการหาค่าสมรรถนะของระบบ พารามิเตอร์ที่ใช้และผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอนั้นสามารถช่วยให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาในเรื่องของการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนของช่องขนาน เพื่อที่จะหาวิธีการในการลดต้นทุนในด้านพลังงาน และได้มีการค้นคว้ารูปแบบของการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนด้วยการเซาะร่องที่เหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

มีการศึกษาต้นแบบโดย Sobey ในการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานที่มีพื้นผิวเป็นลูกคลื่นด้วยการไหลแบบสั่น โดยทำการทดลองในช่วงค่า Re ต่ำ ๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่าการหมุนวนที่เกิดขึ้นในช่องขนานที่มีพื้นผิวเป็นลูกคลื่นจะทำให้เกิดการผสมกันของชั้นของไหล ซึ่งทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น

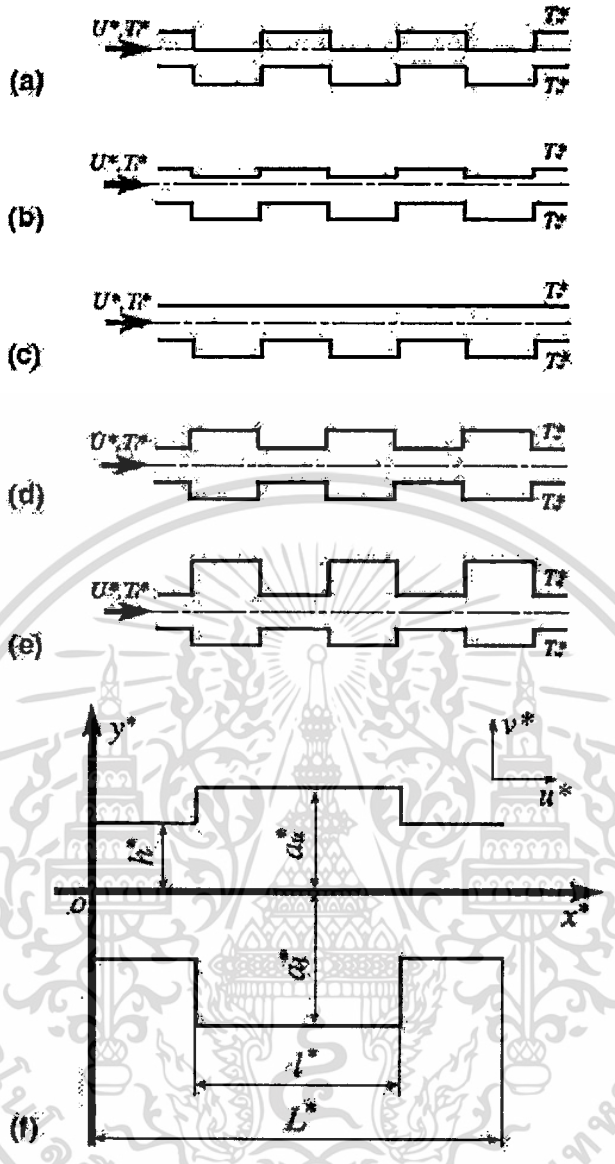
Nishimura และคณะ ได้ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานที่มีการเซาะร่องเป็นลูกคลื่นคล้ายกับที่ทดลองโดย Sobey แต่ทดลองในช่วงค่า Re ที่กว้างขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element และ จากการทดลองพบว่าได้ผลเหมือนกันคือการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานที่มีการเซาะร่องพื้นผิวเป็นลูกคลื่นสามารถช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นได้

Ghadder กับคณะ [4], Sunden กับ Trollheden [5], และ Pereira กับ Sousa [6] ได้ทำการตรวจสอบรูปแบบการไหลของช่องขนานที่มีการเซาะร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนแผ่นขนานด้านหนึ่ง ซึ่งพบว่ารูปแบบของการไหลที่เกิดขึ้นจากการเซาะร่องมีทั้งการแยกชั้นของของไหล การหมุนวน การรวมชั้นของของไหล และ การหักเห และ Ghadder ยังนำเสนอผลการทดลองว่าผลจากการสั่นที่เกิดจากผิวลูกคลื่นทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นถึงสองเท่า

Greiner และคณะ [7], และ Wirtz และคณะ [8] ได้รายงานผลการตรวจวัดความดันตกคร่อมและประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปตัววีทั้งแบบเซาะร่องสองด้าน และ แบบด้านเดียว

การศึกษาของ Adachi และ Uehara [9] เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมของช่องขนานที่มีการเซาะร่องลักษณะต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยที่ รูป a แสดงช่องขนานที่ไม่สมมาตรที่มีการขยายและหดการเซาะร่องทั้งแผ่นบนและล่าง (a_u=0), รูป b แสดงช่องขนานที่ไม่สมมาตรที่มีการขยายและหดการเซาะร่องทั้งแผ่นบนและล่าง (a_u=0.5), รูป c แสดงช่องขนานที่ไม่สมมาตรที่มีการขยายการเซาะร่องเฉพาะแผ่นล่าง (a_u=1), รูป d แสดงช่องขนานสมมาตรที่มีการขยายการเซาะร่องทั้งแผ่นบนและล่าง (a_u=2), รูป e แสดงช่องขนานที่ไม่สมมาตรที่มีการขยายการเซาะร่องทั้งแผ่นบนและล่าง (a_u=3) และ รูป f แสดงมิติต่าง ๆ ของการเซาะร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



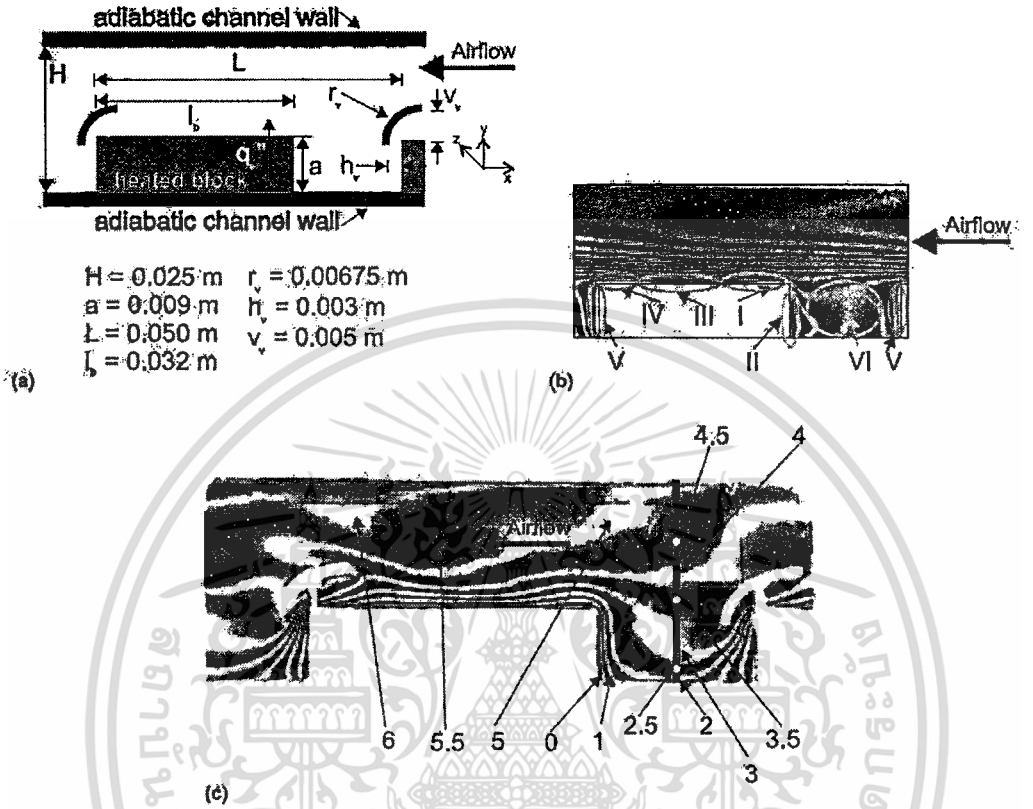
รูปที่ 2.1 การเซาะร่องในการศึกษาเชิงตัวเลขของ Adachi และ Uehara [9]

ในการศึกษาเป็นการพิจารณาแบบสองมิติและต่อเนื่องและเป็นการไหลแบบ fully developed ทั้งรูปแบบการไหลและอุณหภูมิ รูปแบบการเซาะร่องต่าง ๆ ก่อให้เกิดการไหลตั้งแต่แบบราบเรียบไปจนเกิดการไหลแบบสั่น ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด ในขณะเดียวกันความดันตกคร่อมก็เพิ่มขึ้นมาก ซึ่งเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการเซาะร่อง โดยการเปรียบเทียบระหว่างการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนต่อการเพิ่มขึ้นของความดันตกคร่อม พบว่าช่องขนานที่ขยายการเซาะร่องให้กว้างขึ้นแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับช่องขนานเรียบ แต่ช่องขนานที่มีการหดการเซาะร่องให้แคบลงแสดงให้เห็นว่าไม่มีประสิทธิภาพ

การศึกษาของ Herman และ Kang [10] เป็นการศึกษาในการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานเซาะร่องที่มีการติดตั้งแผ่นโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยที่ รูป a แสดงมิติต่าง ๆ ของการเซาะร่องและการติดตั้งแผ่นโค้งที่บริเวณด้านหลังเหนือร่องที่เซาะ, รูป b แสดงแนวการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายของอุณหภูมิของการเซาะร่องปกติที่ค่า Re = 530 และ รูป c แสดงแนวการกระจายของอุณหภูมิของการเซาะร่องที่มีการติดตั้งแผ่นโค้งที่ค่า Re = 530



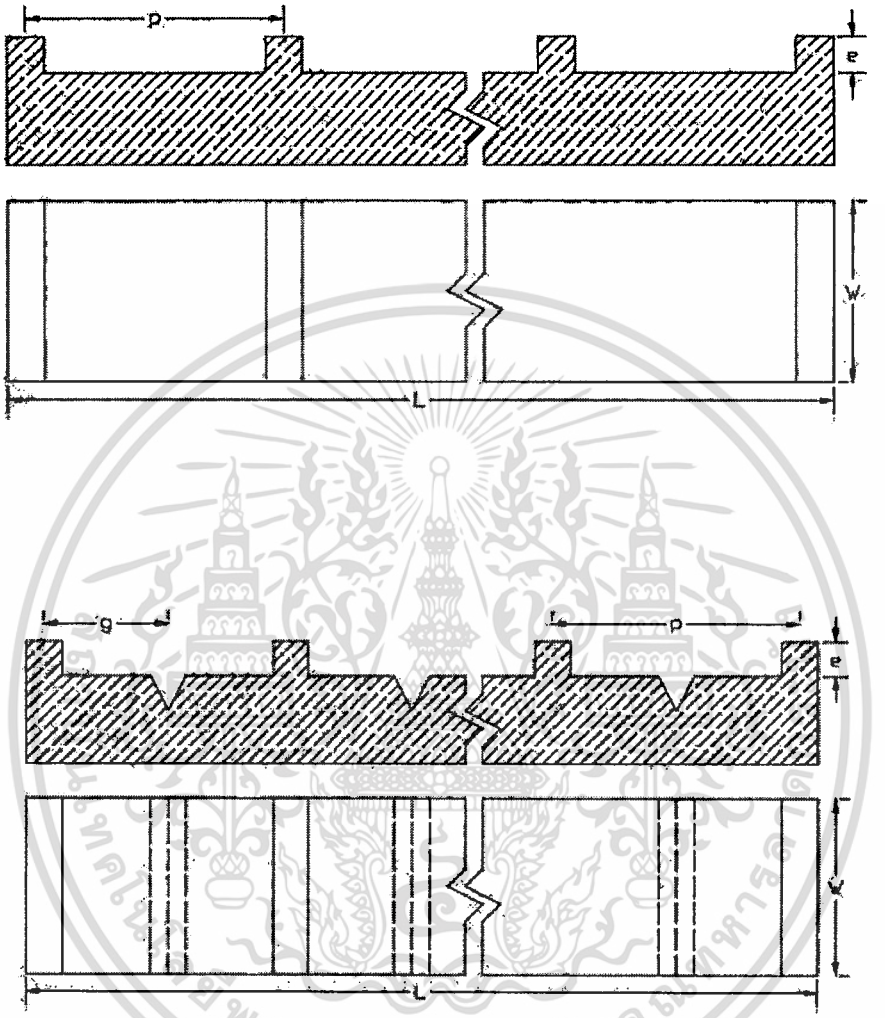
รูปที่ 2.2 การติดตั้งแผ่นโค้งในการทดลองของ Herman และ Kang [10]

ซึ่งจากการศึกษาพบว่าแผ่นโค้งที่ติดตั้งอยู่ทางด้านหลังเหนือร่องที่เซาะ ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ 1.5 ถึง 3.5 เท่าเมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีการเซาะร่องปกติ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นในบริเวณร่อง รูปแบบของการไหลจะเริ่มเปลี่ยนจากแบบราบเรียบเป็นแบบสั่นที่ค่า Re ประมาณ 450 และการสั่นของการไหลที่เกิดขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันตัวประกอบความเสียดทานก็เพิ่มขึ้น 3 ถึง 5 เท่าเมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีการเซาะร่องปกติ

การศึกษาของ Jaurker, Saini และ Ghandi [11] เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานของท่อฮีตเตอร์พลังแสงอาทิตย์รูปทรงสี่เหลี่ยมด้วยการติดตั้งครีบและเซาะร่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งพบว่าทำให้ค่า Nu มีค่าเพิ่มขึ้นมากในขณะที่ตัวประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มาก โดยในการศึกษาจะพิจารณาในช่วงค่า Re 3,000 ถึง 21,000 ความสูงของครีบอยู่ในช่วง 0.0181 ถึง 0.0363 ระยะพิตช์ของครีบอยู่ในช่วง 4.5 ถึง 10 และตำแหน่งของร่องที่เซาะอยู่ที่ระยะ 0.3 ถึง 0.7 ของระยะพิตช์ เปรียบเทียบกับกรณีท่อเรียบที่มีการติดครีบและท่อเรียบที่รูปแบบการไหลเหมือนกัน ซึ่งจากการทดลองพบว่าท่อที่มีการติดตั้งครีบและเซาะร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นมากกว่าท่อที่มีการติดตั้งครีบเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ตัวประกอบความเสียดทานมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.3 ครีบและการเซาะร่องในการทดลองของ Jaurker, Saini และ Ghandi [11]

จากการศึกษาในอดีตพบว่าการเซาะร่องมีส่วนช่วยทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นได้ แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้ตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยการศึกษาในอดีตเป็นการศึกษาในกรณีที่ความลึกของร่องที่เซาะมีค่าค่อนข้างน้อย และรูปแบบการจัดวางของร่องที่เซาะเป็นแบบขวางการไหลเท่านั้น

ดังนั้นในการทดลองนี้จะได้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการเซาะร่องโดยพิจารณาที่ความลึกของร่องที่เซาะค่อนข้างมาก (ค่าความลึกของร่องที่เซาะต่อระยะห่างระหว่างช่องขนานอยู่ในช่วง 0.20 ถึง 0.33) และทดลองจัดรูปแบบการจัดวางของร่องที่เซาะเป็นแบบรูปตัววี รวมถึงทดลองในส่วนของการเพิ่มครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากับช่องขนานที่มีการเซาะร่อง เพื่อหาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย อันได้แก่การจำแนกลักษณะของการไหลแบบบังคับภายในท่อ การสูญเสียความดันภายในท่อ และพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน

3.1 การไหลของของไหลภายในท่อ

การไหลของของไหลสามารถแบ่งตามลักษณะการไหลได้เป็นสองรูปแบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ที่ของไหลจะเคลื่อนที่ไปอย่างมีระเบียบด้วยความเร็วค่อนข้างต่ำ โดยไม่เกิดการผสมกันของกระแสของไหล และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ที่ของไหลจะเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วน ไม่มีระเบียบจึงทำให้เกิดการผสมกันของกระแสของไหล

3.1.1 การจำแนกลักษณะของการไหลภายในท่อกลม

การจำแนกการไหลภายในท่อของของไหลอาจใช้วิธีการสังเกตการไหลของของไหลที่ทางออกของท่อ โดยถ้าของไหลที่ไหลออกมาเป็นสองลำจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ แต่ถ้าของไหลที่ไหลออกมาเป็นลำเดียวจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน วิธีการนี้เหมาะกับของไหลที่สามารถสังเกตเห็นได้ เช่น น้ำ โลหะเหลว เป็นต้น หรือการพ่น Dye เพื่อสังเกตลักษณะการไหลของ Dye ก็เป็นวิธีการในการช่วยจำแนกการไหลได้เช่นกัน

นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกการไหลได้จากค่า Reynolds number ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงความหนืด (Viscous force) โดยทั่วไปกรณีของไหลมีค่า Reynolds number น้อยกว่า 2,300 จะจัดเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ส่วนกรณีของไหลมีค่า Reynolds number อยู่ในช่วง 2,300 ถึง 4,000 จะจัดเป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transition flow) และกรณีของไหลมีค่า Reynolds number มากกว่า 4,000 จะจัดเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งค่า Reynolds number (Re) มีนิยามดังนี้

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \tag{3.1}$$

โดย Re คือ ค่า Reynolds Number

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล, kg/m s

3.1.2 กรณีท่อไม่กลม

การหาสหสัมพันธ์สำหรับการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนในท่อที่มีหน้าตัดไม่กลม (Noncircular ducts) นั้นจะพิจารณาจากนิยามเทอมเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter, D_h) โดย D_h มีนิยามดังนี้

$$D_h = \frac{4A}{P} \tag{3.2}$$

กรณีเป็นท่อสี่เหลี่ยมหรือช่องขนานรูปสี่เหลี่ยม

$$D_h = \frac{4bD}{2\times(b+D)} \tag{3.3}$$

โดย A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องขนาน, m^2

P คือ ความยาวของเส้นรอบรูปช่องขนาน, m

b คือ ความกว้างของช่องขนาน, m

D คือ ความสูงหรือระยะห่างของช่องขนาน, m

3.2 การสูญเสียภายในท่อ

การสูญเสียภายในท่อสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบ คือ การสูญเสียหลัก (Major loss) และการสูญเสียรอง (Minor loss)

3.2.1 การสูญเสียหลัก

การสูญเสียหลักเกิดขึ้นจากความเสียดทานภายในท่ออันเนื่องมาจากขนาดของท่อ ความยาวของท่อ และความเร็วในการไหลภายในท่อของของไหล ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\Delta P = \frac{fL\rho V^2}{2D_h} \tag{3.4a}$$

โดย ΔP คือ ความดันตกคร่อมภายในท่อ, Pa

f คือ Friction Factor

L คือ ความยาวของท่อ, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V คือ ความเร็วของไหลเฉลี่ย, m/s

ค่า f ที่คำนวณได้จากสมการต่างๆ อาจจะนำมาใช้งานจริงได้ไม่สะดวกนัก จึงมักจะหาค่า f จากแผนภูมิที่เรียกว่า Moody chart ซึ่ง Moody ได้พล็อตค่าข้อมูลที่ดีที่สุดลงในสมการ โดยการใช้ Moody chart จะต้องทราบค่าความขรุขระสัมบูรณ์ของท่อ ดังแสดงในตาราง 3.1

ในทางปฏิบัติค่า f ของท่อผิวเรียบอาจจะคลาดเคลื่อน 5% ส่วนท่อผิวขรุขระก็อาจจะคลาดเคลื่อน 10% ดังนั้นการใช้ค่าความขรุขระสัมบูรณ์จึงต้องพิจารณาให้ดีเนื่องจากจะมีผลกระทบต่อค่าความดันตกคร่อมได้

ตารางที่ 3.1 ค่าความขรุขระสัมบูรณ์ของท่อใหม่

ประเภทของท่อ	ค่าความขรุขระสัมบูรณ์
ท่อที่รีดขึ้นรูป ท่อทองเหลือง ท่อดีบุก ท่อที่เคลือบบิทูมินัส ท่อซีเมนต์ที่หล่อด้วยการเหวี่ยงหนีศูนย์	0.0015
ท่อเหล็กเหนียว	0.046
ท่อเหล็กหล่อที่ขึ้นรูปโดยการเชื่อม	0.046
ท่อเหล็กหล่อเคลือบยางมะตอย	0.12
ท่อชุบสังกะสี	0.15
ท่อเหล็กหล่อทั่วไป	0.25
ท่อไม้	0.18–0.9
ท่อคอนกรีต	0.3–3
ท่อเหล็กที่ใช้หมุดย้ำ	0.9–9

3.2.2 การสูญเสียรอง

การสูญเสียรองจะเกิดจากการไหลผ่านท่อที่เปลี่ยนแปลงขนาดกะทันหันหรือการไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ข้อต่อ ข้องอ เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$h_m = \frac{KV^2}{2g} \tag{3.4b}$$

เมื่อ h_m คือ การสูญเสียรอง, m

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลภายในท่อ, m/s

g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2

K คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Loss coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการสูญเสียรองจะมีค่าค่อนข้างน้อย ดังนั้นในการทดลองจะพิจารณาเฉพาะการสูญเสียหลักเท่านั้น

3.3 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยจะเกิดการถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

3.3.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิหรือการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างตัวกลางที่ติดกันเมื่อมีความแตกต่างกันของอุณหภูมิ โดยการนำความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็งซึ่งความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของเนื้อตัวกลางที่อยู่นิ่ง โดยอาจจะมีบ้างที่เกิดขึ้นในของเหลวและก๊าซแต่มักจะแยกออกจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาไม่ได้

หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อนถูกเสนอขึ้นโดย โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) ในปี ค.ศ. 1882 โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองและได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ ไว้ดังนี้

$$Q_x = -kA\frac{dT}{dx} \tag{3.5}$$

หรือ

$$q_x = -k\frac{dT}{dx} \tag{3.6}$$

เมื่อ Q_x คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำผ่านพื้นที่หน้าตัด A, W

q_x คือ ค่าฟลักซ์ความร้อน, W/m^2

k คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ (Thermal Conductivity), W/m $^\circ$C

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน, m^2

$\frac{dT}{dx}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าสภาพการนำความร้อน (ที่อุณหภูมิ 300 K)

วัสดุ	ค่าสภาพการนำความร้อน ($W/m^{\circ}C$)
เงิน	429
ทองแดงบริสุทธิ์	401
ทอง	317
อะลูมิเนียม	237
เหล็ก	80.2
ปรอท	8.54
แก้ว	1.4
อิฐ	0.72
น้ำ	0.613
ผิวหนังของคน	0.37
สารทำความเย็น R-12	0.072
อากาศ	0.026

ค่าสภาพการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุที่ได้จากการวัดและทดสอบ โดยทั่วไปค่าสภาพการนำความร้อนจะแปรผันตามอุณหภูมิซึ่งจากการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์จะพบว่าค่าสภาพการนำความร้อนของแก๊สจะแปรผันตามกำลังสองของอุณหภูมิสมบูรณ์และค่าสภาพการนำความร้อนของของเหลวต่างๆ ยกเว้นน้ำจะแปรผันตามอุณหภูมิสมบูรณ์ สำหรับการใช้งานจริงที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไม่มากนักจะใช้ค่าสภาพการนำความร้อนคงที่ซึ่งหาที่อุณหภูมิเฉลี่ย โดยค่า k ของสารทั่วไปดังแสดงในตาราง 3.2

3.3.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้หรือพาความร้อนจากผิวของแข็ง สำหรับกลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานี้จะเกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของของไหล การพาความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การพาความร้อนโดยธรรมชาติ และการพาความร้อนโดยบังคับ โดยการพาโดยบังคับ (Force convection) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหลโดยของไหลจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของแข็งโดยกลไกจากภายนอก เช่น พัดลม เครื่องสูบน้ำ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการพาความร้อนสมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา จะพิจารณาตาม Newton's Law of Cooling คือ

$$Q_{conv.} = hA(T_s - T_f) \tag{3.7}$$

หรือ

$$q_{conv.} = h(T_s - T_f) \tag{3.8}$$

โดย $T_s > T_f$

เมื่อ $Q_{conv.}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาผ่านพื้นที่หน้าตัด A, W

$q_{conv.}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนโดยการพา, W/m^2

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2\,^{\circ}C$

T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของแข็ง, $^{\circ}C$

T_f คือ อุณหภูมิของของไหล, $^{\circ}C$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาค่าได้จากการทดลอง ซึ่งได้มีการเก็บข้อมูลของของไหลบางชนิดและบางประเภทของการพาความร้อนไว้ดังแสดงในตาราง 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

ประเภทของการพาความร้อนและชนิดของไหล	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2\,^{\circ}C$)
การพาความร้อนแบบอิสระของอากาศ	5 – 25
การพาความร้อนแบบอิสระของน้ำ	20 – 100
การพาความร้อนแบบบังคับของอากาศ	10 – 200
การพาความร้อนแบบบังคับของน้ำ	50 – 10,000
น้ำในระหว่างการระเหย	3,000 – 100,000
น้ำในระหว่างการควบแน่น	5,000 – 100,000

3.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือ การส่งออกของรังสีที่เชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงอิเล็กตรอนขององค์ประกอบอะตอมหรือโมเลกุลโดยพลังงานของการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) หรือโฟตอน ในความเป็นจริงการถ่ายเทความโดยการแผ่รังสีนี้จะเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสภาพสุญญากาศซึ่งไม่จำเป็นที่จะต้องการตัวกลางแต่ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนหรือการพาความร้อนนั้นจะต้องการตัวกลาง

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีออกจากผิวตัวกลาง คำนวณจากกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann) ดังนี้

$$q_{rad} = \sigma T_s^4 \tag{3.9}$$

เมื่อ q_{rad} คือ ฟลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีความร้อน, W/m^2

σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ = 5.67×10^{-8}, $W/m^2 K^4$

T_s คือ อุณหภูมิผิวแผ่รังสี, K

สมการ 3.9 ใช้กับกรณีของตัวแผ่รังสีในอุดมคติ (Ideal Radiator) หรือวัตถุดำ (Black Body) สำหรับกรณีของพื้นผิวจริง (Real Surface) ฟลักซ์แผ่รังสีความร้อนจะน้อยกว่ากรณีของวัตถุดำ ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพเปล่งรังสี (Emissivity) ของพื้นผิวนั้น ฟลักซ์แผ่รังสีบนพื้นผิวจริงคำนวณจาก

