

การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบน้ำหนักระบบอก

ปริญญานิพนธ์
ของ
อนุสรณ์ สุขเกษม

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มกราคม 2550

การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบท่งทรงกระบอก

ปริญญานิพนธ์

ของ

อนุสรณ์ สุขเกษม

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มกราคม 2550

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล ประธานกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ แนะนำพร้อมให้ความรู้จนสำเร็จและ ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ครูเจริญ อาจารย์ ดร.พิชัย อัมภมมงคล กรรมการ ควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาให้แนวคิดในการวิเคราะห์ และช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น ในการทำปริญญานิพนธ์จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์จาก กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล รร. จปร. และคณาจารย์จาก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ต่องานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คณะอนุกรรมการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักนโยบายและแผนพลังงาน ที่ได้อนุมัติให้การสนับสนุนเงินจากกองทุนฯ แผนงานโครงการพัฒนาบุคลากร และคณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้การสนับสนุนเงินจากกองทุนงบประมาณแผ่นดินปี พ.ศ.2549 รวมทั้ง กรมทรัพยากรน้ำบาดาลในการดำเนินการต่างๆให้แก่ผู้วิจัย และขอขอบพระคุณ พท.ผศ.ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง และ ผศ.ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร ที่เอื้อเฟื้อโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับการศึกษาครั้งนี้

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ พี่ ที่ได้อบรมสั่งสอนรวมทั้งครอบครัวผู้วิจัย ที่ให้กำลังใจที่ดี และขอขอบคุณ เพื่อนๆ ที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

อนุสรณ์ สุขเกษม

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบท่งทรงกระบอก

ของ

อนุสรณ์ สุขเกษม

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวិศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)

วันที่ เดือน พ.ศ. 2550

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน

(อาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล)

..... ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล)

..... กรรมการ

(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย

จาก

กองทุนฯ แผนงานโครงการพัฒนาบุคลากร สำนักนโยบายและแผนพลังงาน
ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2549 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
การทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
2 ทฤษฎี.....	8
หลักการถ่ายเทความร้อน.....	8
หลักการพาความร้อน.....	8
การพาความร้อนภายนอก.....	10
การพาความร้อนโดยการไหลผ่านกลุ่มท่อ.....	14
การถ่ายเทความร้อนจากครีป.....	17
ประสิทธิภาพของครีป.....	20
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	22
อุปกรณ์ในการทดลอง.....	23
วิธีการทดลอง.....	26
ตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	27
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	29
4 ผลและการวิเคราะห์.....	33
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองและการคำนวณ	
ของครีปลักษณะแบบเรียงแถว.....	34
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองและการคำนวณ	
ของครีปลักษณะแบบสลับแถว.....	35
การศึกษาเชิงพารามิเตอร์ของครีปลักษณะแบบเรียงแถว.....	44
การศึกษาเชิงพารามิเตอร์ของครีปลักษณะแบบสลับแถว.....	49

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	54
สรุปผลการทดสอบ.....	54
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	53
 บรรณานุกรม.....	 56
 ภาคผนวก.....	 59
ภาคผนวก ก.....	60
ภาคผนวก ข.....	71
อภิธานศัพท์.....	82
 ประวัติย่อผู้วิจัย.....	 84

บัญชีตาราง

ตาราง

หน้า

1	ค่าของ D และ P สำหรับใช้ในสมการที่ (2-15) [19].....	16
2	แสดงคุณสมบัติและขนาดต่างๆของครีปที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3	แสดงค่าความแม่นยำ และค่าความคลาดเคลื่อน เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง.....	26
4	แสดงเงื่อนไขในการทดลองของครีปลักษณะแบบเรียงแถว และแบบสลับแถว.....	28
5	แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีปและทางออกเฉลี่ย ของครีปแบบเรียงแถวที่ $q = 0.91 \text{ kW/m}^2$	63
6	แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลาง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 7.....	63
7	แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป, อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป.....	63
8	แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีปและทางออกเฉลี่ย ของแบบเรียงแถวครีปที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$	64
9	แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลาง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 10.....	64
10	แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป, อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป.....	64
11	แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีปและทางออกเฉลี่ย ของครีปแบบเรียงแถวที่ $q = 2.73 \text{ kW/m}^2$	65
12	แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลาง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 13.....	65
13	แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป, อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป.....	65
14	แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีปและทางออกเฉลี่ย ของครีปแบบเรียงแถวที่ $q = 3.64 \text{ kW/m}^2$	66

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
15 แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลาง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 16.....	66
16 แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป, อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป.....	66
17 แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีปและทางออกเฉลี่ย ของครีปแบบสลั๊บน้ำที่ $q = 0.91 \text{ kW/m}^2$	67
18 แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลาง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 19.....	67
19 แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป, อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป.....	67
20 แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีปและทางออกเฉลี่ย ของครีปแบบสลั๊บน้ำที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$	68
21 แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลาง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 22.....	68
22 แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป, อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป.....	68
23 แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีปและทางออกเฉลี่ย ของครีปแบบสลั๊บน้ำที่ $q = 2.73 \text{ kW/m}^2$	69
24 แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลาง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 25.....	69
25 แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป, อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป.....	69
26 แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีปและทางออกเฉลี่ย ของครีปแบบสลั๊บน้ำที่ $q = 3.64 \text{ kW/m}^2$	70
27 แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลาง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 28.....	70