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma T_s^4 \tag{3.10}$$

เมื่อ ε คือ สภาพแผ่รังสี

ซึ่งในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่พิจารณาถึงผลของการแผ่รังสีความร้อน

3.4 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

การทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสามารถทำได้สองวิธี คือ

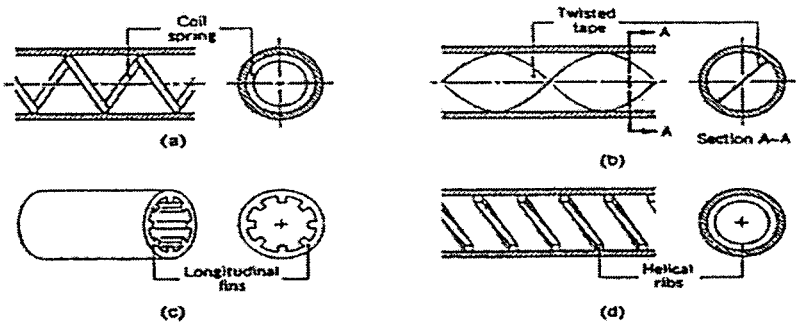
3.5.1 วิธีแบบ Active

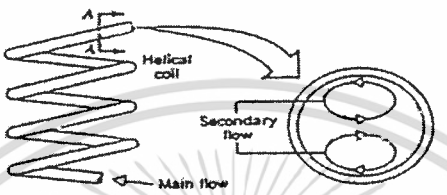
วิธีนี้ต้องการแหล่งพลังงานภายนอก เช่น การใช้อุปกรณ์ทางกล การทำให้เกิดการสั่นของพื้นผิว การทำให้เกิดการสั่นของของไหล การใช้สนามไฟฟ้าสถิต การฉีดพ่นหรือดูดของไหล

3.5.2 วิธีแบบ Passive

วิธีแบบนี้ไม่ต้องการแหล่งพลังงานภายนอก ได้แก่ การใช้พื้นที่ที่ได้รับการปรับสภาพ การใช้พื้นผิวหยาบ การเพิ่มพื้นที่ผิว การติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ การติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้อากาศเกิดการหมุนวน การใช้ท่อเป็นขด เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

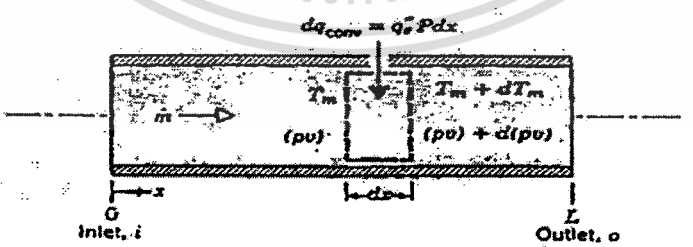




รูปที่ 3.1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ Passive

3.5 การสมดุลพลังงาน

เมื่อพิจารณาการไหลในท่อดังรูป 3.2 ของไหลจะมีอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ $\dot{m}$ และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของของไหลรวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางแนวแกนจะไม่นำมาคิดดังนั้นถ้าไม่มีงานเพลาซึ่งกระทำโดยของไหลขณะไหลผ่านท่อแล้วก็จะมีอิทธิพลที่เกี่ยวข้องเพียงการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและงานจากการไหลเท่านั้น



รูปที่ 3.2 การสมดุลพลังงานภายในท่อ

งานจากการไหลเป็นงานที่ใช้เคลื่อนของไหลผ่านปริมาตรควบคุมคิดต่อหน่วยมวลของไหลและจะอยู่ในรูปของผลคูณของความดัน(P) และปริมาตรจำเพาะ (V) โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมดังรูป 3.2 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dq_{conv} + \dot{m}(C_v T_m + PV) - [\dot{m}(C_v T_m + PV)] + \dot{m}\frac{d(C_v T_m + PV)}{dx}dx = 0 \qquad (3.10)$$

หรือ

$$dq_{conv} = \dot{m}(C_v T_m + PV) \qquad (3.11)$$

ถ้าของไหลเป็นแก๊สสมบูรณ์($PV = RT_m$ และ $C_p = C_v + R$) จะได้

$$dq_{conv} = \dot{m} C_p dT_m \qquad (3.12)$$

ค่าฟลักซ์ความร้อนระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆหาได้จาก

$$q_s = h_x (T_s - T_m) \qquad (3.13)$$

เมื่อ q_s คือ ฟลักซ์ความร้อนระหว่างของไหลกับท่อ, W/m^2

h_x คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใดๆ, $W/m^2\,^\circ C$

T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของแข็ง, $^\circ C$

T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่ผิวหน้าท่อ, $^\circ C$

สมการที่ (3.10) อาจเปลี่ยนไปอยู่ในอย่างง่ายได้โดยใช้สมการอัตราการพาความร้อนต่อปริมาตรควบคุมคือ $dq_{conv} = q_s P dx$ ซึ่ง P คือเส้นรอบรูปโดยการแทนค่าจากสมการ (3.11) และ (3.12) จะได้ว่า

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s}{\dot{m}C_p} = \frac{hP}{\dot{m}C_p}(T_s - T_m) \qquad (3.14)$$

ค่าของ $T_m(x)$ จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความร้อนที่ผิวสำหรับกรณีฟลักซ์ความร้อนคงที่

- กรณีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (q_s = Constant)

กรณีนี้จะพบว่าง่ายที่จะหาค่า q_{conv} ทั้งหมดเพราะ q_s ไม่ขึ้นกับระยะ x ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{q_{conv}}{PL} = q_s \tag{3.15}$$

จากสมการ (3.14) ทำการอินทิเกรตจาก x = 0 ถึง x ใดๆ และจากอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ทางเข้า (T_i) ถึง T ใดๆ

3.6 การถ่ายเทความร้อนภายในท่อผิวเรียบ

ค่าของ h จะขึ้นอยู่กับรูปแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สภาพการไหลของของไหล (Re) สมบัติเชิงความร้อนของของไหล และยังขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงสถานะของของไหลด้วย

- กรณีไม่มีการเซาะร่อง

$$h = \frac{Nu_D k}{D} \tag{3.16}$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m^2 °C

k คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ, W/m °C

Nu_D คือ Nusselt Number

สำหรับการไหลเป็นแบบ Turbulent flow ที่ fully developed turbulent ในท่อกลมเรียบ โดยหา Nu_D หาได้จากสมการของ Dittus-Boelter

$$St = \frac{\overline{Nu}}{\mathrm{Re\,Pr}} = \frac{f}{8}$$

$$f = 0.184\,\mathrm{Re}^{-0.2}$$

$$St = 0.023\,\mathrm{Re}^{-0.2}$$

ดังนั้น

$$\overline{Nu} = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^n \tag{3.17}$$

โดยที่ $n = 0.4$ สำหรับการทำให้ร้อน ($T_s > T_m$)

$n = 0.3$ สำหรับการทำให้เย็น ($T_s < T_m$)

Pr คือ Prandtl Number

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

69070

สมการนี้สำหรับช่วงของเงื่อนไขดังนี้ $\begin{bmatrix} 0.7 \le \mathrm{Pr} \le 160 \\ \mathrm{Re}_D \ge 10000 \\ L/D \ge 10 \end{bmatrix}$

- กรณีเซาะร่อง

จากข้อมูลที่ได้ศึกษามาก่อนแล้วของ Adachi กับ Uehara และ Fusegi สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของช่องขนานที่มีการเซาะร่องกับช่องขนานผิวเรียบ พบว่าการเซาะร่องจะช่วยทำให้เกิดการไหลเป็นไปในเงื่อนไขแบบปั่นป่วนและดังนั้นเราสามารถหาค่า Nu ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_0 - T_i) \tag{3.18}$$

$$\dot{Q} = h_i A_i \left(\overline{T_w} - T_b \right) \tag{3.19}$$

โดยที่ $T_b = \dfrac{(T_i + T_0)}{2}$

$$\overline{T_w} = \frac{\sum T_w}{n}$$

เมื่อ T_0 คือ อุณหภูมิที่ทางออกของของไหล, °C

T_i คือ อุณหภูมิที่ทางเข้าของของไหล, °C

A_i คือ พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของช่องขนาน, m^2

$\overline{T_w}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของช่องขนาน, °C

T_b คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของทางเข้าและทางออก, °C

n คือ จำนวนจุดที่วัดอุณหภูมิ

$$Nu_m = \frac{h_i D_i}{k} \tag{3.20}$$

$$h_i = \dot{m} C_P \frac{(T_0 - T_i)}{A_i (T_w - T_b)} \tag{3.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

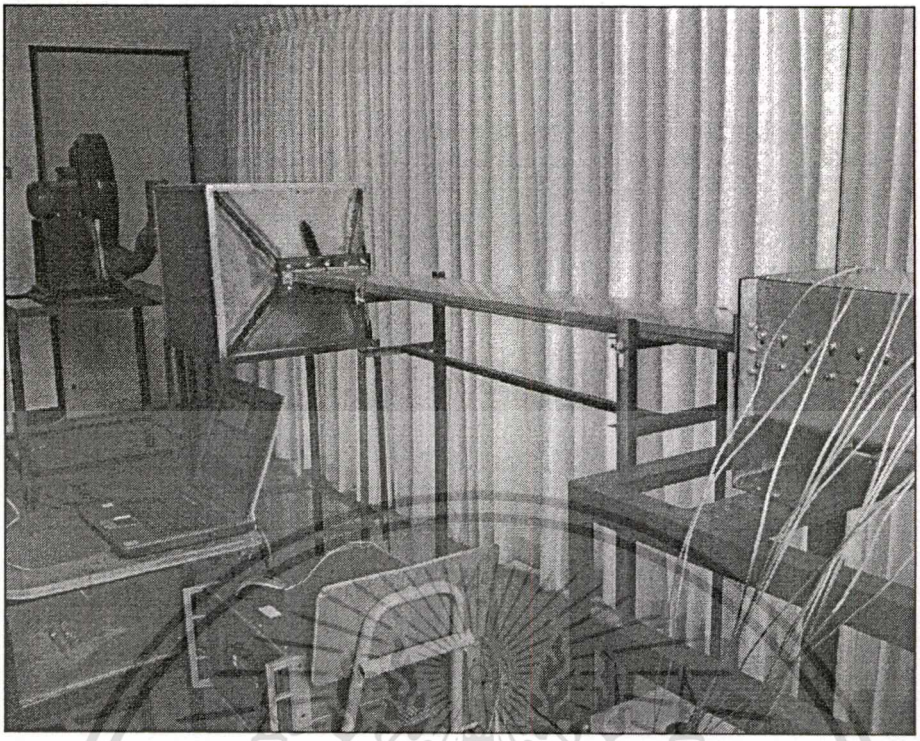
4.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะได้แสดงอุปกรณ์สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมรูปแบบต่าง ๆ

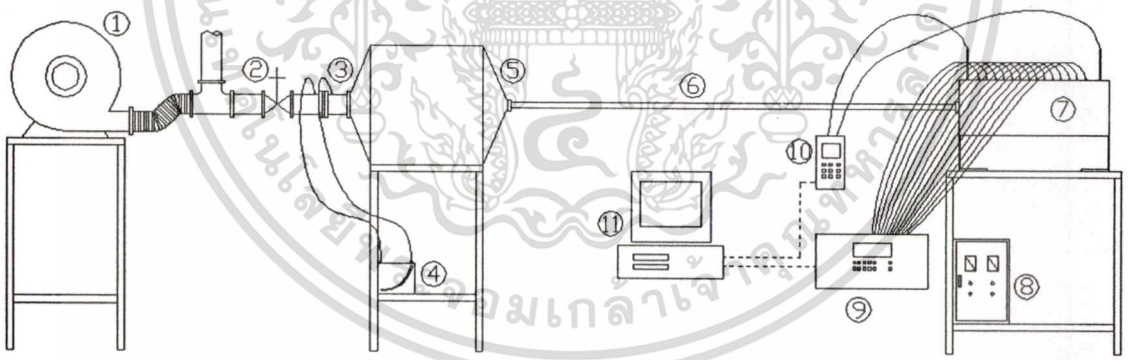
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนและอุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 ซึ่งประกอบด้วยพัดลมขนาด 2.20 กิโลวัตต์, กล่องปรับรูปแบบการไหลสำหรับเปลี่ยนการไหลจากท่อกลมมาเป็นการไหลในช่องขนาน, ช่องขนานสำหรับปรับสภาพของการไหลทำจากแผ่นโลหะขนาดหน้าตัดกว้าง 0.20 เมตร และมีความยาว 1.60 เมตร และส่วนทดลองจะเป็นแผ่นโลหะกว้าง 0.20 เมตร และยาว 0.55 เมตร ทำการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมกว้าง 0.01 เมตร และลึก 0.005 เมตร ตลอดหน้าตัด โดยมีระยะห่างระหว่างร่องที่เซาะ (Pitch) เท่ากับ 0.04 เมตร

การปรับอัตราการไหลของของไหลจะใช้การควบคุมด้วยวาล์วเพื่อให้ได้การไหลทั้งแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน อากาศในชุดทดลองถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2.00 กิโลวัตต์ โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ซึ่งมีพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 0.09 เมตร และยาว 0.45 เมตร ที่ผิวบนและผิวล่างของช่องขนาน ผิวภายนอกของส่วนทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อเป็นการป้องกันการสูญเสียพลังงานความร้อนของชุดทดลอง การวัดอุณหภูมิผิวช่องขนานและอุณหภูมิของอากาศทางเข้าและออกถูกวัดด้วยเทอร์โมคัพเปิลชนิด K จำนวน 16 ตัว ด้วย Data logger (Fluke-Model 2680A ซึ่งสามารถวัดค่าได้ 40 Channels) และบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ ส่วนค่าความดันลดระหว่างตำแหน่งทางเข้าและตำแหน่งทางออกของส่วนทดลองอ่านและบันทึกค่าด้วย Digital differential pressure recorder (Testo-Model 350-M/XL-Testo 454)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



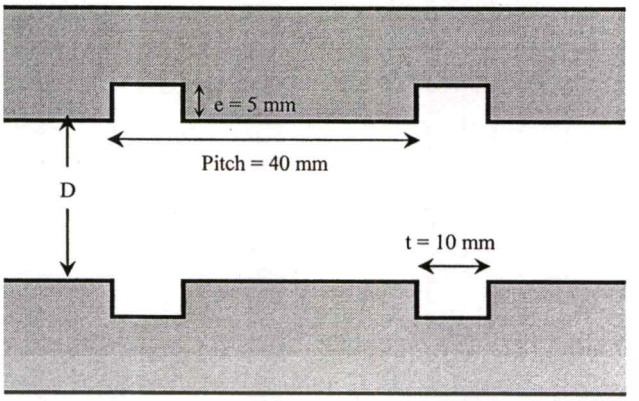
รูปที่ 4.1 แสดงชุดทดลอง



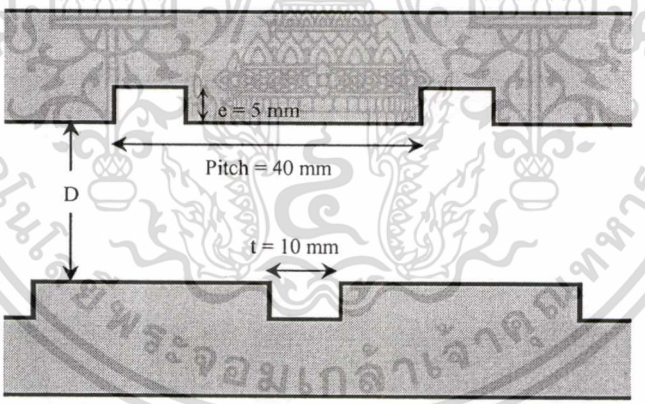
1. พัดลม
2. วาล์วปรับปริมาณลม
3. แผ่นออริฟิส
4. มานอมิเตอร์
5. กล่องปรับการไหล
6. ช่องขนานปรับสภาพการไหล
7. ชุดทดลอง
8. ชุดควบคุมฮีตเตอร์ไฟฟ้า
9. เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Fluke)
10. เครื่องวัดความดัน (Testo)
11. คอมพิวเตอร์

รูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงภาพด้านข้างของแผ่นขนานที่มีการเซาะร่องสี่เหลี่ยมวางแนวร่องตรงกัน



รูปที่ 4.4 แสดงภาพด้านข้างของแผ่นขนานที่มีการเซาะร่องสี่เหลี่ยมวางแนวร่องเยื้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อุปกรณ์การทดลอง

4.2.1 กำลังของเครื่องทำความร้อน

การคำนวณหากำลังของเครื่องทำความร้อนจำเป็นต้องทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบก่อนแล้วจึงจะสามารถหากำลังของเครื่องทำความร้อนได้ โดยกำลังของเครื่องทำความร้อนสามารถหาได้จากอัตราการไหลเชิงมวลคูณกับค่าความจุความร้อนจำเพาะและผลต่างของอุณหภูมิก็จะได้สมการดังนี้

$$Q = \dot{m} C_p \left(T_i - T_o\right) \tag{4.1}$$

เมื่อ Q คือ กำลังของเครื่องทำความร้อน, kW

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล, kg/s

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, kJ/kg $^{\circ}$C

T_i คือ อุณหภูมิภายใน, $^{\circ}$C

T_o คือ อุณหภูมิภายนอก, $^{\circ}$C

4.2.2 กำลังของพัดลม

การคำนวณหากำลังของพัดลมจำเป็นต้องทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบก่อนแล้วจึงจะสามารถหากำลังของพัดลมได้ โดยการคำนวณหากำลังของพัดลมหาได้จากนำอัตราการไหลโดยน้ำหนักคูณกับเฮดของพลังงานก็จะได้สมการดังนี้

$$Q_{flow} = AV \tag{4.2}$$

$$Power = \rho g Q_{flow} H_P \tag{4.3}$$

$$H_p = \frac{\Delta hg + \frac{V^2}{2} + h_f + h_m}{g} \tag{4.4}$$

เมื่อ Q_{flow} คือ อัตราการไหลของของไหล, m^3/s

A คือ พื้นที่, m^2

V คือ ความเร็วของของไหล, m/s

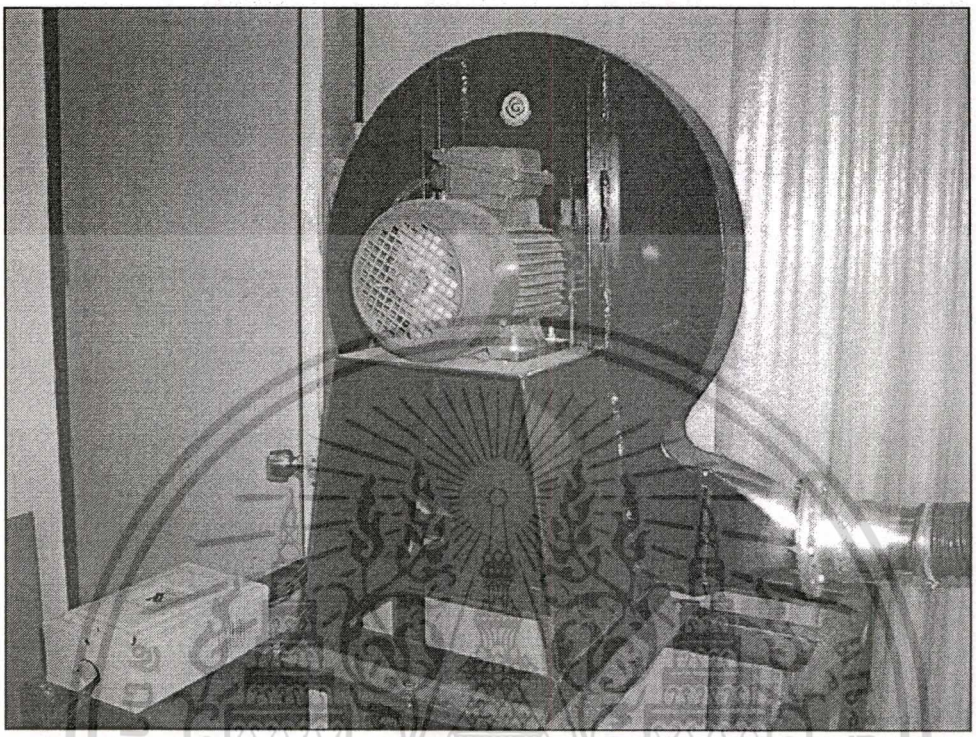
g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

H_p คือ เฮดของพลังงาน, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองจะใช้พัดลมสำหรับทำการส่งอากาศเข้าไปในชุดทดลองเป็นแบบหอยโข่ง (Centrifugal fan) ดังแสดงในรูปที่ 4.5



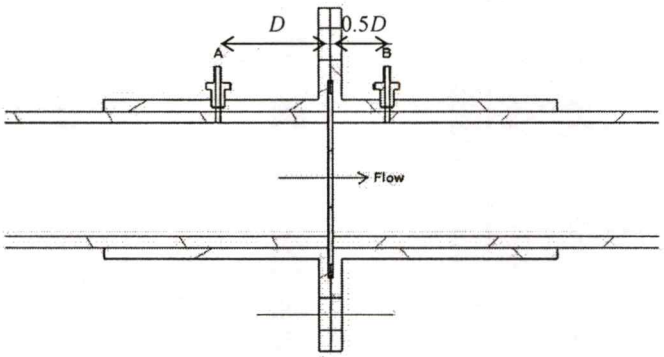
รูปที่ 4.5 แสดงชุดพัดลมที่ใช้ในการทดลอง

4.2.3 เครื่องมือวัดอัตราการไหล

การวัดอัตราการไหลของของไหลภายในท่อจำเป็นต้องเลือกประเภทและชนิดของเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน สำหรับการศึกษาทดลองนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบออริฟิส และ แบบ Hot wire ซึ่งสามารถใช้วัดอัตราการไหลได้มีความถูกต้องสูง

เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบออริฟิสเป็นเครื่องมือสำหรับของไหลที่ไหลภายในท่อแบบหนึ่ง ซึ่งออกแบบเป็นแผ่นออริฟิสมีลักษณะเจาะรูกลมตรงกลาง และเจาะบากคมพร้อมติดตั้งมานอมิเตอร์แบบวัดผลต่างความดัน โดยพิจารณาจุดวัดที่ A อยู่ด้านหน้าแผ่นออริฟิสเป็นระยะ D และจุดที่ B อยู่ด้านหลังแผ่นออริฟิสเป็นระยะ $0.5D$ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ออริฟิส

Hot wire เป็นอุปกรณ์การวัดอัตราการไหลแบบหนึ่ง ซึ่งมีการทำงานพื้นฐาน คือ เมื่อของไหลไหลผ่านช่อง Hot wire ความเร็วที่ไหลผ่านจะถูกแปรเป็นสัญญาณไฟฟ้าส่งไปที่อุปกรณ์ Testo454 ซึ่งจะแปรสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งมาเป็นความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.7

รูปที่ 4.7 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบ Hot wire – Testo445

4.2.4 เครื่องมือวัดความดัน

การวัดความดันของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ให้มีความถูกต้องแม่นยำนั้นจะต้องใช้เครื่องมือที่สามารถเข้ากับ Streamline ได้เป็นอย่างดี เพื่อป้องกันไม่ให้เครื่องมือไปรบกวนการไหลนั้น และรูที่เจาะไว้สำหรับวัดความดันภายในของท่อจะต้องตั้งฉากกับผิวภายในท่อ กรณีวัดของไหลที่มีความดันสูงมาก ๆ ด้วยท่อปิโซมิเตอร์ปลายเปิดก็จะต้องใช้ท่อที่มีความยาวมาก ดังนั้นเพื่อความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะดวกในการใช้งานจึงได้เลือกใช้มาโนมิเตอร์สำหรับการวัดความดันภายในท่อ กรณีต้องการทราบความแตกต่างของความดันก็จะสามารถหาได้โดยอาศัย Differential manometer โดยตำแหน่งที่วัดความดันอยู่ระดับเดียวกันจะได้สมการดังนี้

$$P_A - P_B = \rho g h \tag{4.5}$$

เมื่อ P_A คือ ความดันที่ตำแหน่ง A, N/m^2

P_B คือ ความดันที่ตำแหน่ง B, N/m^2

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหลภายในท่อ, kg/m^3

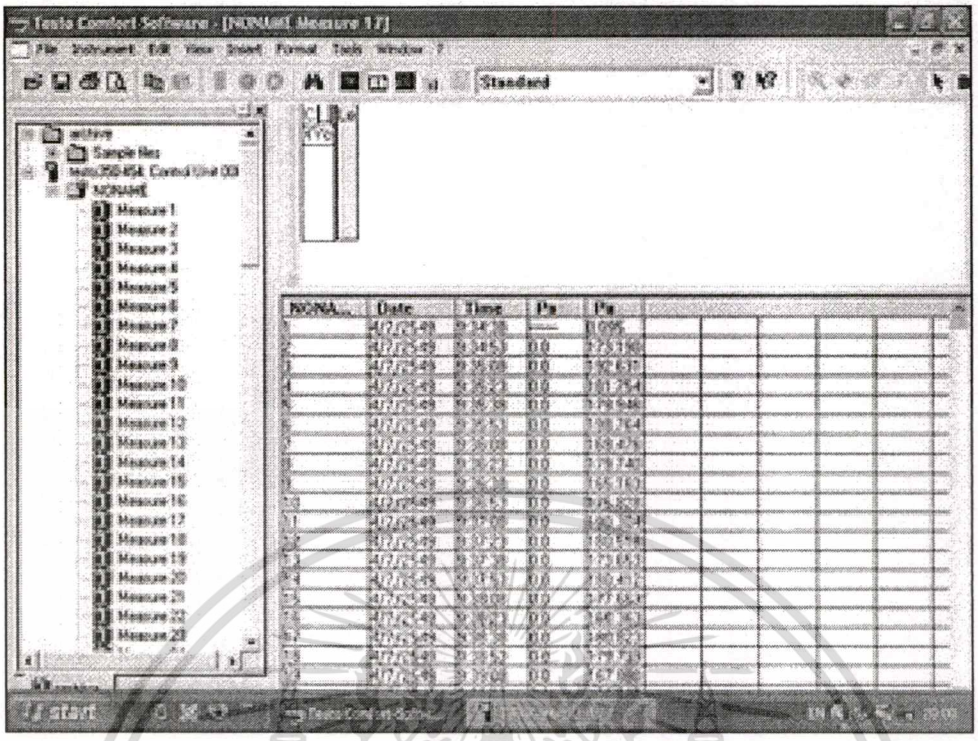
g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2

h คือ ความแตกต่างของความระดับของเหลว, m

ในการทดลองเครื่องมือที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จะเป็นการวัดความดันทางด้านเข้าและออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วเปลี่ยนเป็นกระแสไฟส่งมายังเครื่องวัดความดันตกคร่อม ซึ่งเครื่องวัดจะทำการเปลี่ยนข้อมูลความดันด้านเข้าและออกที่ส่งมาให้เป็นตัวเลขดิจิตอลแสดงเป็นค่าความดันตกคร่อมเพื่อสะดวกในการอ่านและบันทึกข้อมูล โดยรูปที่ 4.9 จะแสดงโปรแกรมที่ใช้ในการเก็บข้อมูลความดันตกคร่อม

รูปที่ 4.8 แสดงรูปของเครื่องบันทึกความดันตกคร่อม – Testo350-M/XL-Testo454

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการเก็บข้อมูลความดันตกคร่อม

4.2.5 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิของของไหลภายในท่อจำเป็นต้องเลือกประเภทและชนิดของเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ซึ่งเครื่องมือวัดอุณหภูมิในทางอุตสาหกรรมมีให้เลือกหลายชนิดขึ้นอยู่กับช่วงของอุณหภูมิที่จะทำการวัด ความถูกต้องและแม่นยำ และความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิซึ่งอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม คือ เทอร์โมคัปเปิล ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยเทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้จาก –295°C ถึง 1929°C การเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลจะเลือกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันไป โดยหากเส้นผ่านศูนย์กลางโตจะมีช่วงการวัดอุณหภูมิที่สูงกว่าเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน หลักการพบว่าเมื่อนำลวดโลหะสองเส้นทำด้วยโลหะที่ต่างกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกันจะเกิดกระแสกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรของเส้นลวดทั้งสอง ปริมาณของกระแสไฟนี้จะเปลี่ยนตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง และถ้าเปิดปลายด้านหนึ่งออกจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ปลายเปิด

เทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Type K Chromel Alumel) สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิ -200°C ถึง 1370°C สายบวกทำมาจากโลหะผสมระหว่าง นิกเกิล 90% บวกโครเมี่ยม 10% และสายลบทำมาจากโลหะผสมนิกเกิล 95% + 5% ของผสมระหว่างอลูมิเนียมแมงกานีสและซิลิคอน คุณสมบัติเด่นของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K คือการให้แรงเคลื่อนเอาต์พุตสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานเทอร์โมคัปเปิลนั้นมักจะมีชิ้นส่วนอื่นประกอบเพิ่มเติมอีกเพื่อให้สามารถใช้งานเทอร์โมคัปเปิลได้ในสภาวะที่ต้องการและมีระยะเวลาการใช้ยาวนาน ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆ ดังนี้

1) ตัวเทอร์โมคัปเปิล เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้งานจะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน โดยเมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นจะทำให้ช่วงอุณหภูมิการใช้งานสูงขึ้น

2) ฉนวนหุ้มเทอร์โมคัปเปิล ฉนวนจะทำหน้าที่ป้องกันมิให้สายของเทอร์โมคัปเปิลเกิดการลัดวงจรและช่วยป้องกันไม่ให้สัมผัสกับปลอกหุ้มโลหะ (Protection tube) โดยฉนวนจะทำมาจากสารเคมีจำพวกแมกนีเซียมออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น

3) ท่อหุ้มป้องกัน ท่อที่หุ้มอยู่จะช่วยเสริมความแข็งแรงของตัวเทอร์โมคัปเปิลและยังช่วยยืดอายุการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลจากสภาพภายนอกอีกด้วย

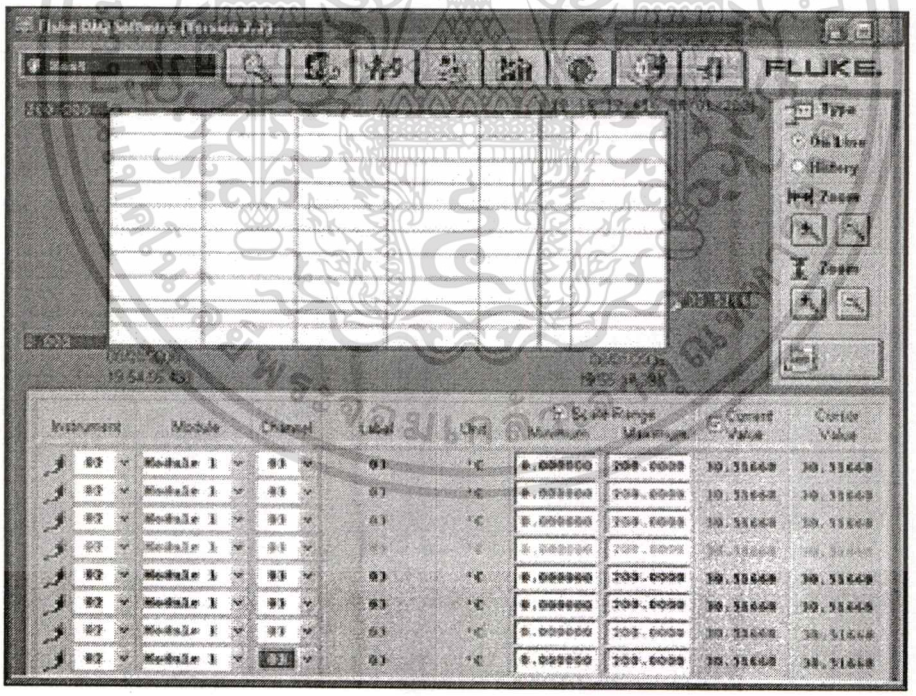
รูปที่ 4.10 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์เทอร์โมคัพเพิล

4.2.6 ระบบบันทึกข้อมูล

ระบบบันทึกข้อมูล (Data acquisition system) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและบันทึกอุณหภูมิที่ทำการต่อมาจากเทอร์โมคัพเพิล ซึ่งเทอร์โมคัพเพิลจะรับอุณหภูมิจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วเปลี่ยนเป็นกระแสไฟส่งมายังระบบบันทึกข้อมูล ซึ่งระบบบันทึกข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.11 จะทำการเปลี่ยนข้อมูลที่ส่งมาจากเทอร์โมคัพเพิลให้เป็นตัวเลขดิจิตอลเพื่อสะดวกในการอ่านและบันทึกข้อมูล รูปที่ 4.12 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 แสดงรูปของระบบบันทึกข้อมูล – Fluke Model 2680A

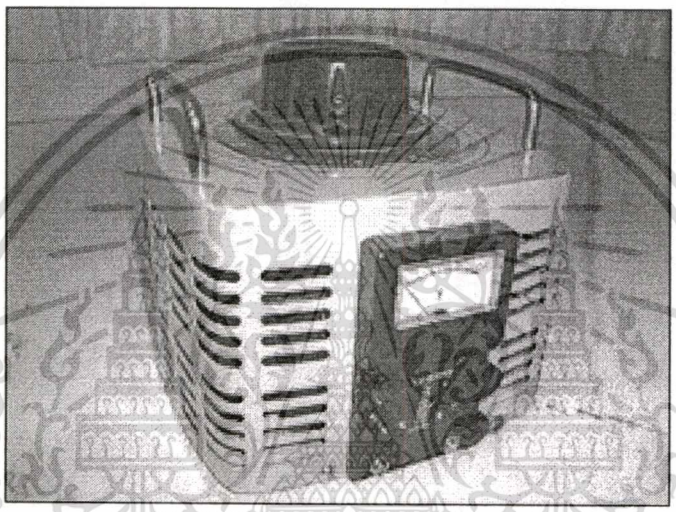


รูปที่ 4.12 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับลดหรือเพิ่ม ขนาดระดับของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากค่าหนึ่งเป็นอีกค่าหนึ่ง โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำผ่านวงจรแม่เหล็ก เช่นเดียวกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ซึ่งมีประโยชน์มากในด้านระบบส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง นอกจากนั้นหม้อแปลงไฟฟ้ายังสามารถใช้ประโยชน์สำหรับทำเป็นตัวกลางแปลงค่า Impedance ของ Load ให้มีค่าเหมาะสมกับสภาพการใช้งาน Variac ยังสามารถใช้เป็นอุปกรณ์วัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงรูปของ Variac

4.3 วิธีการทดลอง

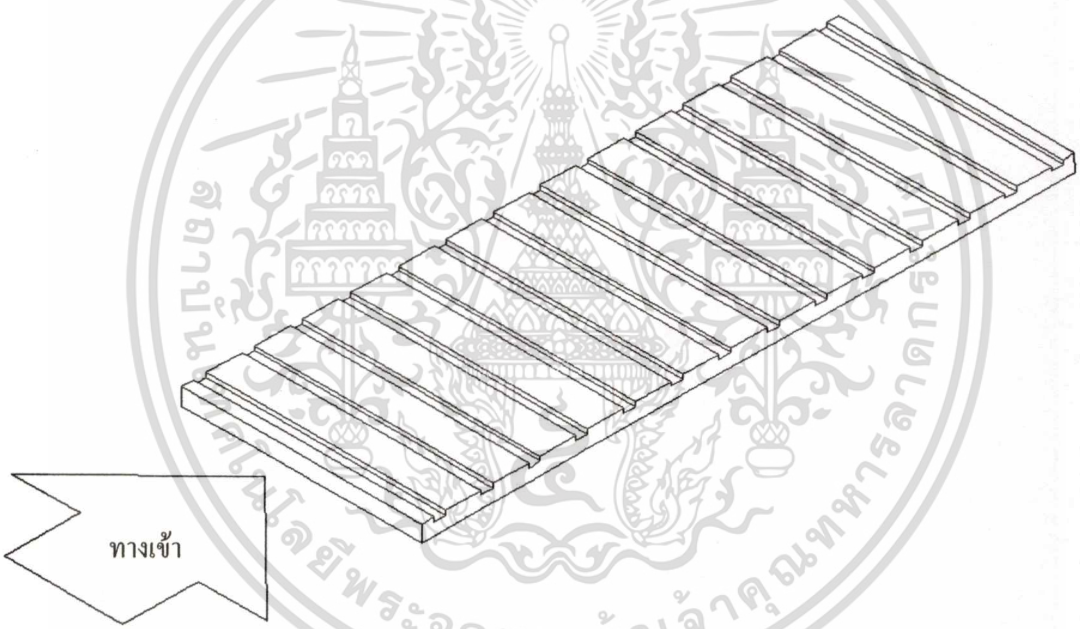
พิจารณาผลของการไหลภายในช่องขนานผ่านพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เริ่มการทดลองโดยเปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง
2. ปรับความสูงของมอนอมิเตอร์ให้อยู่ที่ระดับความสูงที่ต้องการ จากนั้นทำการวัดความเร็วลมของอากาศด้านทางออกจากชุดทดลอง และทำการหรี่วาล์วเพื่อวัดความเร็วลมของอากาศที่ความสูงของมานอมิเตอร์ต่าง ๆ กัน
3. เปิดชุดฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนกับระบบ โดยให้ผิวของช่องขนานได้รับความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant heat flux)
4. ปรับความเร็วลมของชุดทดลองโดยการปรับหรี่ที่วาล์วเพื่อให้ได้ความเร็วของของไหลครอบคลุมรูปแบบการไหลในช่วงการไหลทั้งแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน (ค่า Re อยู่ในช่วง 500 ถึง 20,000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

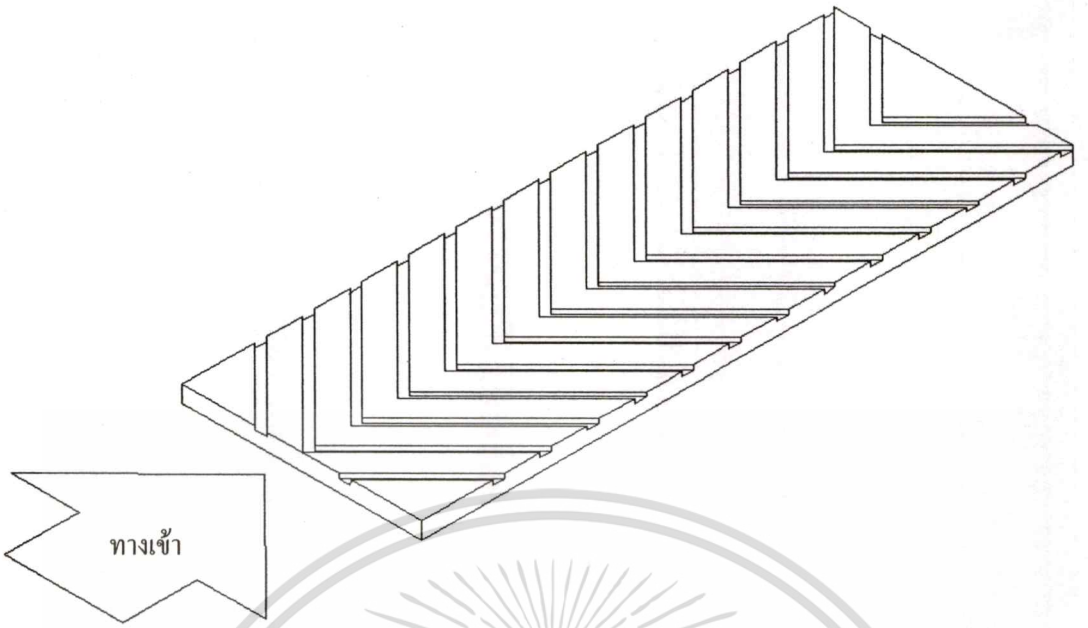
5. ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิผิวของช่องขนาน อุณหภูมิอากาศด้านเข้าและออกจากชุดทดลอง และบันทึกค่าความดันตกคร่อมชุดทดลอง
6. เริ่มทำการทดลองใหม่โดยการปรับค่าสัดส่วนความลึกต่อระยะระหว่างแผ่นขนาน (e/D) เท่ากับ 0.33, 0.25 และ 0.20 และที่การจัดวางของร่องที่เซาะแบบแนวตรง และแบบแนวเยื้อง

พิจารณาผลของช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ารูปแบบต่าง ๆ อันได้แก่ การเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมตรง การเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววี และ การเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมตรงที่มีการเพิ่มครีบรูปสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16

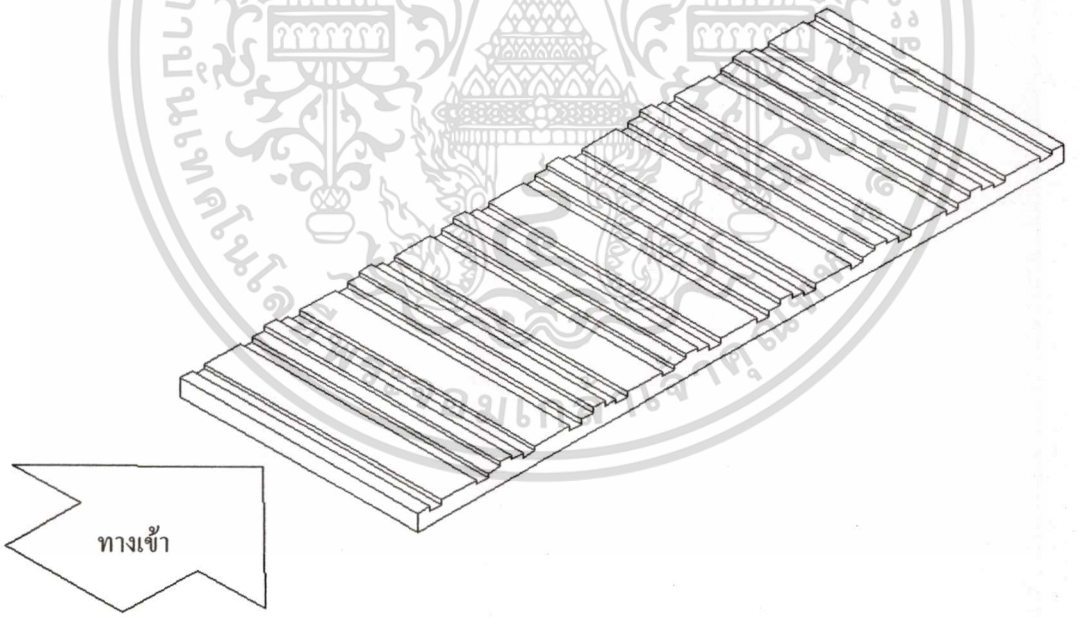


รูปที่ 4.14 แสดงแผ่นล่างของช่องขนานเซาะร่องสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงแผ่นล่างของช่องขนานเซาะร่องสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววี



รูปที่ 4.16 แสดงแผ่นล่างของช่องขนานเซาะร่องสี่เหลี่ยมที่มีการเพิ่มครีบรูปสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

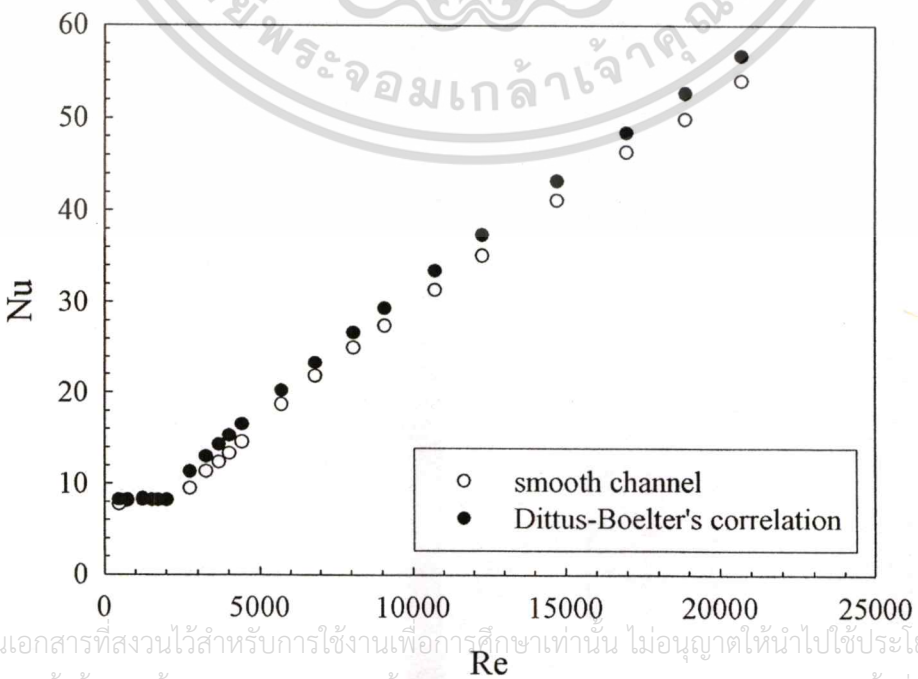
ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของช่องขนานที่มีการเซาะร่องซึ่งในที่นี้จะพิจารณาการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า, การเซาะร่องจัดวางรูปตัววี และการเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทั้งกรณีจัดวางแนวร่องตรงและแนวร่องเยื้อง เปรียบเทียบกับช่องขนานเรียบ โดยจะทำการทดลองแผ่นขนานเรียบเปรียบเทียบกับทฤษฎีด้วยซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังนี้

5.1 กรณีช่องขนานเรียบ

ในการศึกษาจะทดลองหาค่าการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในช่องขนานเรียบ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี เพื่อพิจารณารูปแบบของการทดลองที่ใช้ว่าให้ผลการทดลองออกมาเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถแสดงผลการเปรียบเทียบได้ดังนี้

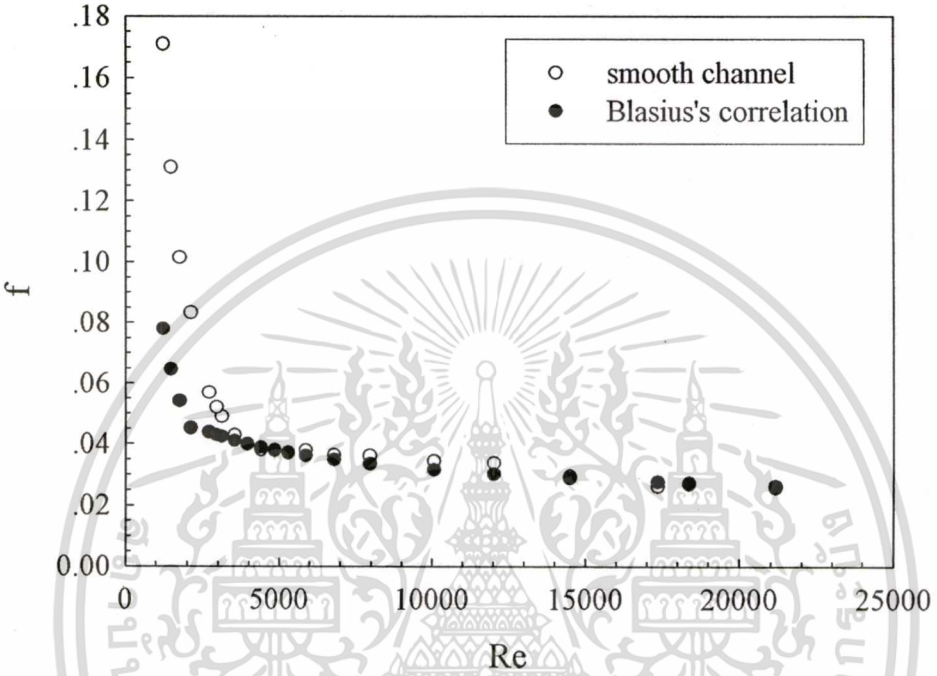
รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ของช่องขนานเรียบกับทฤษฎี ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Re > 4,000) ค่าที่ทดลองได้มีค่าคลาดเคลื่อนกับทฤษฎีประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ สำหรับช่วง 2,300 < Re < 4,000 ค่าที่ทดลองได้มีความคลาดเคลื่อนกับทฤษฎีประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Re ≤ 2,300) ค่าที่ทดลองได้มีความคลาดเคลื่อนกับทฤษฎีประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re สำหรับช่องขนานเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f ของช่องขนานเรียบกับทฤษฎี ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะพบว่าในช่วง Re > 2,300 ค่าที่ทดลองได้มีค่าคลาดเคลื่อนกับทฤษฎีประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Re ≤ 2,300) ค่าที่ทดลองได้มีความคลาดเคลื่อนกับทฤษฎีประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re สำหรับช่องขนานเรียบ

เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกรณีช่องขนานเรียบกับค่าตามทฤษฎี พบว่ามีแนวโน้มและมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และสามารถนำค่าจากการทดลองมาใช้ในการวิเคราะห์ผลได้

5.2 ช่องขนานเซาะร่อง

5.2.1 กรณีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกรณีช่องขนานเรียบกับช่องขนานที่มีการเซาะร่องสี่เหลี่ยมสำหรับการไหลแบบราบเรียบได้ดังนี้

รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่สัดส่วนความลึกของร่องกับระยะห่างระหว่างช่องขนาน (e/D) เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะพบว่าค่า Re ที่เพิ่มขึ้นไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลต่อค่า Nu แต่ที่ e/D เพิ่มขึ้น ค่า Nu จะมีค่าเพิ่มขึ้น และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะมีค่า Nu สูงกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับอัตราส่วนของ Nu ระหว่างช่องขนานเซาะร่องกับช่องขนานเรียบ (Nu/Nu_0) ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 2%, 2% และ 4.5% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ ส่วนที่ค่า e/D = 0.20 ค่า Nu เฉลี่ยจะสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.02 และ 1.00 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.12 และ 1.10 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.17 และ 1.12 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

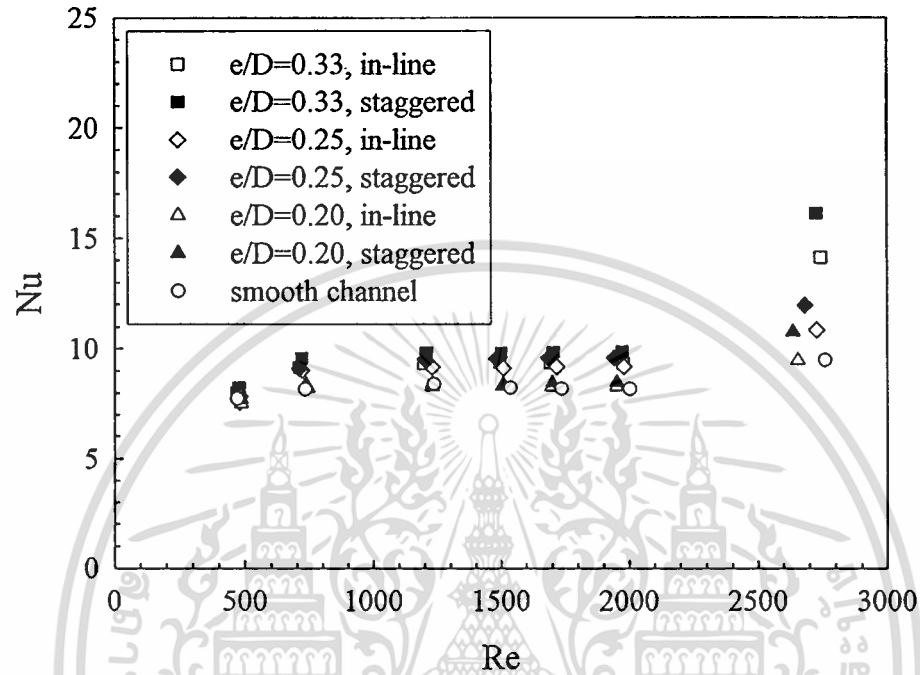
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่า Re ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า f ลดลง แต่ที่ e/D เพิ่มขึ้น f จะมีค่าเพิ่มขึ้น และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะมีค่า f สูงกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับอัตราส่วนค่า f ระหว่างช่องขนานเซาะร่องกับช่องขนานเรียบ (f/f_0) ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 49%, 58% และ 63% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ ส่วนที่ค่า e/D = 0.20 ค่า f เฉลี่ยจะสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.95 และ 1.31 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 2.20 และ 1.39 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 2.41 และ 1.48 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