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
28 แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป, อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป.....	70
29 แสดงการเปรียบเทียบค่าต่างๆจากผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ ของครีปลักษณะแบบเรียงแถวที่ค่าฟลักซ์ความร้อน และความเร็วลมต่างๆ.....	80
30 แสดงการเปรียบเทียบค่าต่างๆจากผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ ของครีปลักษณะแบบสลับแถวที่ค่าฟลักซ์ความร้อน และความเร็วลมต่างๆ.....	81

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ

หน้า

1	แสดงการไหลขนานกับผนังราบ.....	11
2	แสดงการไหลตั้งฉากกับท่อกลม.....	13
3	แสดงการเรียงท่อแบบแนวเดียว และการเรียงสลับ.....	14
4	แสดงครีปที่แบ่งตามลักษณะหน้าตัด	18
5	แสดงครีปที่มีหน้าตัดไม่สม่ำเสมอ และ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับความยาวครีป.....	18
6	แสดงประสิทธิภาพของครีปตรง	21
7	แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง.....	22
8	แสดงอุปกรณ์ในขณะทำการทดลอง.....	23
9	แสดงการประกอบชุดครีปเข้ากับอุโมงค์ลม.....	24
10	แสดงชุดครีปแบบเรียงแถว และสลับแถวที่บรรจุในชุดให้ความร้อน.....	24
11	แสดงชุดกำเนิดควัน.....	25
12	แสดงชุดเครื่องมือวัดความเร็วของอากาศ.....	25
13	แสดงไดอะแกรม และขนาดของชุดทดลองในส่วนของอุโมงค์ลม.....	29
14	แสดงการสร้างเซลล์ และการแบ่งระดับในการคำนวณของครีปแบบเรียงแถว.....	31
15	แสดงการสร้างเซลล์ และการแบ่งระดับในการคำนวณของครีปแบบสลับแถว.....	32
16	แสดงเซลล์ในอุโมงค์ลมที่ใช้ในการคำนวณ.....	31
17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของอากาศเฉลี่ย กับค่าเรโนลด์ส์ในกรณีครีปเรียงตัวแบบเรียงแถว.....	34
18	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของครีป กับค่าเรโนลด์ส์ในกรณีครีปเรียงตัวแบบเรียงแถว.....	35
19	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย กับค่าเรโนลด์ส์ในกรณีครีปเรียงตัวแบบเรียงแถว.....	36
20	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรโนลด์ส์ กับค่าเรโนลด์ส์ในกรณีครีปเรียงตัวแบบเรียงแถว.....	37

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

21	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลของอากาศที่ได้จากการทดลอง และได้จากการคำนวณในกรณีครีปเรียงตัวแบบเรียงแถว.....	38
22	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยของอากาศ กับค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ในกรณีครีปเรียงตัวแบบสลับแถว.....	39
23	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของครีป กับค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ในกรณีครีปเรียงตัวแบบสลับแถว.....	40
24	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย กับค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ในกรณีครีปเรียงตัวแบบสลับแถว.....	41
25	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเชลล์นัมเบอร์เฉลี่ย กับค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ในกรณีครีปเรียงตัวแบบสลับแถว.....	42
26	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลของอากาศที่ได้จากการทดลอง และได้จากการคำนวณในกรณีครีปเรียงตัวแบบสลับแถว.....	43
27	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณฐานครีป ที่ $q = 3.64 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 1531$	44
28	แสดงการกระจายของอุณหภูมิที่ฐานครีป ที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$ ที่ Re ต่างๆกัน.....	45
29	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่หน้าตัดต่างๆกัน ที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 1531$	46
30	แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่หน้าตัดต่างๆกัน ที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 1531$	47
31	แสดงความเร็วของอากาศที่หน้าตัดต่างๆกัน ที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 4537$	47
32	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ฐานครีป ที่ $q = 1.28 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 3100$	49
33	แสดงการกระจายอุณหภูมิที่ฐานครีปที่ $q = 2.73 \text{ kW/m}^2$ ที่ Re ต่างๆกัน.....	50

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

34	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่หน้าตัดต่างๆกัน ที่ $q = 0.91 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 1546$	51
35	แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่หน้าตัดต่างๆกัน ที่ $q = 0.91 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 1540$	52
36	แสดงของความเร็วจานอากาศที่หน้าตัดต่างๆกัน ที่ $q = 2.73 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 9243$	53
37	แสดงจุดและระดับที่วัดอุณหภูมิครีบบนเรียบเงา.....	61
38	แสดงจุดและระดับที่วัดอุณหภูมิครีบบนสลับนเงา.....	61
39	แสดงจุดและระดับที่วัดอุณหภูมิครีบบนเรียบเงา.....	74
40	แสดงจุดและระดับที่วัดอุณหภูมิครีบบนสลับนเงา.....	75
41	แสดงลักษณะและระยะของครีบบนสลับนเงา.....	75

การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบท่งทรงกระบอก

บทคัดย่อ

ของ

อนุสรณ์ สุขเกษม

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มกราคม 2550

อนุสรณ์ สุขเกษม.(2550). การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบทรงกระบอก.