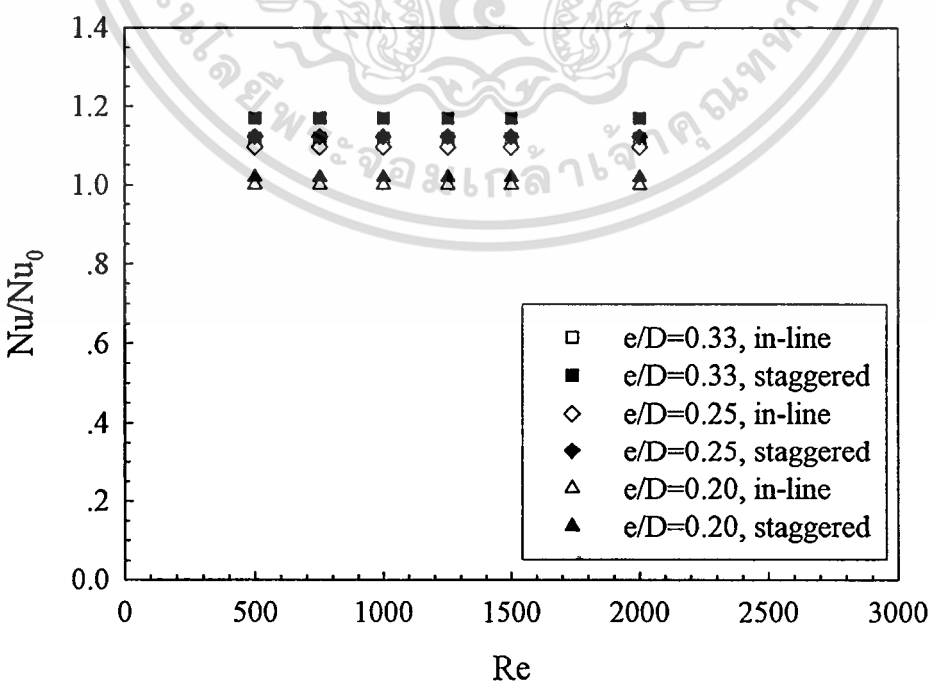
รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับประสิทธิภาพ (η) ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะต่ำกว่าแบบวางตรงประมาณ 10%, 12% และ 11% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ ส่วนที่ค่า e/D = 0.20 ค่า η เฉลี่ยจะสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 0.82 และ 0.91 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า η เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 0.86 และ 0.98 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D =

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.33 จะให้ค่า η เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 0.87 และ 0.98 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

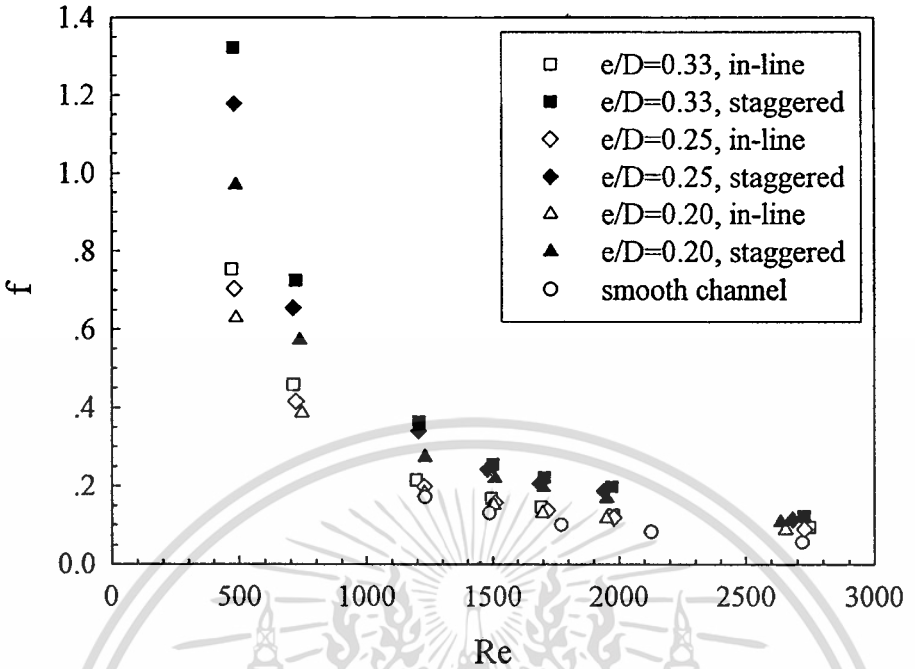


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเซาะร่อง

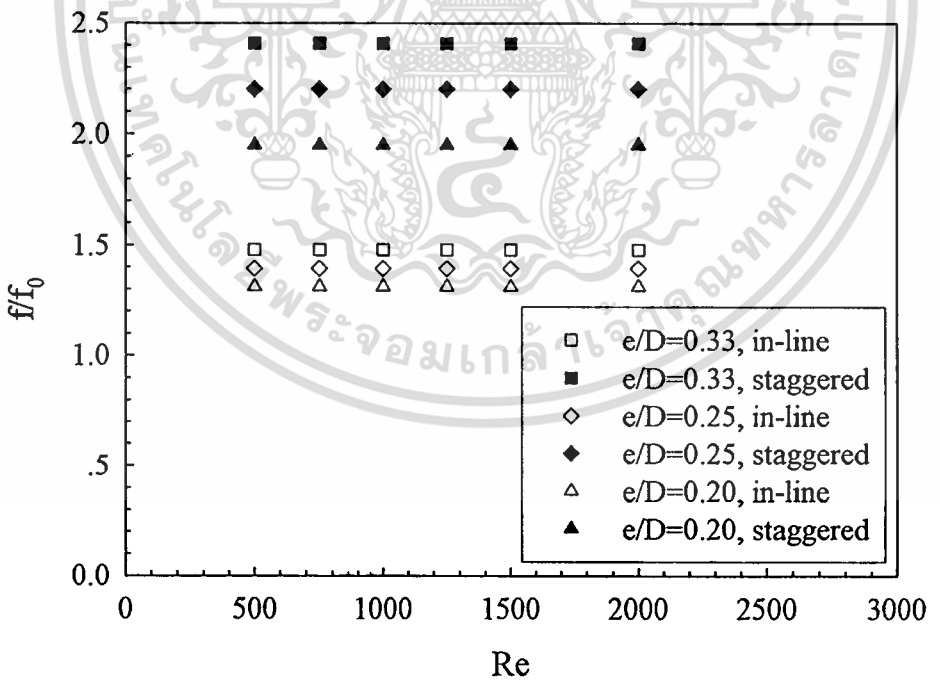


รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re กรณีเซาะร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

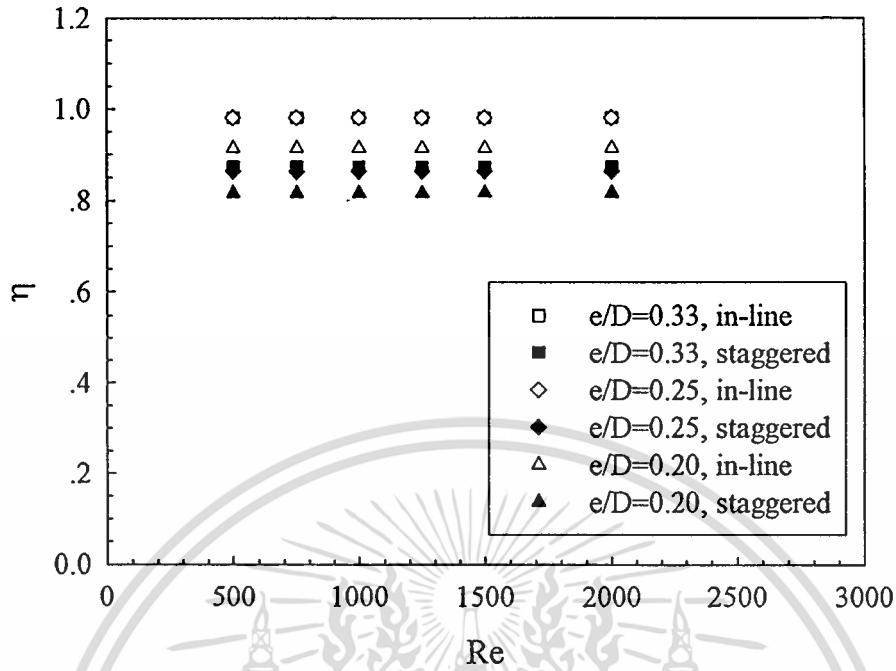


รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีเซาะร่อง



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re กรณีเซาะร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re กรณีเซาะร่อง

สรุปได้ว่าในช่วงการไหลแบบราบเรียบ การเซาะร่องจะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประมาณ 0% ถึง 17% ในขณะเดียวกันก็ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้นประมาณ 31% ถึง 141% โดยการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 2% ถึง 4.5% และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าแบบแนวตรงประมาณ 49% ถึง 63% และการเซาะร่องจะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าการไม่เซาะร่องประมาณ 2% ถึง 18%

5.2.2 กรณีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกรณีช่องขนานเรียบกับช่องขนานที่มีการเซาะร่องสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนได้ดังนี้

รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะพบว่า Re ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า Nu เพิ่มขึ้นด้วย และที่ค่า e/D เพิ่มขึ้น Nu จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะมีค่า Nu สูงกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu/Nu_0 ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่องกับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

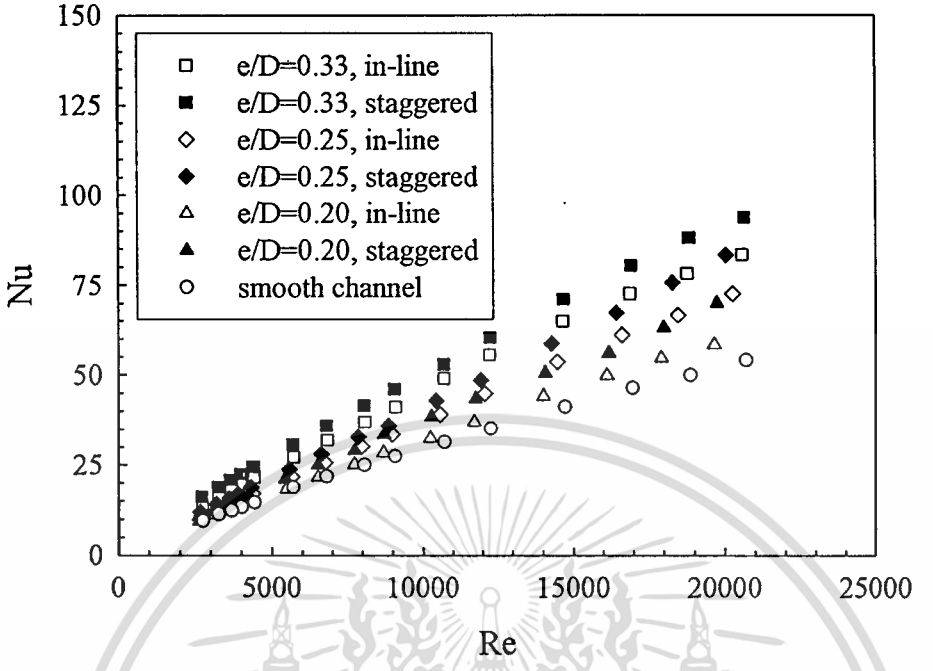
การเซาะร่องแบบวางเยื้องจะสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 16%, 10% และ 12% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ ส่วนที่ค่า e/D = 0.20 ค่า Nu เฉลี่ยจะสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.25 และ 1.08 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.39 และ 1.26 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.70 และ 1.52 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่า Re ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า f ลดลง แต่ที่ค่า e/D เพิ่มขึ้น f จะมีค่าเพิ่มขึ้น และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะมีค่า f สูงกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

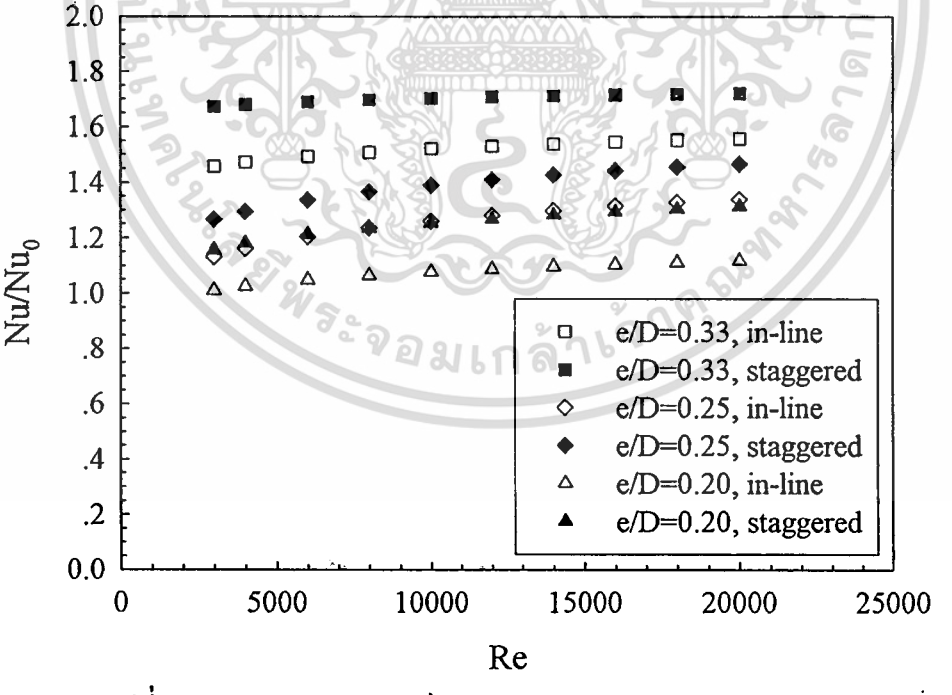
รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f/f_0 ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 14%, 15% และ 18% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ ส่วนที่ค่า e/D = 0.20 ค่า f เฉลี่ยจะสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.83 และ 1.61 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.90 และ 1.65 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 2.00 และ 1.69 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ η ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 10%, 10% และ 3% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ ส่วนที่ค่า e/D = 0.20 ค่า η เฉลี่ยจะสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.02 และ 0.92 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า η เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.12 และ 1.06 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า η เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.35 และ 1.27 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

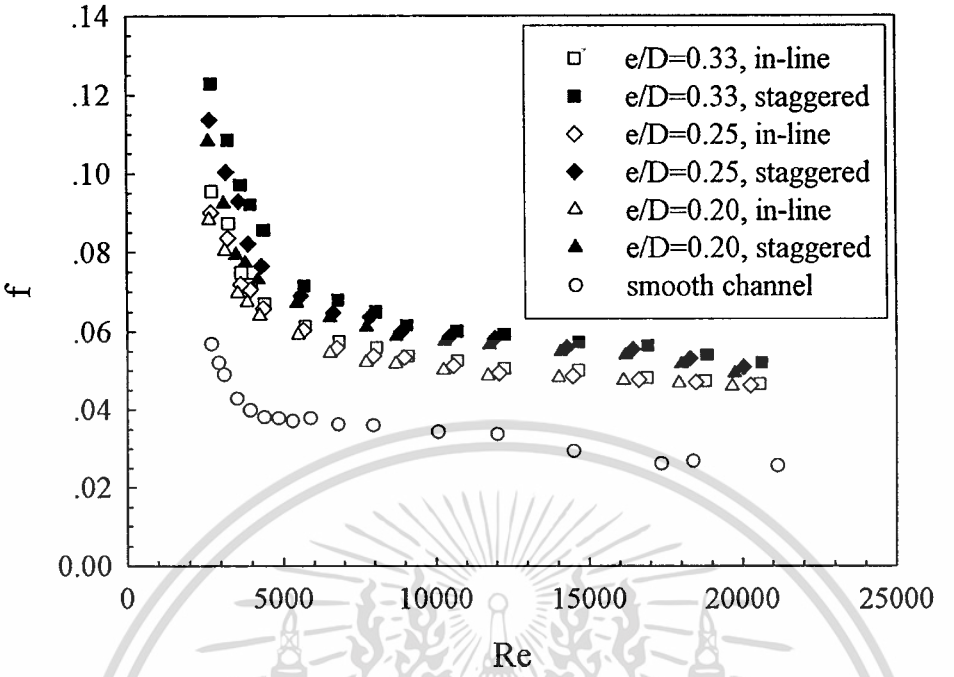


รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเซาะร่อง

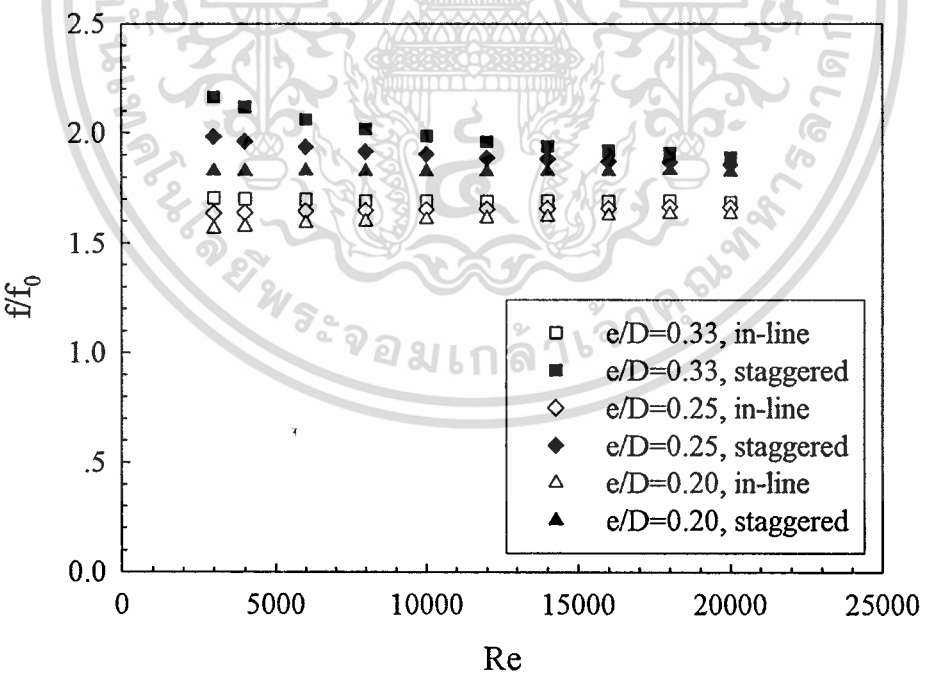


รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re กรณีเซาะร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

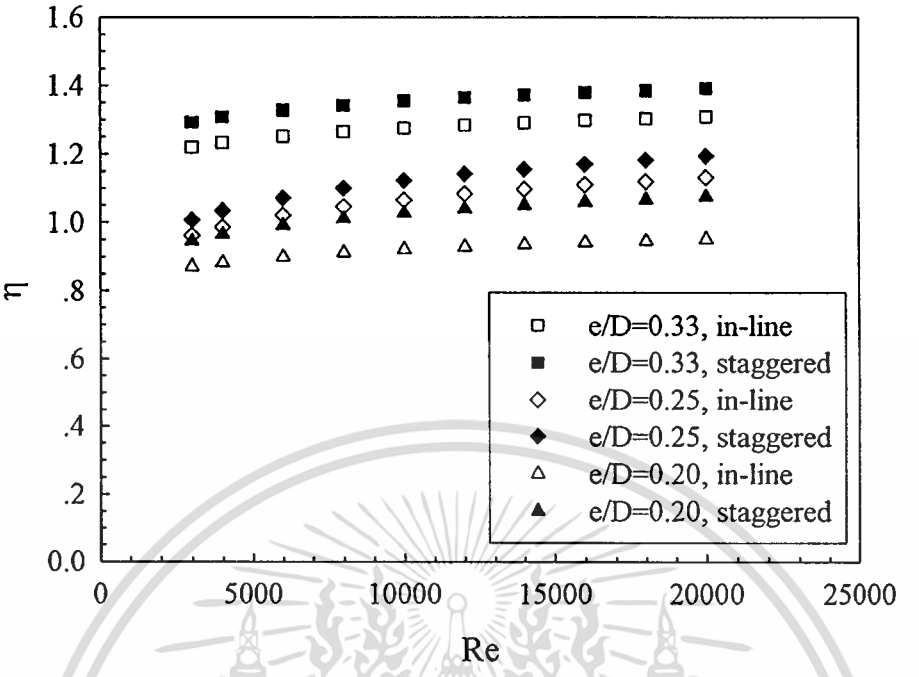


รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีเซาะร่อง



รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re กรณีเซาะร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re กรณีเซาะร่อง

สรุปได้ว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน การเซาะร่องจะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประมาณ 8% ถึง 70% ในขณะเดียวกันก็ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้นประมาณ 61% ถึง 100% โดยการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 10% ถึง 16% และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าแบบแนวตรงประมาณ 14% ถึง 18% และการเซาะร่องจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการไม่เซาะร่องประมาณ -8% ถึง 35%

5.2.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re และ e/D

- ช่องขนานเซาะร่องตรงแบบแนวตรงกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Re อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) สำหรับช่องขนานที่มีการเซาะร่องแบบแนวตรงกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Nu = A_0 \, \mathrm{Re}^{0.9337}$$

โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า Nu โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Re^{0.9337}$ กับ e/D จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{Nu}{\mathrm{Re}^{0.9337}} = 0.0177 \times \left(\frac{e}{D}\right)^{0.6844}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$Nu = 0.0177\,\mathrm{Re}^{0.9337}\left(\frac{e}{D}\right)^{0.6844}$$

- ช่องขนานเซาะร่องตรงแบบแนวเยื้องกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Re อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) สำหรับช่องขนานที่มีการเซาะร่องแบบแนวเยื้องกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Nu = A_0\,\mathrm{Re}^{0.9357}$$

โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า Nu โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Re^{0.9357}$ กับ e/D จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{Nu}{\mathrm{Re}^{0.9357}} = 0.0176\times\left(\frac{e}{D}\right)^{0.6042}$$

ดังนั้น

$$Nu = 0.0176\,\mathrm{Re}^{0.9357}\left(\frac{e}{D}\right)^{0.6042}$$

5.2.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re และ e/D

- ช่องขนานเซาะร่องตรงแบบแนวตรงกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Re อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) สำหรับช่องขนานที่มีการเซาะร่องแบบแนวตรงกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f = A_0\,\mathrm{Re}^{-0.1870}$$

โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า f โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $f/Re^{-0.1870}$ กับ e/D จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{f}{\mathrm{Re}^{-0.1870}} = 0.3300\times\left(\frac{e}{D}\right)^{0.0883}$$

ดังนั้น

$$f = 0.3300\,\mathrm{Re}^{-0.1870}\left(\frac{e}{D}\right)^{0.0883}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่องขนานเซาะร่องตรงแบบแนวเยื้องกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Re อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) สำหรับช่องขนานที่มีการเซาะร่องแบบแนวเยื้องกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

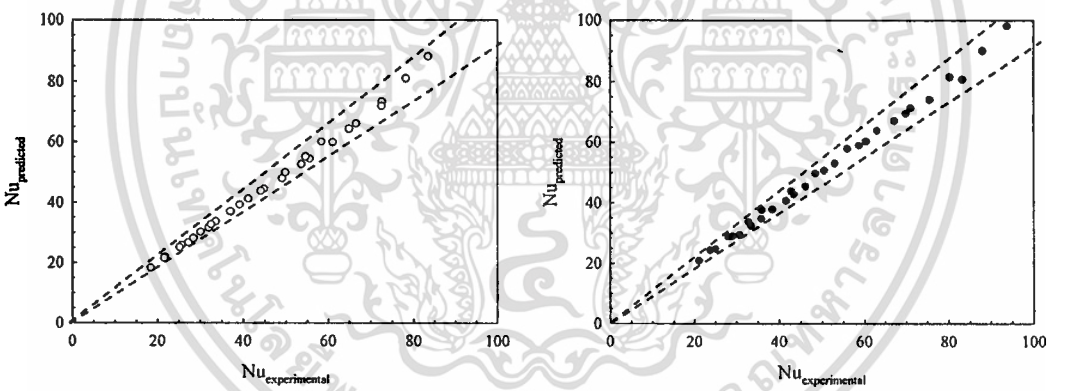
$$f = A_0 \, \mathrm{Re}^{-0.2138}$$

โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า f โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $f/\mathrm{Re}^{-0.2138}$ กับ e/D จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

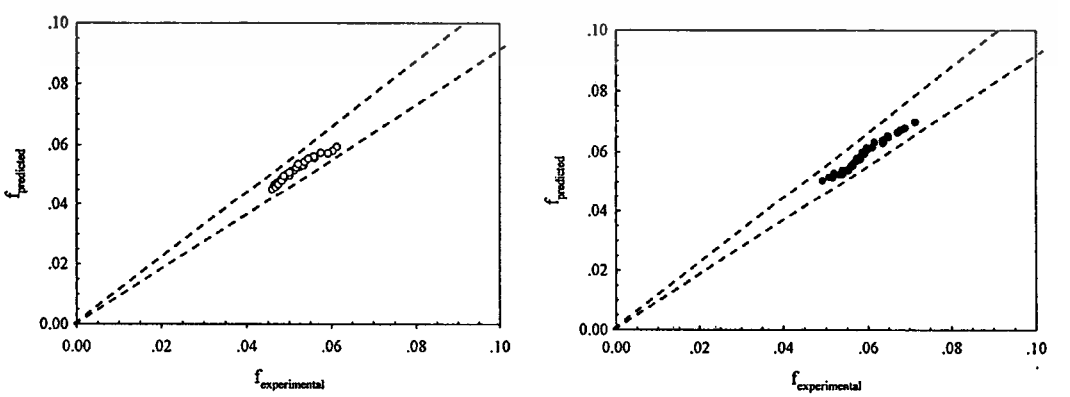
$$\frac{f}{\mathrm{Re}^{-0.2138}} = 0.5065 \times \left(\frac{e}{D}\right)^{0.1200}$$

ดังนั้น

$$f = 0.5065\,\mathrm{Re}^{-0.2138}\left(\frac{e}{D}\right)^{0.1200}$$



รูปที่ 5.13 แสดงความคลาดเคลื่อนจากสมการ Nu กรณีเซาะร่องแนวตรงและแนวเยื้อง



รูปที่ 5.14 แสดงความคลาดเคลื่อนจากสมการ f กรณีเซาะร่องแนวตรงและแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.13 และ 5.14 พบว่าความคลาดเคลื่อนของ Nu และ f ที่ได้จากการคำนวณมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ±10% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5.3 ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววี

5.3.1 กรณีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกรณีช่องขนานเรียบกับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีสำหรับการไหลแบบราบเรียบได้ดังนี้

รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่า Re ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่า Nu แต่ที่ค่า e/D เพิ่มขึ้น ค่า Nu จะมีค่าเพิ่มขึ้น และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะมีค่านัสเซิลท์สูงกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu/Nu_0 ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่องกับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 4%, 2% และ 2% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ ส่วนที่ค่า e/D = 0.20 ค่า Nu เฉลี่ยจะสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.56 และ 1.50 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.87 และ 1.83 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.93 และ 1.90 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

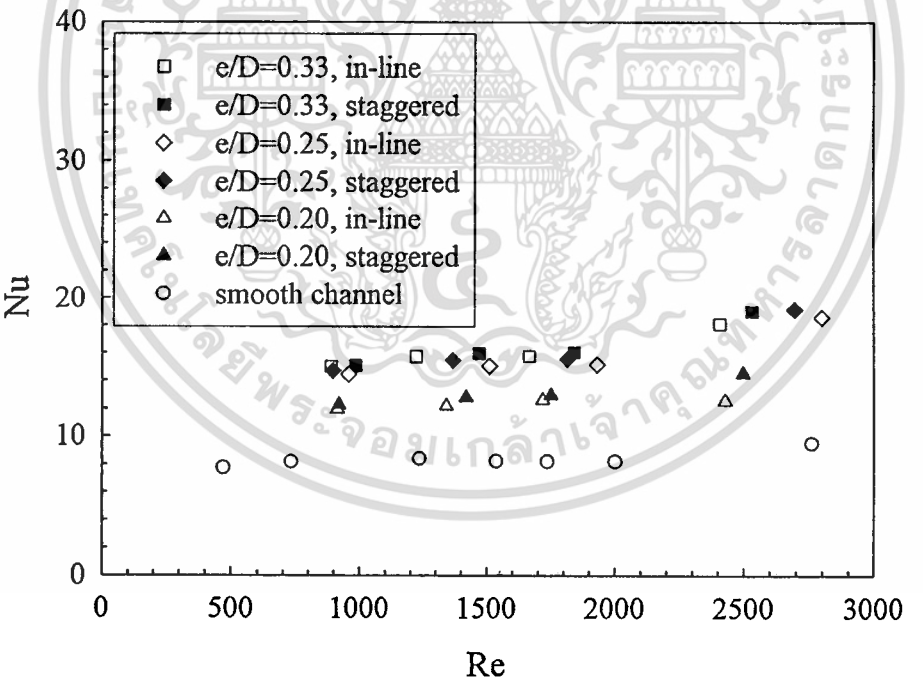
รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่า Re ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า f ลดลง แต่ที่ค่า e/D เพิ่มขึ้น f จะมีค่าเพิ่มขึ้น และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะมีค่า f สูงกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f/f_0 ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องจัดวางตัวรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะมีค่าสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 54%, 51% และ 50% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ โดยที่ค่า e/D = 0.20 ค่า f เฉลี่ยจะสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.83 และ 1.19 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

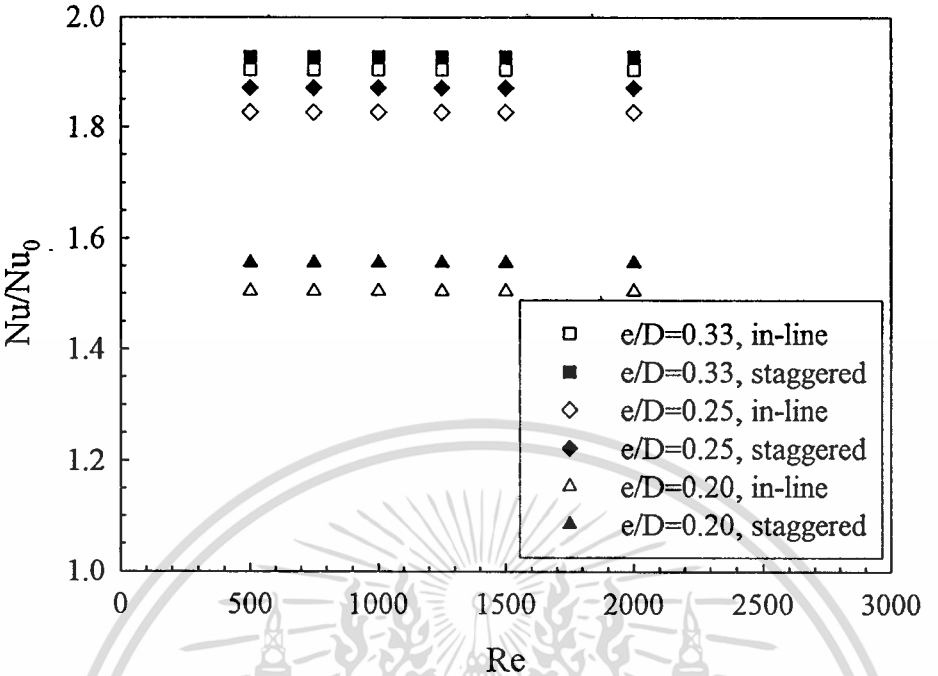
เรียบประมาณ 2.12 และ 1.40 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 2.43 และ 1.62 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ η ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องจัดวางตัวรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะต่ำกว่าแบบวางตรงประมาณ 11%, 10% และ 12% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ โดยที่ค่า e/D = 0.20 ค่า η เฉลี่ยจะสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.27 และ 1.42 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า η เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.46 และ 1.63 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า η เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.43 และ 1.62 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

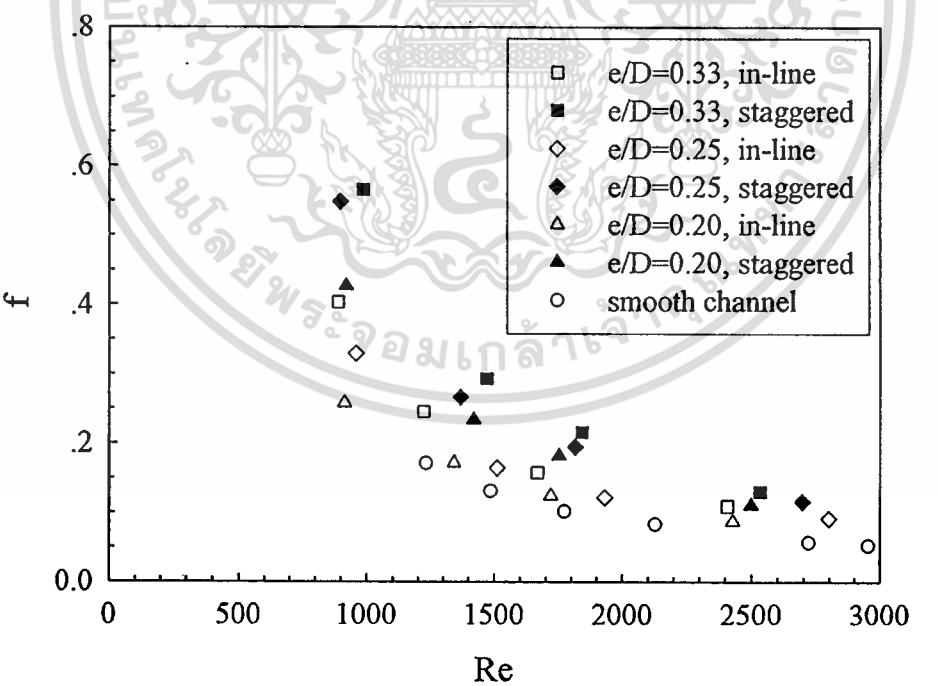


รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

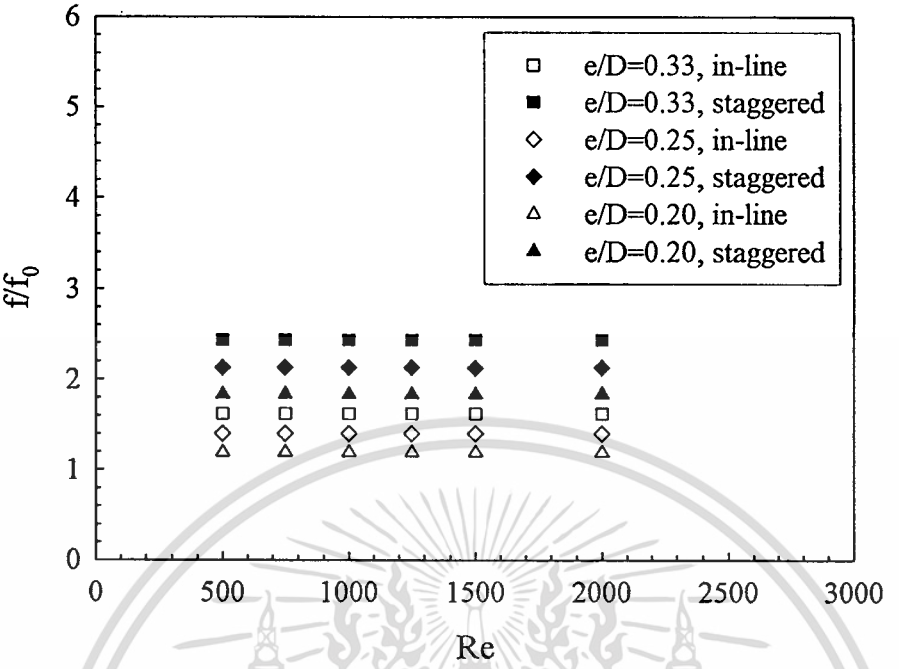


รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี

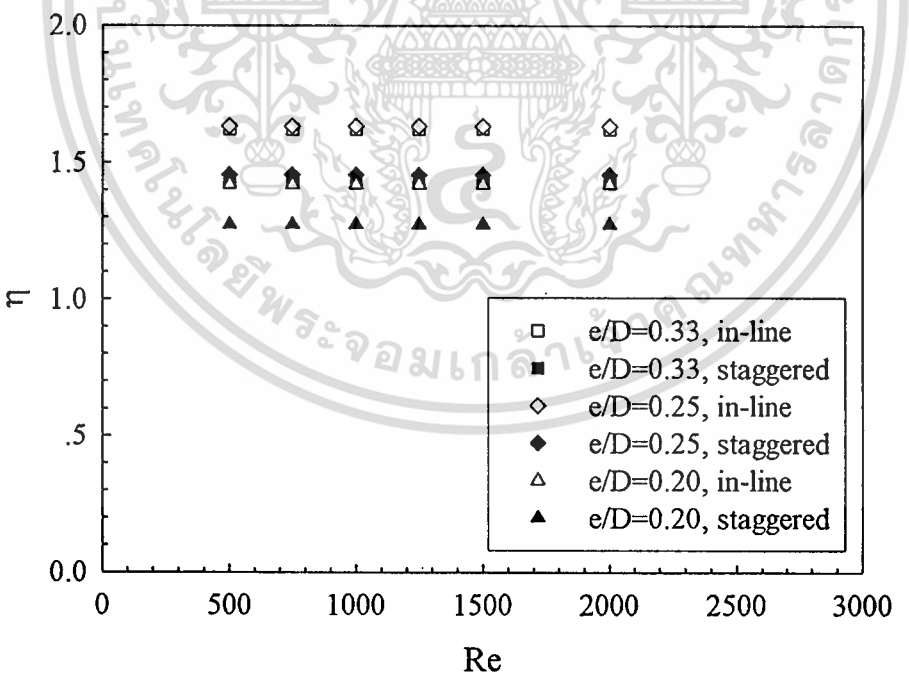


รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี



รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี

สรุปได้ว่าในช่วงการไหลแบบราบเรียบ การเซาะร่องจัดวางรูปตัววีจะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประมาณ 50% ถึง 93% ในขณะเดียวกันก็ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้นประมาณ 19% ถึง 143% โดยการเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบวางเยื้องจะให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 2% ถึง 4% และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 50% ถึง 54% และการเซาะร่องจัดวางรูปตัววีจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการไม่เซาะร่องประมาณ 27% ถึง 62%

5.3.2 กรณีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกรณีช่องขนานเรียบกับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนได้ดังนี้

รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่า Re ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า Nu เพิ่มขึ้นด้วย และที่ค่า e/D เพิ่มขึ้น Nu จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะมีค่า Nu สูงกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu/Nu_0 ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่องกับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 27%, 14% และ 10% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ โดยที่ค่า e/D = 0.20 ค่า Nu เฉลี่ยจะสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.72 และ 1.35 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 2.26 และ 1.99 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 2.76 และ 2.50 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

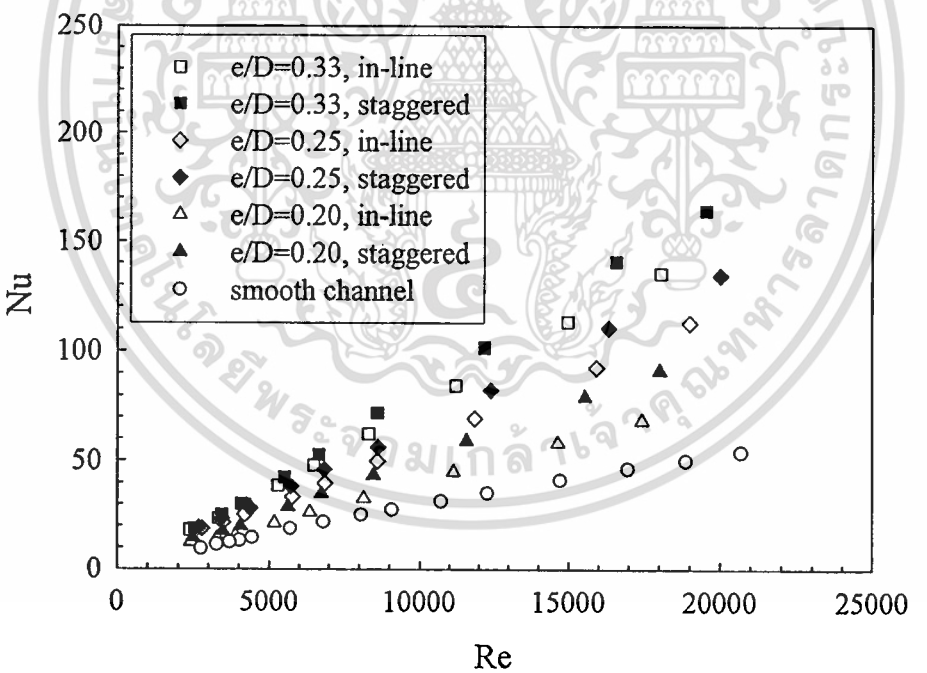
รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่า Re ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า f ลดลง แต่ที่ค่า e/D เพิ่มขึ้น f จะมีค่าเพิ่มขึ้น และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะมีค่า f สูงกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f/f_0 ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 17%, 16% และ 16% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ โดยที่ค่า e/D = 0.20 ค่า f เฉลี่ยจะสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.78 และ 1.52 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

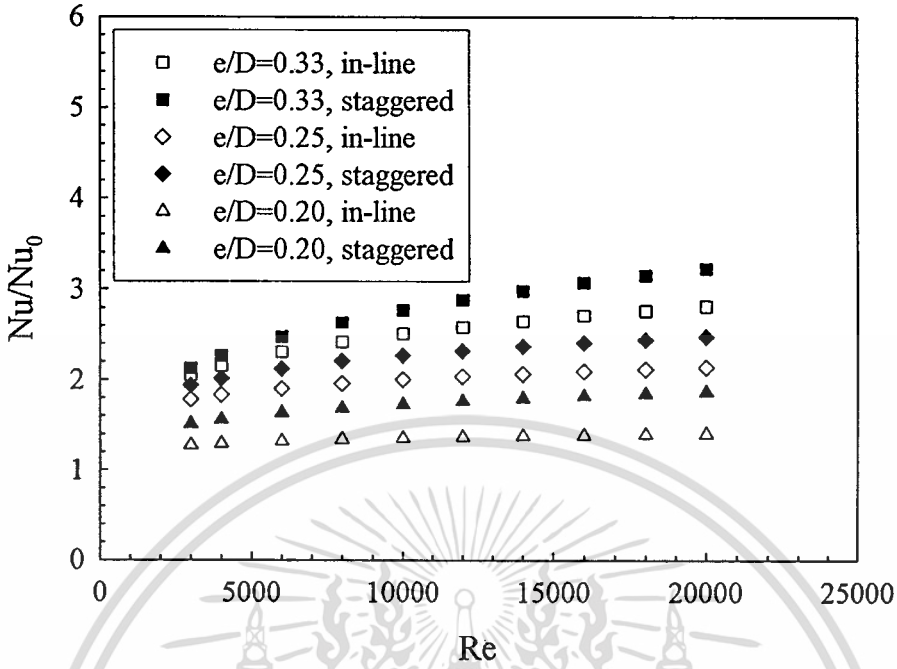
เรียบประมาณ 1.90 และ 1.64 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 2.01 และ 1.73 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ η ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 21%, 8% และ 5% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ โดยที่ค่า e/D = 0.20 ค่า η เฉลี่ยจะสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.42 และ 1.17 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า η เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.82 และ 1.69 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า η เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 2.19 และ 2.08 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

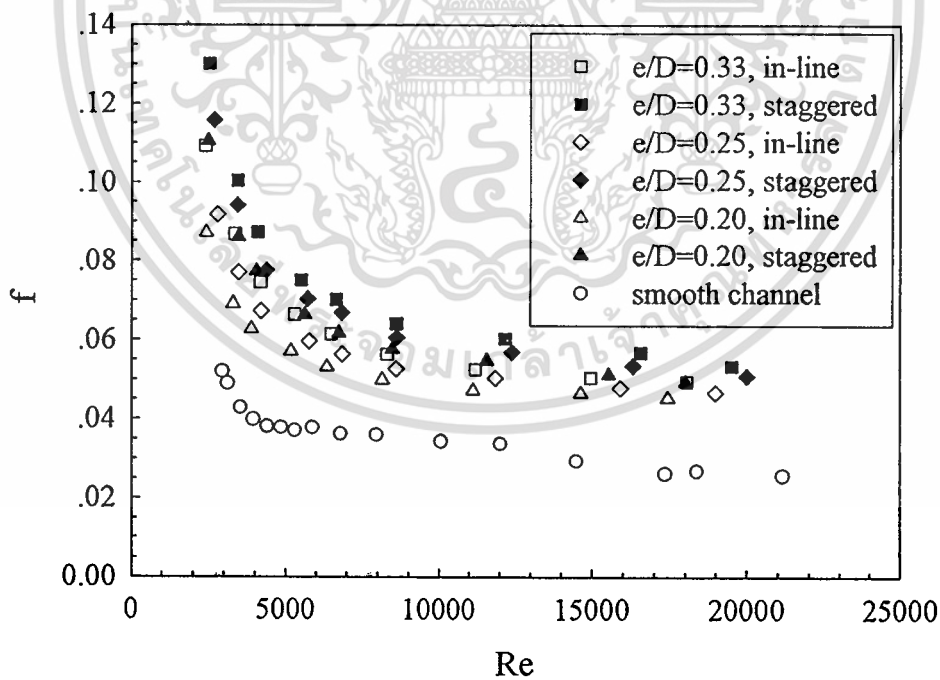


รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

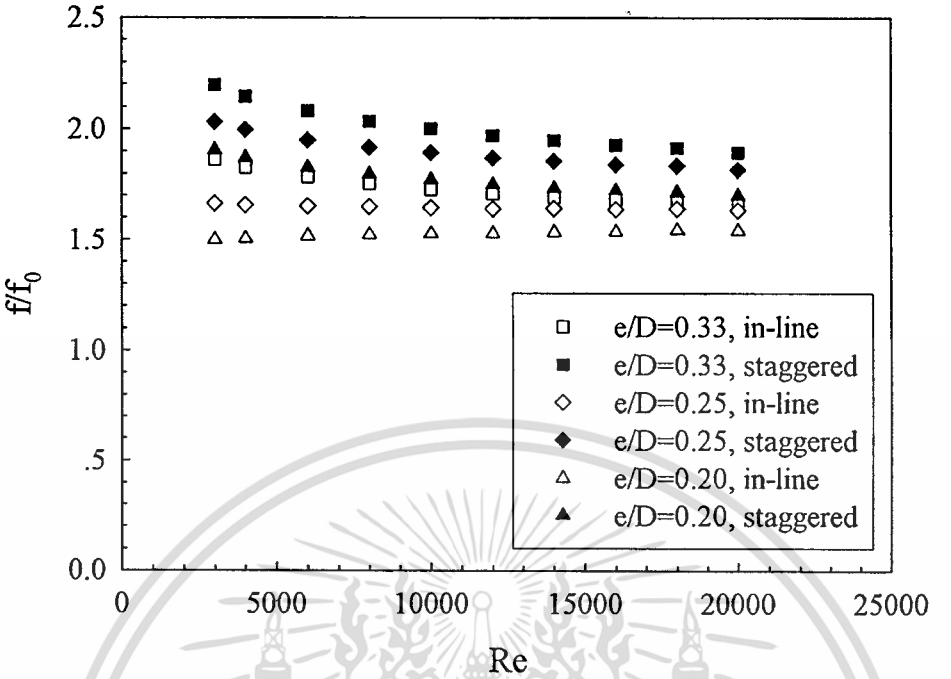


รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี

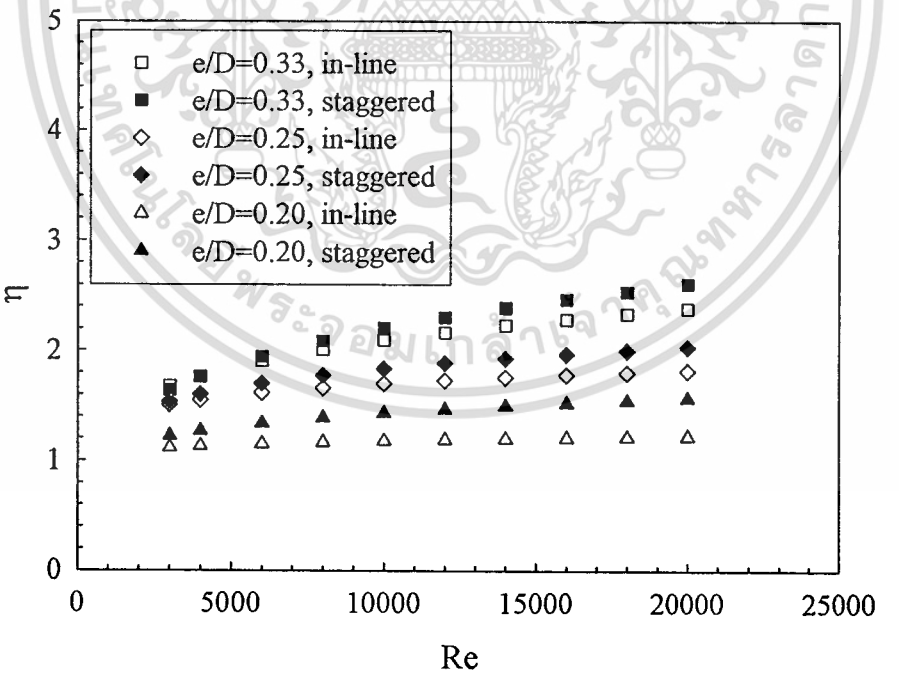


รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี



รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re กรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววี

สรุปได้ว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน การเซาะร่องจัดวางรูปตัววีจะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประมาณ 35% ถึง 176% ในขณะเดียวกันก็ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้นประมาณ 52% ถึง 101% โดยการเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบวางเยื้องจะให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 10% ถึง 27% และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 16% ถึง 17% และการเซาะร่องจัดวางรูปตัววีจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการไม่เซาะร่องประมาณ 17% ถึง 119%

5.3.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re และ e/D

- ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Re อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) สำหรับช่องขนานที่มีการเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Nu = A_0 \, \mathrm{Re}^{1.0183}$$

โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า Nu โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Re^{1.0183}$ กับ e/D จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{Nu}{\mathrm{Re}^{1.0183}} = 0.025 \times \left(\frac{e}{D}\right)^{1.2175}$$

ดังนั้น

$$Nu = 0.025 \, \mathrm{Re}^{1.0183} \left(\frac{e}{D}\right)^{1.2175}$$

- ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Re อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) สำหรับช่องขนานที่มีการเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Nu = A_0 \, \mathrm{Re}^{1.0365}$$

โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า Nu โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Re^{1.0365}$ กับ e/D จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{Nu}{\mathrm{Re}^{1.0365}} = 0.0168 \times \left(\frac{e}{D}\right)^{0.9371}$$

ดังนั้น

$$Nu = 0.0168 \, \mathrm{Re}^{1.0365} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.9371}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re และ e/D

- ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวตรงกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Re อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) สำหรับช่องขนานที่มีการเซาะร่องแบบแนวตรงกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f = A_0 \,\mathrm{Re}^{-0.2048}$$

โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า f โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $f/\mathrm{Re}^{-0.2048}$ กับ e/D จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{f}{\mathrm{Re}^{-0.2048}} = 0.4786 \times \left(\frac{e}{D}\right)^{0.2399}$$

ดังนั้น

$$f = 0.4786\,\mathrm{Re}^{-0.2048}\left(\frac{e}{D}\right)^{0.2399}$$

- ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววีแบบแนวเยื้องกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Re อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) สำหรับช่องขนานที่มีการเซาะร่องแบบแนวเยื้องกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f = A_0 \,\mathrm{Re}^{-0.2469}$$

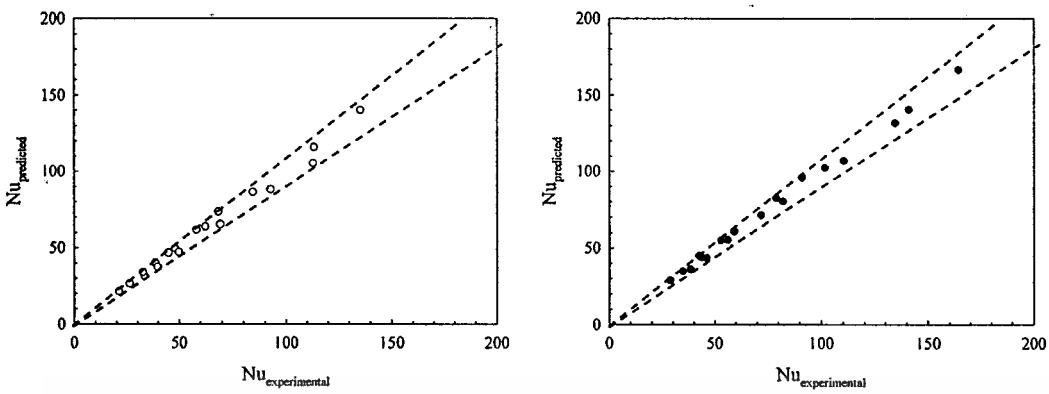
โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า f โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $f/\mathrm{Re}^{-0.2469}$ กับ e/D จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{f}{\mathrm{Re}^{-0.2469}} = 0.7939 \times \left(\frac{e}{D}\right)^{0.2257}$$

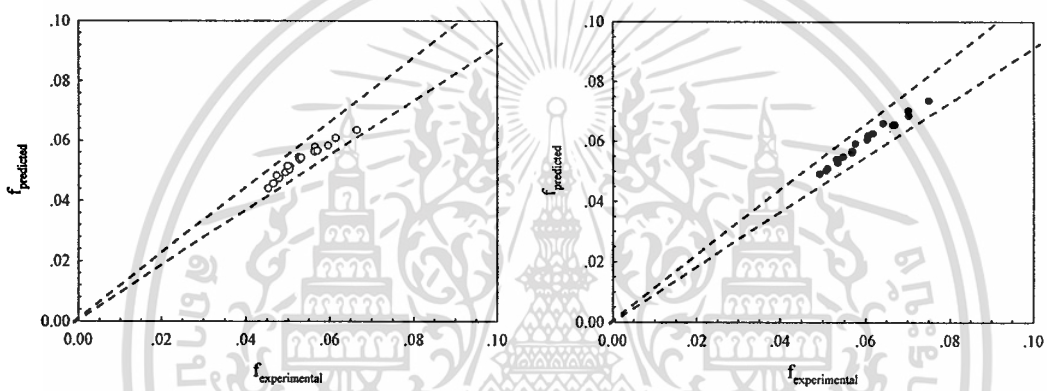
ดังนั้น

$$f = 0.7939\,\mathrm{Re}^{-0.2469}\left(\frac{e}{D}\right)^{0.2257}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 แสดงความคลาดเคลื่อนจากสมการ Nu กรณีเซาะร่องจัดวางตัววีแนวตรงและแนวเยื้อง



รูปที่ 5.26 แสดงความคลาดเคลื่อนจากสมการ f กรณีเซาะร่องจัดวางตัววีแนวตรงและแนวเยื้อง

จากรูปที่ 5.25 และ 5.26 พบว่าความคลาดเคลื่อนของ Nu และ f ที่ได้จากการคำนวณมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ±10% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5.4 กรณีช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ

5.4.1 กรณีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกรณีช่องขนานเรียบกับช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบได้ดังนี้

รูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่า Re ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า Nu เพิ่มขึ้น และที่ค่า e/D เพิ่มขึ้น ค่า Nu จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะมีค่า Nu ต่ำกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

รูปที่ 5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu/Nu_0 ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่องกับช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ

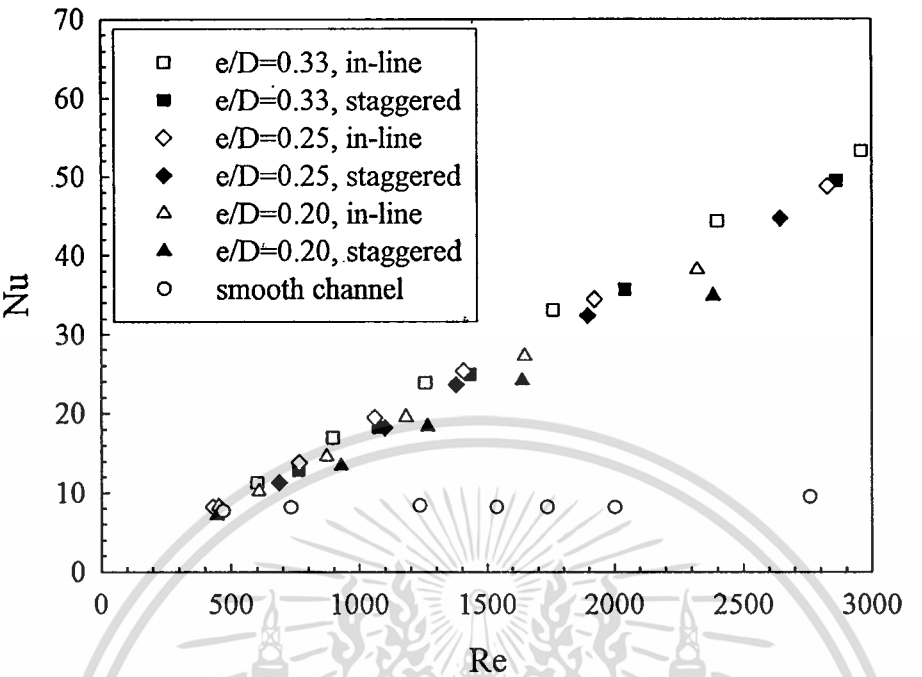
แบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะให้ผลต่ำกว่าแบบวางตรงประมาณ 3%, 6% และ 5% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ โดยที่ค่า e/D = 0.20 ค่า Nu เฉลี่ยจะสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 2.65 และ 2.74 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 2.93 และ 3.12 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 3.23 และ 3.39 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

รูปที่ 5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่มีการเพิ่มครีบรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่มีการเพิ่มครีบรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่า Re ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า f ลดลง แต่ที่ค่า e/D เพิ่มขึ้น f จะมีค่าเพิ่มขึ้น และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะมีค่า f ต่ำกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

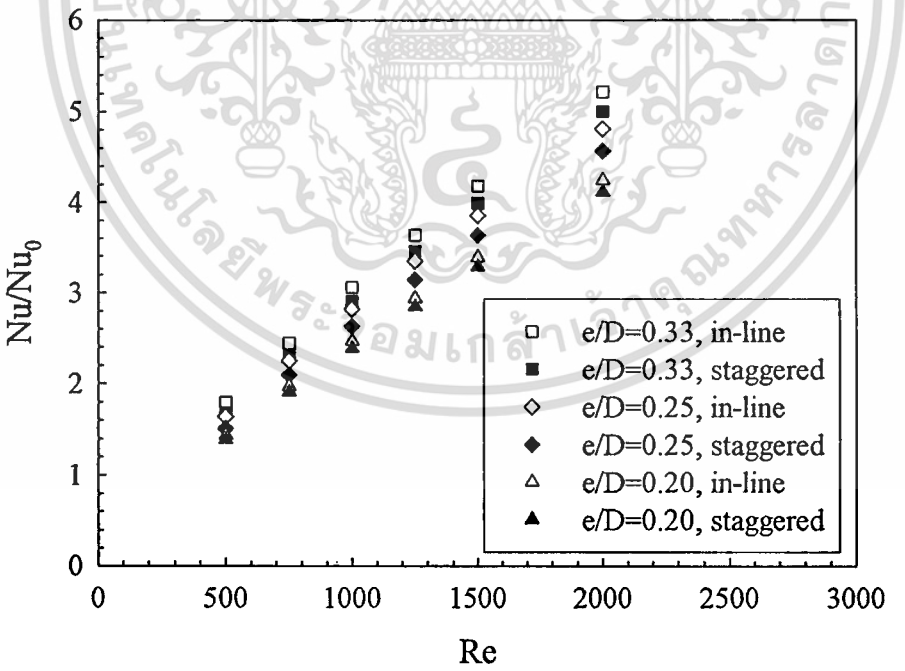
รูปที่ 5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f/f_0 ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะต่ำกว่าแบบวางตรงประมาณ 19%, 17% และ 21% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ โดยที่ค่า e/D = 0.20 ค่า f เฉลี่ยจะสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 9.63 และ 11.94 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 10.27 และ 12.32 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 10.98 และ 13.94 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

รูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ η ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 4%, 0% และ 3% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ โดยที่ค่า e/D = 0.20 ค่า η เฉลี่ยจะสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.23 และ 1.18 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า η เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.33 และ 1.33 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า η เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.43 และ 1.39 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

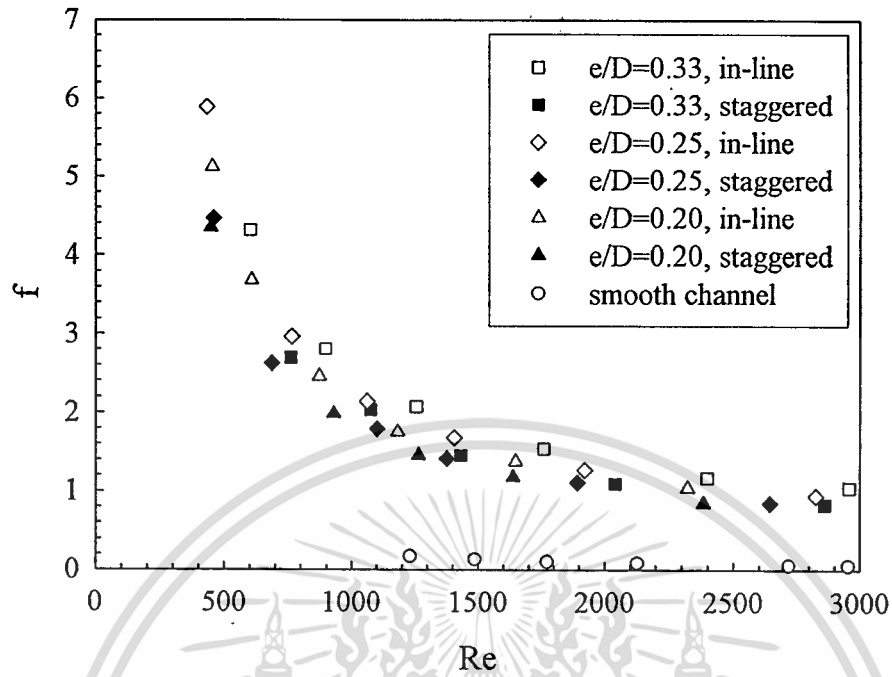


รูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ

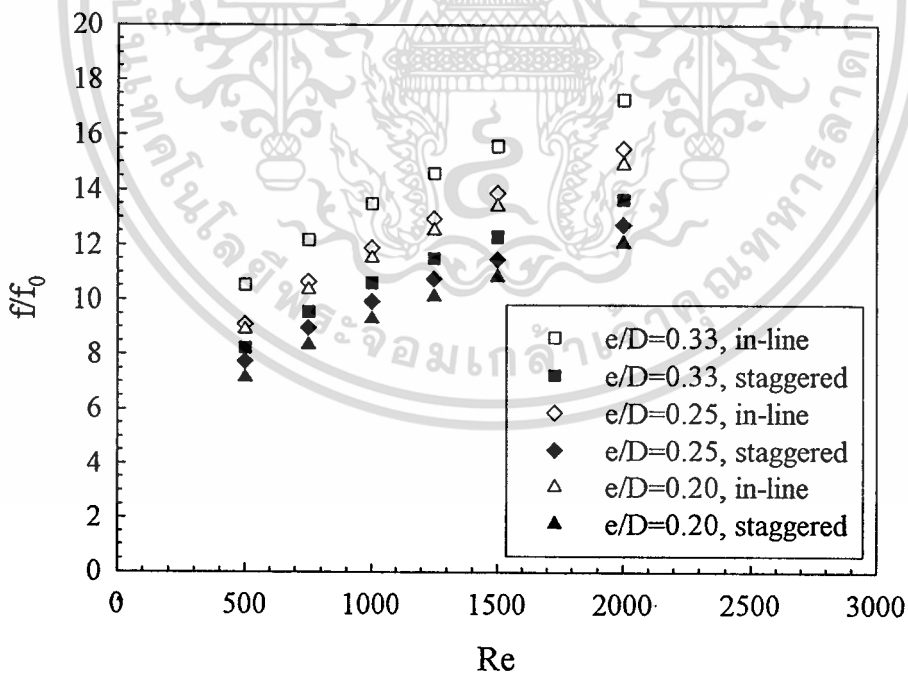


รูปที่ 5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

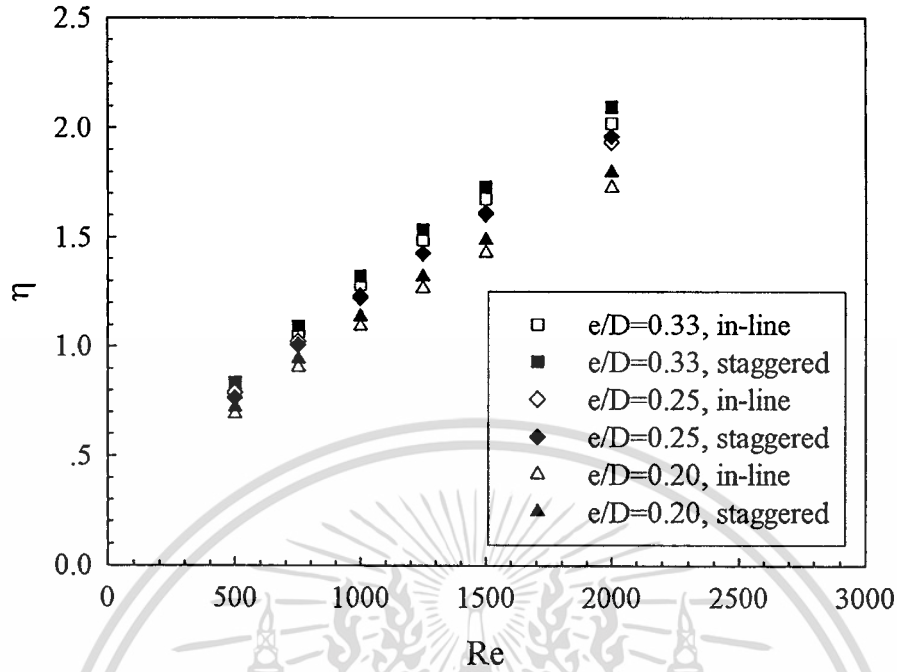


รูปที่ 5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ



รูปที่ 5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ

สรุปได้ว่าในช่วงการไหลแบบราบเรียบ การเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบจะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประมาณ 165% ถึง 239% ในขณะเดียวกันก็ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้นประมาณ 863% ถึง 1,294% โดยการเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบวางเยื้องจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าแบบวางตรงประมาณ 3% ถึง 6% และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าแบบวางตรงประมาณ 17% ถึง 21% และการเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการไม่เซาะร่องประมาณ 18% ถึง 43%

5.4.2 กรณีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกรณีช่องขนานเรียบกับช่องขนานเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่มีการเพิ่มครีบรูปสี่เหลี่ยมได้ดังนี้

รูปที่ 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Nu ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่องกับช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าค่า Re ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า Nu เพิ่มขึ้นด้วย และที่ค่า e/D เพิ่มขึ้น Nu จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะมีค่านัสเซิลท์ต่ำกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

รูปที่ 5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu/Nu_0 ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่องกับช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

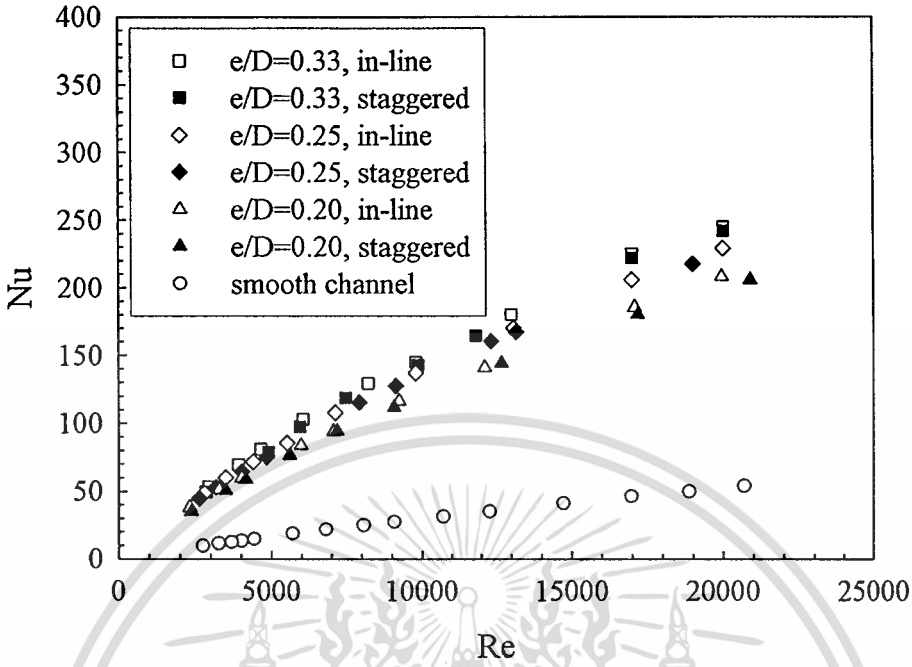
ร่องแบบวางเยื้องจะให้ผลต่ำกว่าแบบวางตรงประมาณ 3%, 2% และ 2% ที่ค่า e/D=0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ โดยที่ค่า e/D = 0.20 ค่า Nu เฉลี่ยจะสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 4.03 และ 4.16 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 4.57 และ 4.66 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 4.91 และ 5.02 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

รูปที่ 5.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวเยื้องกัน ที่ค่า e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าค่า Re ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า f ลดลง แต่ที่ e/D เพิ่มขึ้น f จะมีค่าเพิ่มขึ้น และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะมีค่า f ต่ำกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

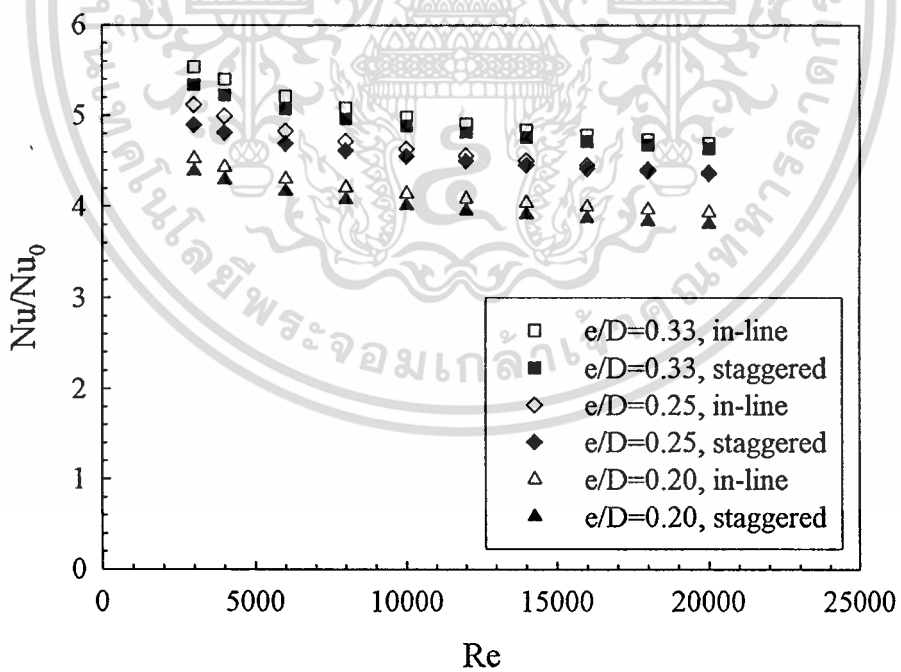
รูปที่ 5.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f/f_0 ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะต่ำกว่าแบบวางตรงประมาณ 19%, 21% และ 20% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ โดยที่ค่า e/D = 0.20 ค่า f เฉลี่ยจะสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 13.42 และ 16.52 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 13.76 และ 17.40 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 14.91 และ 18.68 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

รูปที่ 5.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ η ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวเยื้องกัน ที่ e/D เท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 4%, 6% และ 6% ที่ค่า e/D = 0.20, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ โดยที่ค่า e/D = 0.20 ค่า η เฉลี่ยจะสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.70 และ 1.64 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ที่ค่า e/D = 0.25 จะให้ค่า η เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 1.92 และ 1.81 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า η เฉลี่ยสูงกว่าช่องขนานเรียบประมาณ 2.01 และ 1.90 เท่าสำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

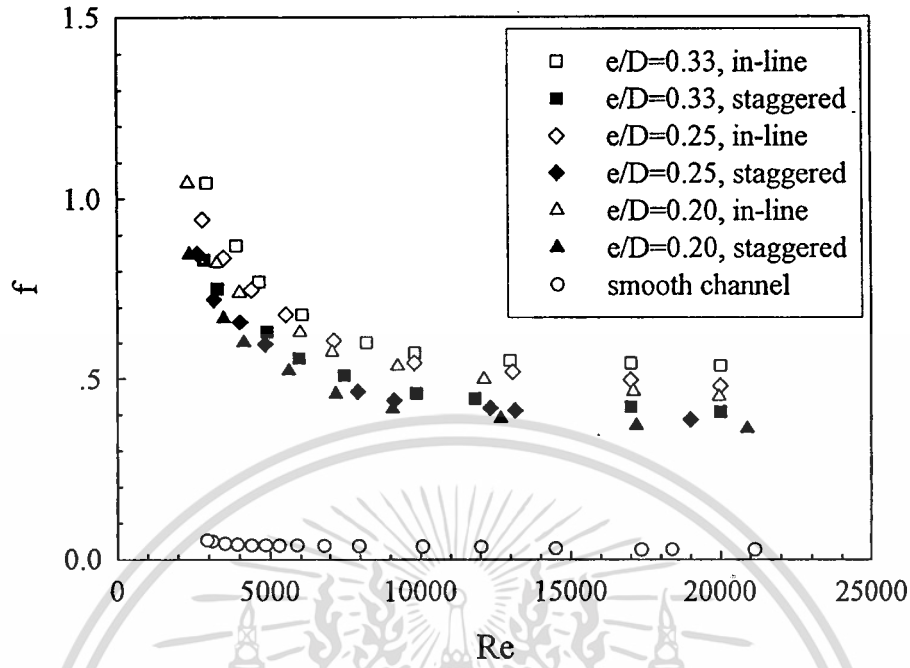


รูปที่ 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ

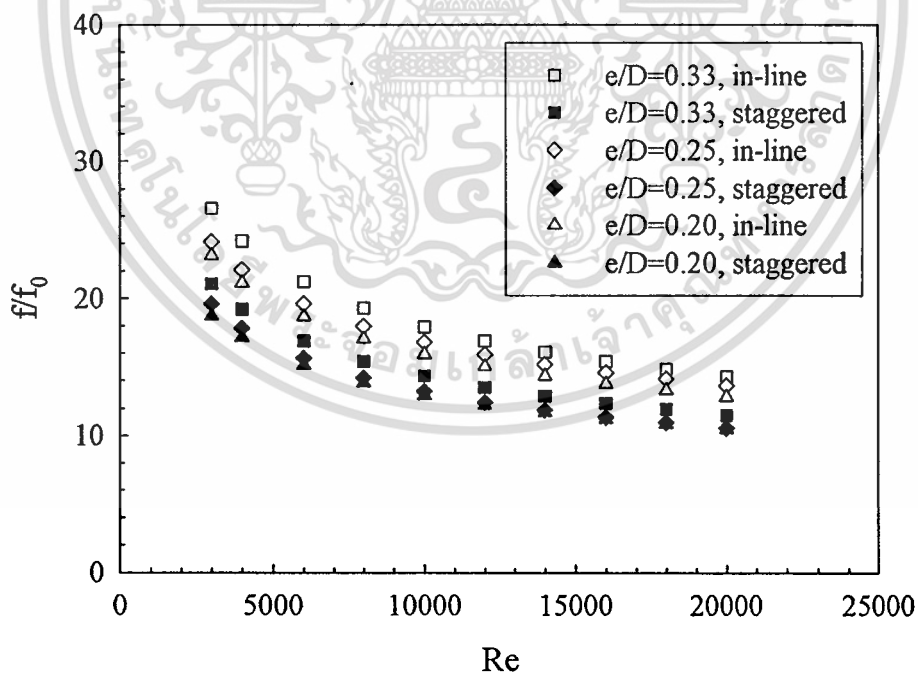


รูปที่ 5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

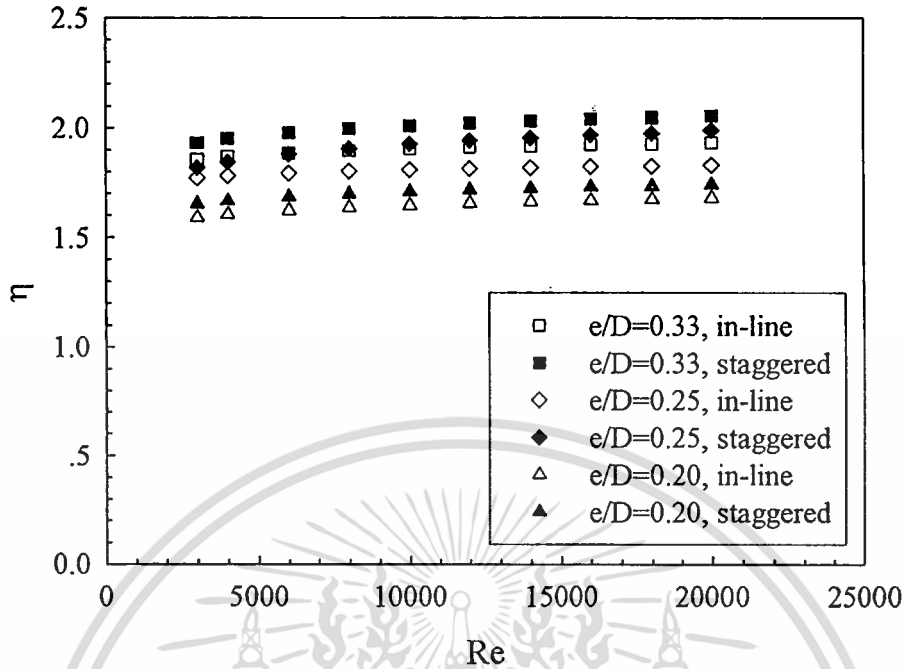


รูปที่ 5.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ



รูปที่ 5.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re กรณีเซาะร่องและเพิ่มครีบ

สรุปได้ว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน การเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบจะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประมาณ 303% ถึง 402% ในขณะเดียวกันก็ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้นประมาณ 1,242% ถึง 1,768% การเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบวางเยื้องจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าแบบวางตรงประมาณ 2% ถึง 3% และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าแบบวางตรงประมาณ 19% ถึง 21% การเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการไม่เซาะร่องประมาณ 64% ถึง 101%

5.4.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re และ e/D

- ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวตรงกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลที่มีค่า Re อยู่ในช่วง 2,500 ถึง 20,000 สำหรับช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวตรงกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Nu = A_0 \, \mathrm{Re}^{0.7951}$$

โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า Nu โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Re^{0.7951}$ กับ e/D จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{Nu}{\mathrm{Re}^{0.7951}} = 0.1444 \times \left(\frac{e}{D}\right)^{0.3527}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$Nu = 0.1444\,\mathrm{Re}^{0.7951}\left(\frac{e}{D}\right)^{0.3527}$$

- ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวเยื้องกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลที่มีค่า Re อยู่ในช่วง 2,500 ถึง 20,000 สำหรับช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวเยื้องกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Nu = A_0\,\mathrm{Re}^{0.8192}$$

โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า Nu โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Re^{0.8192}$ กับ e/D จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{Nu}{\mathrm{Re}^{0.8192}} = 0.1132\times\left(\frac{e}{D}\right)^{0.3571}$$

ดังนั้น

$$Nu = 0.1132\,\mathrm{Re}^{0.8192}\left(\frac{e}{D}\right)^{0.3571}$$

5.4.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re และ e/D

- ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวตรงกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Re อยู่ในช่วง 2,500 ถึง 20,000) สำหรับช่องขนานที่มีการเซาะร่องแบบแนวตรงกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f = A_0\,\mathrm{Re}^{-0.3477}$$

โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า f โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $f/Re^{-0.3477}$ กับ e/D จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{f}{\mathrm{Re}^{-0.3477}} = 19.352\times\left(\frac{e}{D}\right)^{0.2257}$$

ดังนั้น

$$f = 19.352\,\mathrm{Re}^{-0.3477}\left(\frac{e}{D}\right)^{0.2257}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบแบบแนวเยื้องกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Re อยู่ในช่วง 2,500 ถึง 20,000) สำหรับช่องขนานที่มีการเซาะร่องแบบแนวเยื้องกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

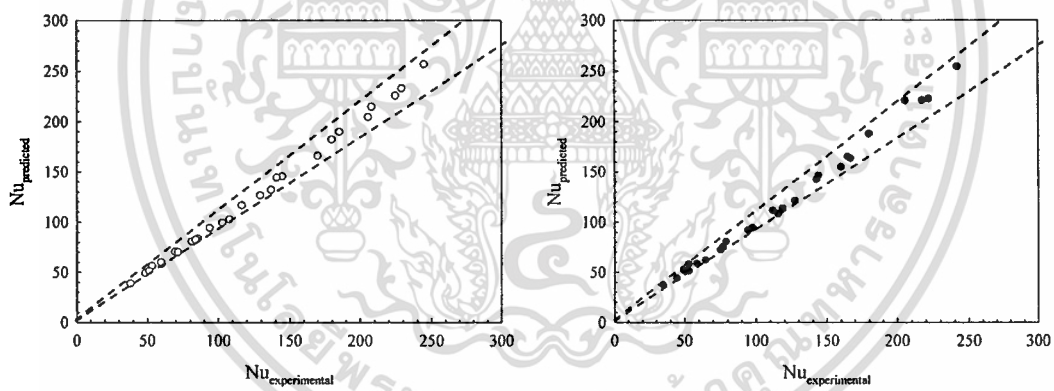
$$f = A_0 \, \mathrm{Re}^{-0.3847}$$

โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า f โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $f/\mathrm{Re}^{-0.3847}$ กับ e/D จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

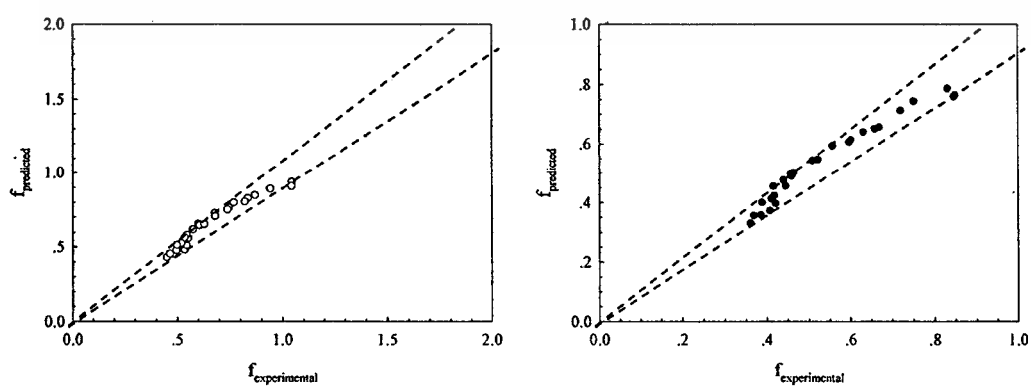
$$\frac{f}{\mathrm{Re}^{-0.3847}} = 21.119 \times \left(\frac{e}{D}\right)^{0.2065}$$

ดังนั้น

$$f = 21.119 \mathrm{Re}^{-0.3847} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.2065}$$



รูปที่ 5.37 แสดงความคลาดเคลื่อนจากสมการ Nu กรณีเซาะร่องเพิ่มครีบแนวตรงและแนวเยื้อง



รูปที่ 5.38 แสดงความคลาดเคลื่อนจากสมการ f กรณีเซาะร่องเพิ่มครีบแนวตรงและแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

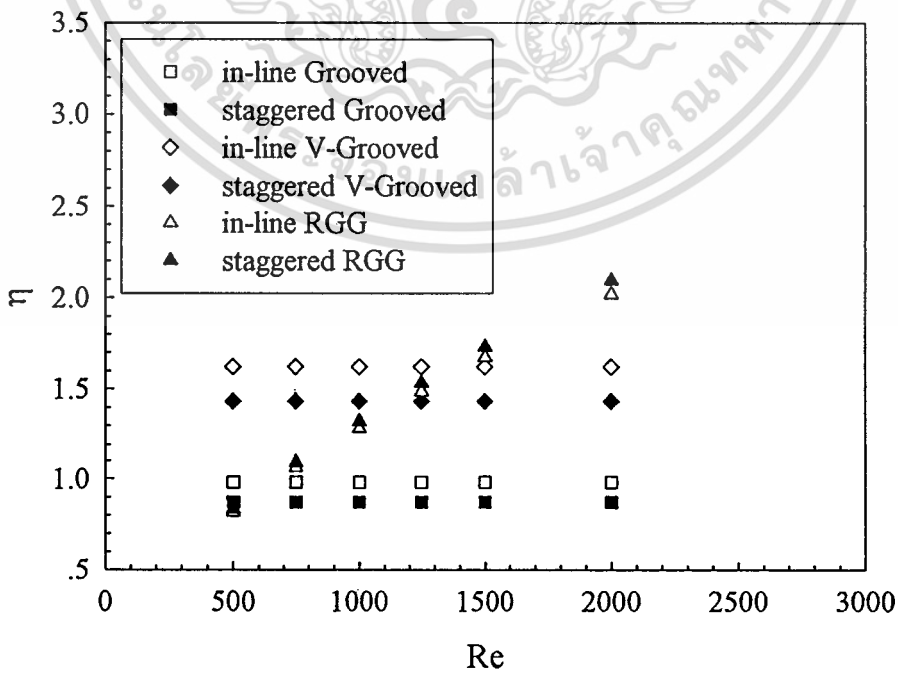
จากรูปที่ 5.37 และ 5.38 พบว่าความคลาดเคลื่อนของ Nu และ f ที่ได้จากการคำนวณมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ±10% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5.5 ช่องขนานเซาะร่องที่ค่า e/D = 0.33

หากนำผลการทดลองกรณีช่องขนานเซาะร่อง, ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววี และช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ ที่ e/D = 0.33 มาเปรียบเทียบกันสามารถแสดงผลได้ดังนี้

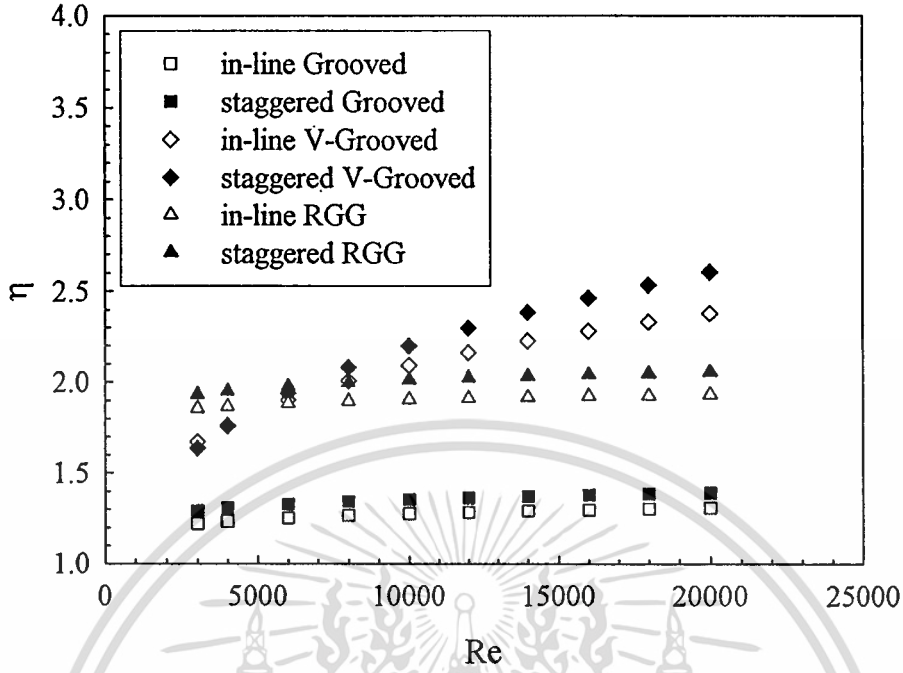
รูปที่ 5.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ η ในช่วงการไหลแบบราบเรียบของช่องขนานที่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววี และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ ทั้งแบบแนวร่องตรงและแนวร่องเยื้อง ที่ e/D เท่ากับ 0.33 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นได้ว่ากรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววีจะให้ค่า η สูงสุด โดยสูงกว่าแบบเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ 0 ถึง 17 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าแบบเซาะร่อง 65 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 5.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ η ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนของช่องขนานที่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววี และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ ทั้งแบบแนวร่องตรงและแนวร่องเยื้อง ที่ e/D เท่ากับ 0.33 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่ากรณีเซาะร่องสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววีจะให้ค่า η สูงสุด โดยสูงกว่าแบบเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ 9 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าแบบเซาะร่อง 62 ถึง 64 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re ช่วงการไหลราบเรียบที่ e/D=0.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re ช่วงการไหลปั่นป่วนที่ e/D=0.33

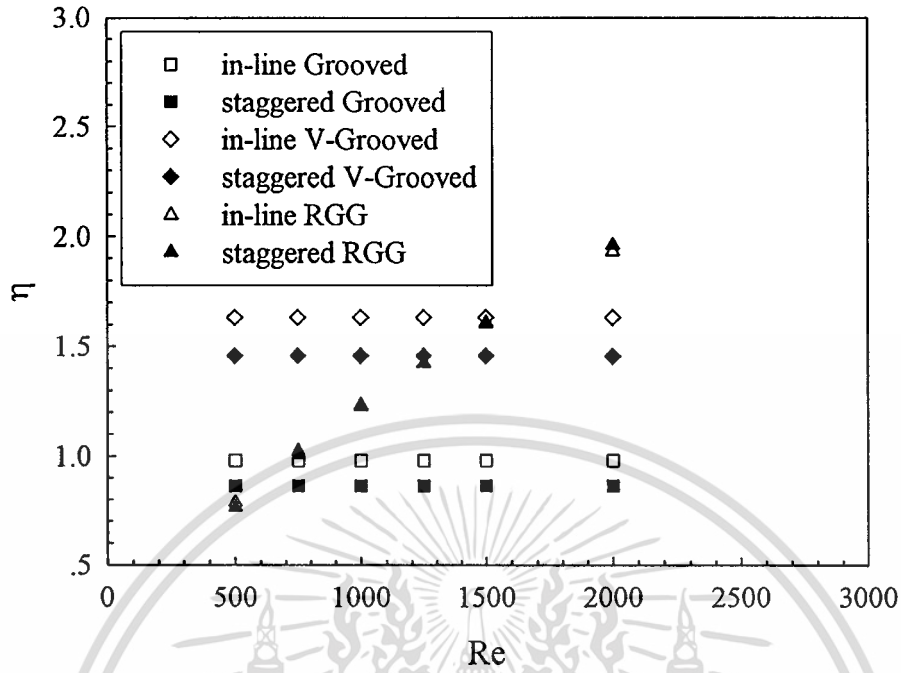
5.6 ช่องขนานเซาะร่องที่ค่า e/D = 0.25

หากนำผลการทดลองกรณีช่องขนานเซาะร่อง, ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววี และช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ มาเปรียบเทียบกันสามารถแสดงผลได้ดังนี้

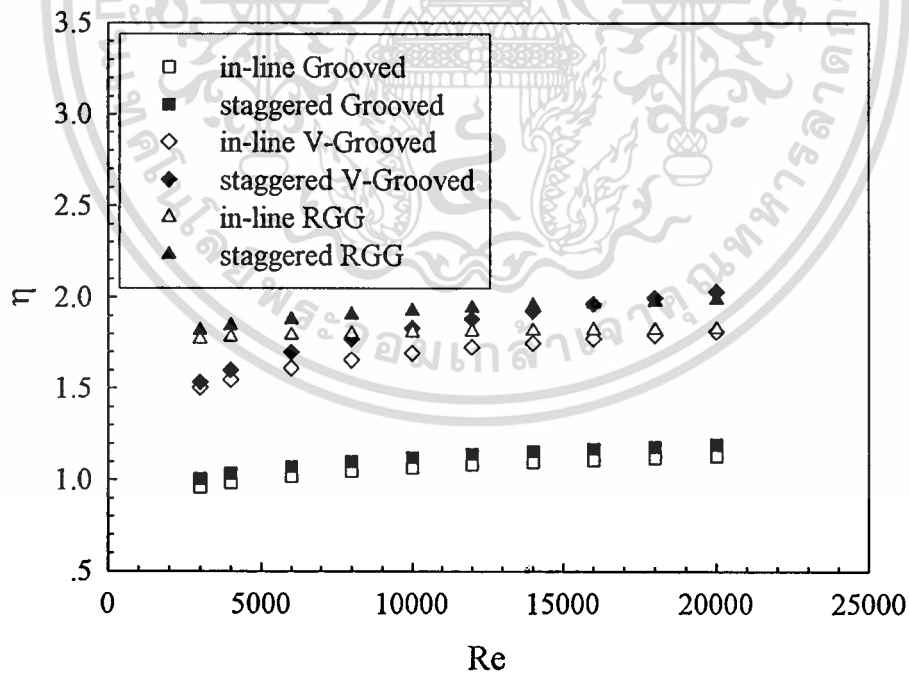
รูปที่ 5.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ η ในช่วงการไหลแบบราบเรียบของช่องขนานที่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววี และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ ทั้งแบบแนวร่องตรงและแนวร่องเยื้อง ที่ e/D เท่ากับ 0.25 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่ากรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววีจะให้ค่า η สูงสุด โดยจะสูงกว่าแบบเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ 10 ถึง 23 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าแบบเซาะร่อง 66 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 5.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ η ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนของช่องขนานที่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววี และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ ทั้งแบบแนวร่องตรงและแนวร่องเยื้อง ที่ e/D เท่ากับ 0.25 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่ากรณีเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบสี่เหลี่ยมจะให้ค่า η สูงสุด โดยจะสูงกว่าแบบเซาะร่องจัดวางรูปตัววี 5 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าแบบเซาะร่อง 59 ถึง 63 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re ช่วงการไหลราบเรียบที่ e/D=0.25



รูปที่ 5.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re ช่วงการไหลปั่นป่วนที่ e/D=0.25

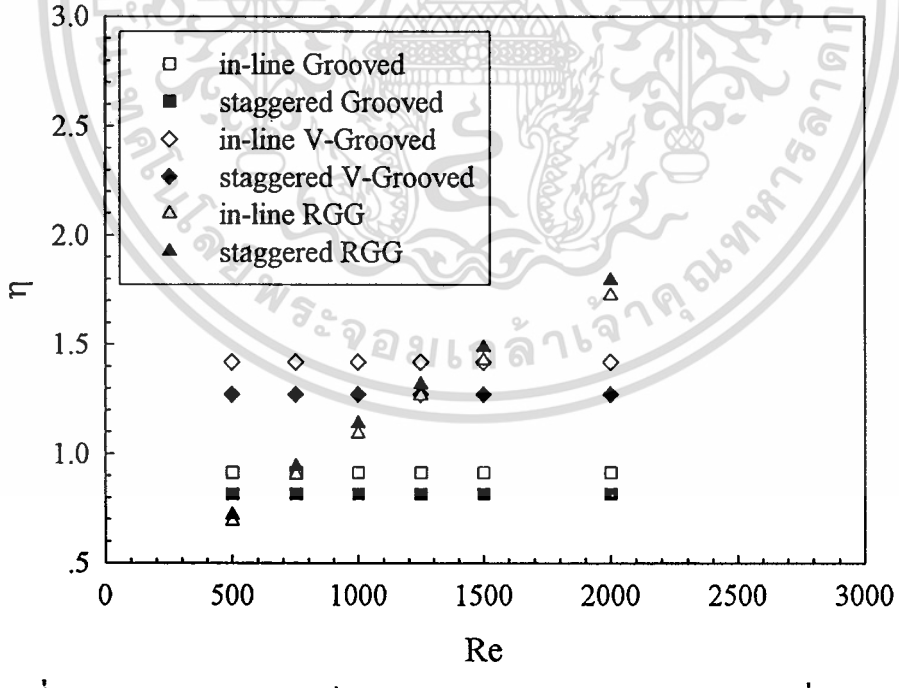
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 ช่องขนานเซาะร่องที่ค่า e/D = 0.20

หากนำผลการทดลองกรณีช่องขนานเซาะร่อง, ช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววี และช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ มาเปรียบเทียบกันสามารถแสดงผลได้ดังนี้

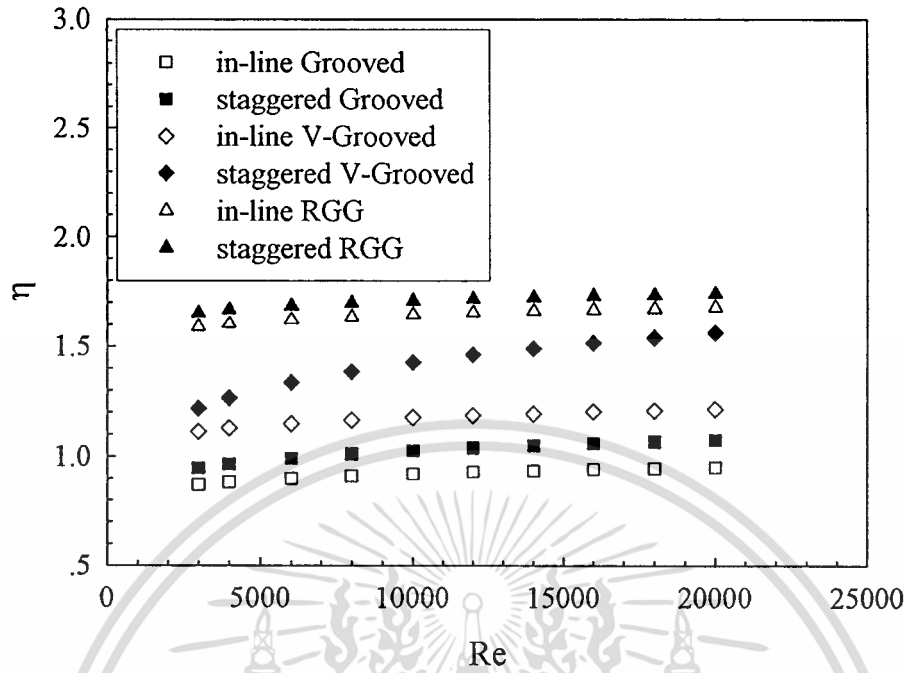
รูปที่ 5.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ η ในช่วงการไหลแบบราบเรียบของช่องขนานที่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววี และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ ทั้งแบบแนวร่องตรงและแนวร่องเยื้อง ที่ e/D เท่ากับ 0.20 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่ากรณีเซาะร่องจัดวางรูปตัววีจะให้ค่า η สูงสุด โดยจะสูงกว่าแบบเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ 3 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าแบบเซาะร่อง 55 ถึง 56 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 5.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ η ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนของช่องขนานที่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานเซาะร่องจัดวางรูปตัววี และ ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบ ทั้งแบบแนวร่องตรงและแนวร่องเยื้อง ที่ e/D เท่ากับ 0.20 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่ากรณีเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบจะให้ค่า η สูงสุด โดยจะสูงกว่าแบบเซาะร่องจัดวางรูปตัววี 20 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าแบบเซาะร่อง 27 ถึง 39 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re ช่วงการไหลราบเรียบที่ e/D=0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re ช่วงการไหลปั่นป่วนที่ e/D=0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันผ่านช่องขนานที่มีการเซาะร่องสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. สำหรับช่วงการไหลแบบราบเรียบ การเซาะร่องจะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าการไม่เซาะร่องประมาณ 2% ถึง 18% แต่สำหรับช่วงการไหลแบบปั่นป่วน การเซาะร่องจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการไม่เซาะร่องประมาณ -8% ถึง 35%
2. สำหรับช่วงการไหลแบบราบเรียบ การเซาะร่องจัดวางรูปตัววีจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการไม่เซาะร่องประมาณ 27% ถึง 62% และสำหรับช่วงการไหลแบบปั่นป่วน การเซาะร่องจัดวางรูปตัววีจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการไม่เซาะร่องประมาณ 17% ถึง 119%
3. สำหรับช่วงการไหลแบบราบเรียบ การเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการไม่เซาะร่องประมาณ 18% ถึง 43% และสำหรับช่วงการไหลแบบปั่นป่วน การเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการไม่เซาะร่องประมาณ 64% ถึง 101%
4. กรณีอัตราส่วน e/D=0.33 การปรับปรุงด้วยการเซาะร่องสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววีจะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด
5. กรณีอัตราส่วน e/D=0.25 ในช่วงการไหลแบบราบเรียบการปรับปรุงด้วยการเซาะร่องสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววีจะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน การเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบจะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด
6. กรณีอัตราส่วน e/D=0.20 ในช่วงการไหลแบบราบเรียบการปรับปรุงด้วยการเซาะร่องสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววีจะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน การเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบจะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด

การเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่ผิวของช่องขนานส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นเนื่องมาจากเกิดความปั่นป่วนของการไหลมากขึ้น ซึ่งความปั่นป่วนของการไหลที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้ความเสียดทานของการไหลเพิ่มมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะ

วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เป็นเทคนิคหนึ่งเท่านั้นที่ช่วยในการปรับปรุงสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องขนาน แต่ก็ยังมีเทคนิควิธีการอื่นที่น่าสนใจ และสามารถที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะดีขึ้นได้ ยกตัวอย่างเช่น

- การปรับลักษณะของการเซาะร่องเป็นรูปสามเหลี่ยม หรือ รูปที่มีลักษณะโค้งมน เพื่อลดผลของมุมที่จะมีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
- การปรับปรุงโดยใช้ทั้งการเซาะร่องผสมผสานกับการติดตั้งครีบก็จะเป็นการช่วยปรับปรุงให้สมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นได้
- การเพิ่มความสูงของร่องที่เซาะ ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนค่า e/D เพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นได้
- การปรับมุมของการจัดวางรูปตัววี เพื่อหาระดับของมุมที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Sadik Kakac and Yaman Yener, 1995, Convective Heat Transfer, Florida, CRC Press, pp. 156–165.

[2] มนตรี พิรุณเกษตร รศ., 1999, การถ่ายเทความร้อน, พิมพ์ครั้งที่ 2, บริษัท วิทยพัฒน์ จำกัด, หน้า 418–420.

[3] Kenan Yakut and Bayram Sahin, 2004, Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers, Applied Energy Vol.78, pp. 273–288.

[4] N.K. Ghaddar, K.Z. Korczak, B.B. Mikic and A.Y. Patera, 1986, Numerical investigation of incompressible flow in grooved channels. Part 1. Stability and self-sustained oscillations, J. Fluid Mech. 163, pp. 99–127.

[5] B. Sunden and S. Trollheden, 1989, Periodic laminar flow and heat transfer in a corrugated two-dimensional channel, International Comm. Heat Mass Transfer 16, pp. 215–225.

[6] J.C.F Pareira and J.M.M. Sousa, 1993, Finite volume calculations of self-sustained oscillations in a grooved channel, J. Comput. Phys. 106, pp. 19–29.

[7] M. Greiner, R.F. Chen and R.A. Wirtz, 1991, Enhanced heat transfer/pressure drop measured from a flat surface in a grooved channel, ASME J. Heat Transfer 113, pp. 498–501.

[8] R.A. Wirtz, F. Huang and M. Greiner, 1999, Correlation of fully developed heat transfer and pressure drop in a symmetrically grooved channel, ASME J. Heat Transfer 121, pp. 236–239.

[9] Takahiro Adachi and Haruo Uehara, 2001, Correlation between heat transfer and pressure drop in channels with periodically grooved parts, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol.44, pp. 4333–4343.

[10] Cila Herman and Eric Kang, 2002, Heat transfer enhancement in a grooved channel with curved vanes, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol.45, pp. 3741–3757.

[11] A.R.Jaurker, J.S.Saini and B.K.Ghandi, 2005, Heat transfer and friction characteristics of rectangular solar air heater duct using rib-grooved artificial roughness, Solar Energy, pp. 1–13.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิคส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิคส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

T (K)	ρ (kg/m^3)	C_p (kJ/kg K)	$\mu \times 10^7$ ($N\ s/m^3$)	ν (m^2/s)	$k \times 10^6$ (W/m K)	$\alpha \times 10^6$ (m^2/s)	Pr
อากาศ							
100	3.5562	1.032	71.1	2	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.59	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	22.5	0.707
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.990	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	6.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการหาความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re และ e/D

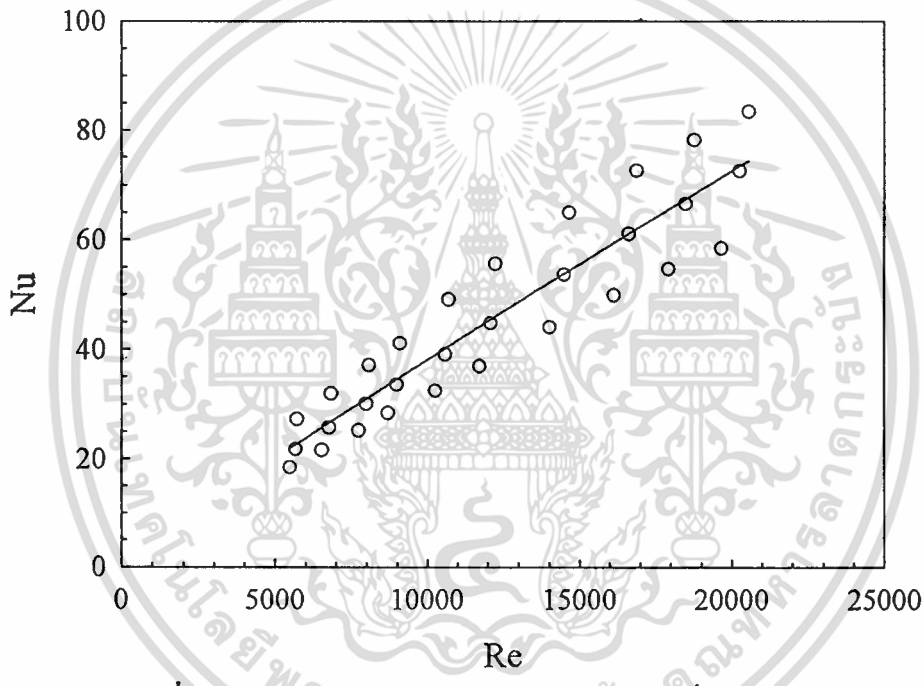
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการหาความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re และ e/D

- กรณีช่องขนานเซาะร่องสี่เหลี่ยมตรงแบบแนวตรงกัน

จากข้อมูลการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Re อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) สำหรับช่องขนานที่มีการเซาะร่องสี่เหลี่ยมตรงแบบแนวตรงกัน เมื่อนำข้อมูลที่ e/D ต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re ดังแสดงในรูปที่ ข.1 จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Nu = A_0 \, \mathrm{Re}^{0.9337}$$



รูปที่ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re ที่ e/D ต่าง ๆ

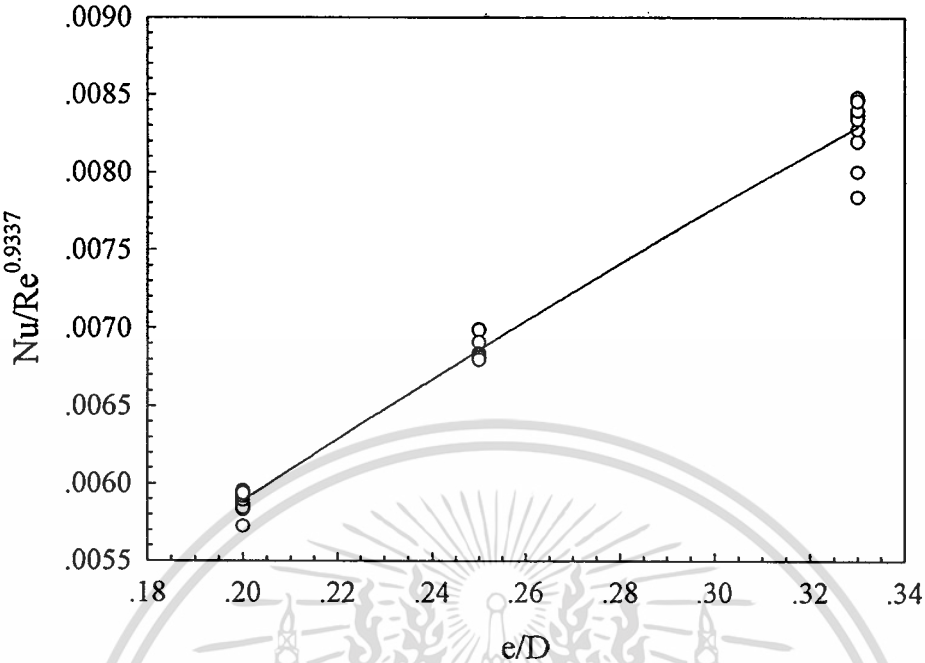
โดยค่า A_0 คือค่าคงที่ จากนั้นมาพิจารณาค่า e/D ที่มีผลต่อค่า Nu โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/\mathrm{Re}^{0.9337}$ กับ e/D ดังแสดงในรูปที่ ข.2 จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{Nu}{\mathrm{Re}^{0.9337}} = 0.0177 \times \left(\frac{e}{D}\right)^{0.6844}$$

ดังนั้น

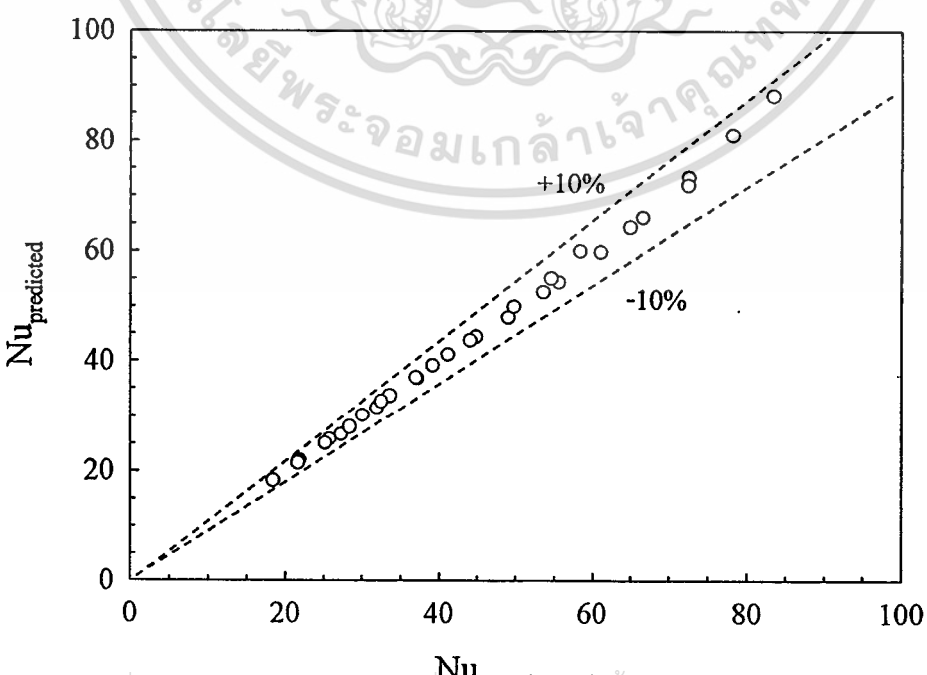
$$Nu = 0.0177 \, \mathrm{Re}^{0.9337} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.6844}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Re^{0.9337}$ กับ e/D

เมื่อทดลองนำค่า Re และ e/D มาแทนค่าในสมการเพื่อหาค่า $Nu_{predicted}$ แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตเทียบกับค่า Nu ที่ได้จากการทดลอง เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน ดังแสดงในรูปที่ ข.3 ซึ่งจะพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้ให้ความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ±10 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ ข.3 แสดงความคลาดเคลื่อนจากความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20
18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา

การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันผ่านช่องขนานที่มีการเซาะร่อง

Heat Transfer and Pressure Drop in a Channel with Grooved Surfaces

ดุสิต บูรณโชคไพศาล, พงษ์เจต พรหมวงศ์ และ ทวี เทศเจริญ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 อีเมล์ dusit_bu@yahoo.com, kppongje@kmitl.ac.th

Dusit Buranachokphaisan, Pongjet Promvonge and Thavee Teschareon
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology-Ladkrabang,
Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
Tel: 0-2326-4197, Fax: 0-2326-4198, E-mail: dusit_bu@yahoo.com, kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องขนานด้วยการเซาะร่องพื้นผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวของช่องขนานเป็นแบบฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ และของไหลที่ใช้ในการทดลองคืออากาศ ในการทดลองจะใช้ความเร็วลมต่าง ๆ กัน โดยให้อยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลระหว่างช่องขนานเรียบที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวตรงและมีแนวเยื้อง เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

จากการทดลองพบว่าช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่ผิวบนและผิวล่าง มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้น และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้อง จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงกว่าช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวตรง

Abstract

This paper presents the study of performance enhancement of heat transfer in a channel by grooving the heating surface. The experiments were conducted by varying air velocity in the test section to cover the range of turbulent flow (Reynolds number from 5,000 to 20,000) at a constant heat flux tube-wall condition. Experimental results were compared with the results of which without grooving. In addition, the grooved-surface arrangements were placed in in-line and stagger fashions.

The experimental result revealed that the heat transfer rate and the friction factor in the channel with grooved surfaces are higher than the channel with smooth surface and the stagger arrangement yields greater heat transfer rate than the in-line one.

1. บทนำ

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญกับกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมมาก เช่น หม้อไอน้ำ เครื่องทำความเย็น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เป็นต้น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานค่อนข้างมากอีกด้วย ดังนั้นการหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิผลในกระบวนการผลิตและยังเป็นการลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตได้อีกด้วย

แนวทางหนึ่งที่มีการใช้ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือการเพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของของไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการเซาะร่องที่พื้นที่ถ่ายเทความร้อนก็เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มความปั่นป่วนของการไหล โดยจากการศึกษาของ Takahiro Adachi and Haruo Uehara [4] ซึ่งทำการทดลองในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 50 ถึง 500) พบว่าช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมสามารถช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นในการศึกษานี้จะได้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องขนานที่มีการเซาะร่อง โดยจะ

สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการศึกษาในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000)

2. ทฤษฎี

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดลองนี้ได้แก่

การจำแนกลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อซึ่งจะพิจารณาจากเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number: Re) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (1)$$

โดย Re คือ ค่า Reynolds Number

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก, m

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล, kg/m s

โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Radius: D_h) มีนิยามดังนี้

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2)$$

โดย A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องขนาน, m^2

P คือ ความยาวของเส้นรอบรูปช่องขนาน, m

ในกรณีช่องขนานที่มีการเซาะร่อง A จะคิดเท่ากับกรณีช่องขนานเรียบที่ไม่มีการเซาะร่อง

สำหรับความดันลดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factor: f) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\Delta P = \frac{fL\rho V^2}{2D_h} \quad (3)$$

โดย ΔP คือ ความดันตกคร่อมภายในท่อ, Pa

f คือ Friction Factor

f_0 คือ Friction Factor ของช่องขนานเรียบ

L คือ ความยาวของท่อ, m

V คือ ความเร็วของไหลเฉลี่ย, m/s

ในการศึกษาจะพิจารณาเป็นกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Heat Flux) ซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้จากสมการดังนี้

$$h = \frac{\dot{m} C_p \left(T_{m,o} - T_{m,i}\right)}{A_w (T_w - T_b)} \quad (4)$$

$$T_b = \frac{\left(T_{m,o} + T_{m,i}\right)}{2} \quad (5)$$

โดย h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m^2 K

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของของไหล, kg/s

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล, J/kg K

A_w คือ พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน, m^2

$T_{m,o}$ คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางออก, °C

$T_{m,i}$ คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางเข้า, °C

T_w คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของพื้นที่ถ่ายเทความร้อน, °C

T_b คือ อุณหภูมิเฉลี่ยทางเข้าและออกของของไหล, °C

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาในรูปของค่า Nusselt Number ดังสมการ

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k} \quad (6)$$

โดย Nu_D คือ Nusselt Number

Nu_0 คือ Nusselt Number ของช่องขนานเรียบ

k คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ, W/m K

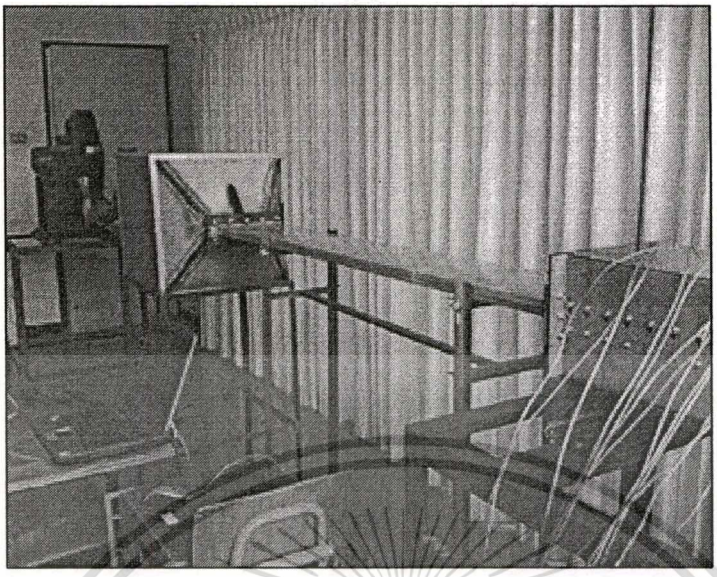
3. อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์สำหรับการทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยม

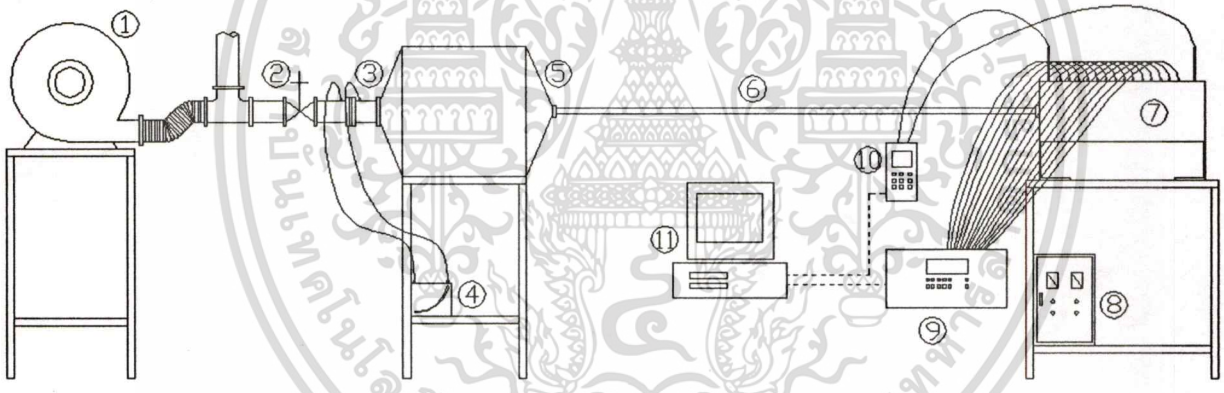
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน และอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 1, 2, และ 3 ซึ่งประกอบด้วยพัดลมขนาด 2.20 กิโลวัตต์, กล่องปรับรูปแบบการไหลสำหรับเปลี่ยนการไหลจากท่อกลมมาเป็นการไหลในช่องขนาน, ท่อสี่เหลี่ยมสำหรับปรับสภาพของการไหลทำจากแผ่นโลหะขนาดหน้าตัดกว้าง 0.20 เมตร และมีความยาว 1.60 เมตร และส่วนทดลองจะเป็นแผ่นโลหะกว้าง 0.20 เมตร และยาว 0.55 เมตร ทำการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมกว้าง 0.01 เมตร และลึก 0.005 เมตร ตลอดหน้าตัด

การปรับอัตราการไหลของของไหลจะใช้การควบคุมด้วยวาล์วเพื่อให้ได้การไหลแบบปั่นป่วน อากาศในชุดทดลองถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2.00 กิโลวัตต์ โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ซึ่งมีพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 0.09 เมตร และยาว 0.45 เมตร ที่ผิวบนและผิวล่างของช่องขนาน ผิวภายนอกของส่วนทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อเป็นการป้องกันการสูญเสียพลังงานความร้อนของชุดทดลอง การวัดอุณหภูมิผิวช่องขนานและอุณหภูมิของอากาศทางเข้าและออกถูกวัดด้วยเทอร์โมคัพเปิลชนิด K จำนวน 16 ตัว ด้วย Data Logger (Fluke สามารถวัดและบันทึกค่าได้ 40 Channels) และบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ ส่วนค่าความดันลดระหว่างตำแหน่งทางเข้าและตำแหน่งทางออกของส่วนทดลองอ่านและบันทึกค่าด้วย Digital Differential Pressure Recorder (Testo model 350XL)

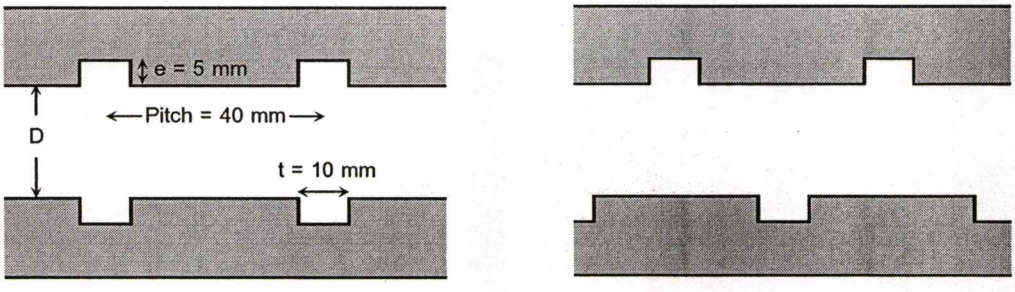
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ชุดทดลอง



รูปที่ 2 แผนภาพอุปกรณ์และการไหลของสารทำงาน



รูปที่ 3 ลักษณะของแผ่นขนานเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมวางแนวตรงกันและเยื้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วิธีการทดลอง

พิจารณาผลของการไหลภายในช่องขนานผ่านพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยม

เริ่มการทดลองโดยเปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง จากนั้นเปิดชุดฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนกับระบบ โดยให้ผิวของช่องขนานได้รับความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat Flux) ปรับความเร็วลมของชุดทดลองโดยการปรับหรี่ที่วาล์วเพื่อให้ได้ความเร็วของของไหลครอบคลุมรูปแบบการไหลในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (ค่า Re อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) และปรับค่าสัดส่วนความลึกของร่องต่อระยะระหว่างแผ่นขนาน (e/D) เท่ากับ 0.33 และ 0.20 ทำการบันทึกผลค่าความดันลด อุณหภูมิผิวท่อ อุณหภูมิที่ทางเข้าและอุณหภูมิที่ทางออกของของไหล

พิจารณาผลของช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ผิวบนและผิวล่างของช่องขนาน แบบที่มีแนวตรงกันและมีแนวเยื้องกัน

5. ผลการทดลอง

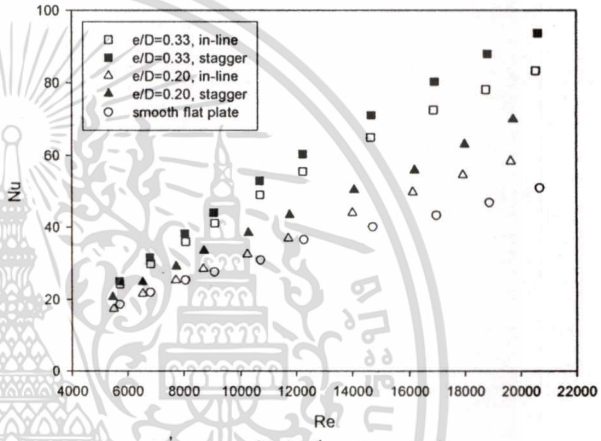
จากการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมสามารถแสดงผลได้ดังนี้

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ของช่องขนานเรียบที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่สัดส่วนความลึกของร่องกับระยะห่างระหว่างช่องขนาน (e/D) เท่ากับ 0.33 และ 0.20 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าค่า Re เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า Nu เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนความลึก (e/D) ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Nu มีค่าเพิ่มขึ้น และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะให้ค่า Nu สูงกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

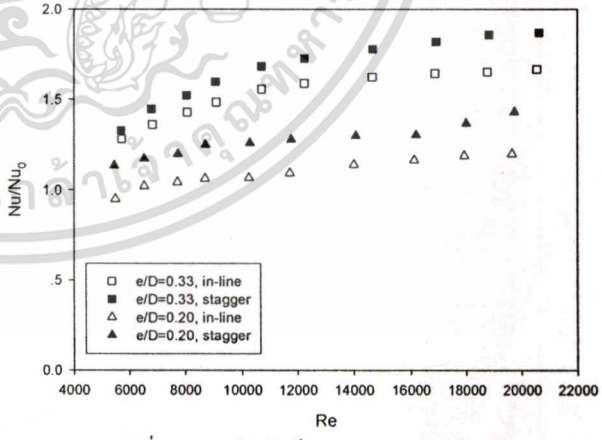
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ อัตราส่วนของ Nu ระหว่างช่องขนานเซาะร่องกับช่องขนานเรียบ (Nu/Nu_0) ของช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่สัดส่วนความลึกของร่องกับระยะห่างระหว่างช่องขนาน (e/D) เท่ากับ 0.33 และ 0.20 จากกราฟพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะมีค่าสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 18% และ 13% ที่ค่า e/D = 0.20 และ 0.33 ตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.20 ค่า Nu เฉลี่ยจะสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.3 และ 1.1 เท่า สำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ส่วนที่ค่า e/D = 0.33 ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.7 และ 1.5 เท่า สำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบตรงแนว และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่สัดส่วนความลึกของร่องกับระยะห่างระหว่างช่องขนาน (e/D) เท่ากับ 0.33 และ 0.20 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าค่า Re เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า f ลดลง และที่สัดส่วนความลึก (e/D) ลดลงจะทำให้ค่า f ลดลงเช่นกัน และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะให้ค่า f สูงกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับอัตราส่วนของ f ระหว่างช่องขนานเซาะร่องกับช่องขนานเรียบ (f/f_0) ของช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบตรงแนว และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่สัดส่วนความลึกของร่องกับระยะห่างระหว่างช่องขนาน (e/D) เท่ากับ 0.33 และ 0.20 จากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะมีค่าสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 15% และ 14% ที่ค่า e/D = 0.20 และ 0.33 ตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.20 ค่า f เฉลี่ยจะสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.5 และ 1.3 เท่า สำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ส่วนที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.6 และ 1.4 เท่า สำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

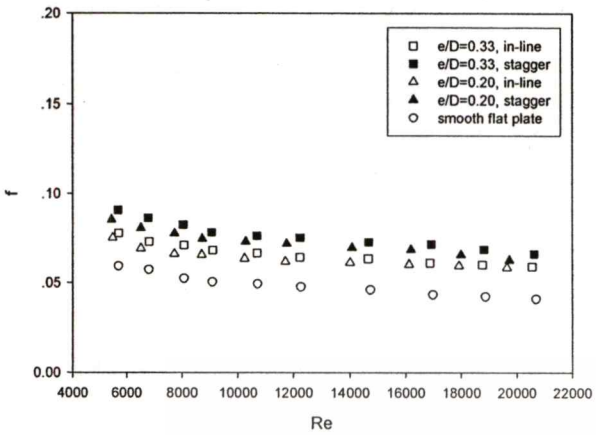


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re

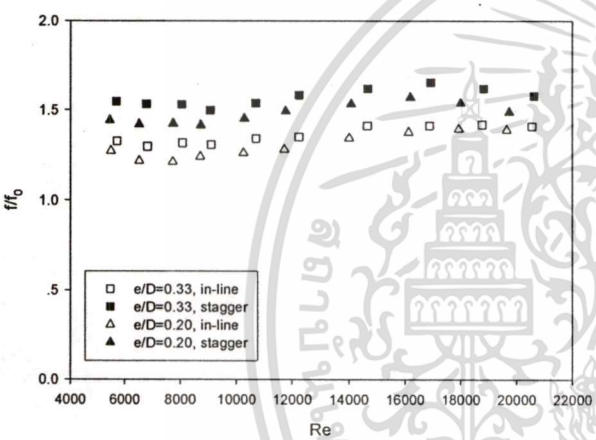


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของช่องขนานจะเป็นการช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากร่องที่เซาะทำให้ความปั่นป่วนของการไหลเพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนความลึกของร่อง (e/D) ที่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่านัสเซิลท์นัมเบอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้น และแผ่นขนานที่มีการเซาะร่องแบบมีแนวเยื้องจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นขนานที่มีการเซาะร่องแบบมีแนวตรงกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] Sadik Kakac and Yaman Yener, 1995, Convective Heat Transfer, Florida, CRC Press, pp. 156 – 165.

[2] มนตรี พิรุณเกษตร รศ., 1999, การถ่ายเทความร้อน, พิมพ์ครั้งที่ 2, บริษัท วิทยพัฒน์ จำกัด, หน้า 418 – 420.

[3] Kenan Yakut and Bayram Sahin, 2004, Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers, Applied Energy Vol 78, pp 273 – 288.

[4] Takahiro Adachi and Haruo Uehara, 2001, Correlation between heat transfer and pressure drop in channels with periodically grooved parts, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol 44, pp. 4333 – 4343.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายดุสิต บูรณโชคไพศาล

ประวัติการศึกษา

พศ.2539 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ประวัติการทำงาน

พ.ศ.2539 – พ.ศ.2540 วิศวกรส่วนผลิต – บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)

พ.ศ.2540 – พ.ศ.2542 วิศวกรเครื่องกล – บริษัท อรุณชัยเสรี คอนซัลติ้ง เอนจิเนียร์ส จำกัด

พ.ศ.2542 – พ.ศ.2548 วิศวกรโครงการ – บริษัท เอนเนอร์ยี่ ควอลิตี้ เซอร์วิส จำกัด

พ.ศ.2548 – พ.ศ.2549 วิศวกรเครื่องกล –
บริษัท บางกอก แพลนเนอร์ แอนด์ คอนซัลแตนท์จำกัด

พ.ศ.2549 – ปัจจุบัน วิศวกรเครื่องกล – บริษัท ไมน์ฮาร์ท (ประเทศไทย) จำกัด

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้