ปริญญาานิพนธ์ วศ.ม.(วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย

ศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ดร.ไพศาล นาผล, ผศ.ดร.คุณเจริญ, ดร. พิชัย

อักษรมงคล.

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลของการศึกษาทั้งการทดลอง และการคำนวณเชิงตัวเลขเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนของกลุ่มครีบทรงกระบอกที่มีปลายค่อยๆ เล็กลง ครีบทมีลักษณะการเรียงตัวแบบเรียงแถว และแบบสลับแถว ซึ่งถูกทดสอบภายใต้สภาวะการให้ความร้อนคงที่โดยครีบททำจากอลูมิเนียม ซึ่งในการทดสอบได้ทำการแปรเปลี่ยนค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์และค่าฟลักซ์ความร้อนอยู่ในช่วง 1000-9000 และ $0.91-3.64 \text{ kW/m}^2$ ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้ใช้แบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตรฐาน ในการวิเคราะห์ลักษณะการไหล การถ่ายเทความร้อน โดยมีการวางกริดในระบบแบบไม่เป็นโครงสร้าง (Unstructured grid) ในรูปแบบ 3 มิติ โดยนำผลที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกันดี นอกจากนั้นยังได้พิจารณาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหล

คำสำคัญ (Keywords): คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน / คุณลักษณะการไหล / ครีบทที่มีปลายค่อยๆ เล็กลง

Study on the Convective Heat Transfer of the Cylindrical Pin Fins

AN ABSTRACT

BY

ANUSORN SUKKASEM

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

January 2007

Anusorn Sukkasem. (2007). *Study on the Convective Heat Transfer of the Cylindrical Pin Fins*.

Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School,
Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Dr.Paisarn Naphon, Asst. Prof.
Dr. Jutarat Kurujareon, Dr. Pichai Asadamongkon,

In the present study, the numerical and experimental results of the heat transfer and flow characteristics of the taper pin fin array are presented. The pin fin arrays with in-line and staggered layouts are tested under constant heat flux conditions. The taper pin fin arrays are fabricated from the aluminum. Experiments were performed at various air Reynolds number and heat flux in the varying of 1000-9000, 0.91-3.64 kW/m². The $k-\varepsilon$ standard turbulence model is employed to simulate the flow and heat transfer development. A finite volume method with an unstructured nonuniform grid system is employed for solving the three-dimensional model. The numerical results are verified by comparing with the measured data. The reasonable agreement is obtained from comparison between the model and experiment. Effects of relevant parameter on the heat transfer and flow characteristics are considered.

Keywords: Heat transfer characteristics / Flow characteristics / Taper pin fins

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในโลกปัจจุบันพลังงานความร้อนได้เข้ามามีบทบาทและเพิ่มความสำคัญในชีวิตเรา บวกกับการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก ทำให้ความต้องการด้านพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น ไม่สอดคล้องกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลังงาน เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ที่มีปริมาณน้อยลง และมีราคาแพง จึงได้มีการนำพลังงานจากแหล่งอื่นๆ มาใช้แทน ซึ่งก็จะออกมาในรูปแบบของพลังงานความร้อนแทบทั้งสิ้น ขบวนการถ่ายเทความร้อนนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิศวกรรม โดยเฉพาะวิศวกรเครื่องกลต้องเผชิญกับปัญหาการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด เพราะต้องเกี่ยวข้องกับการใช้ความร้อนในการผลิตพลังงานของเครื่องจักรกลต่างๆ

การพาความร้อนโดยใช้อากาศเป็นขบวนการหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีความสำคัญในงานวิศวกรรมและการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น เครื่องจักรกล เครื่องปรับอากาศ ซึ่งต้องอาศัยขบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาทั้งสิ้น วิศวกรได้มีการคิดค้นหาวิธีการต่างๆ มาใช้พัฒนาขบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ก็จะประสบกับปัญหาอันมีสาเหตุมาจากขีดจำกัดในการเพิ่มสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน และการที่มีพื้นที่จำกัดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จึงได้ค้นหาวิธีที่จะเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนก็คือ การติดโลหะแผ่นบางๆ เข้ากับผิวโลหะเดิมเพื่อเพิ่มพื้นที่ ซึ่งเรียกว่าครีป การออกแบบรูปทรงของครีปมีความสำคัญ เนื่องจากการออกแบบที่ดีทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพแบบครีปแห่งทรงกระบอกที่มีปลายค่อยๆ เล็กลง เป็นครีปที่มีระบายความร้อนได้ดี เนื่องจากสามารถให้พื้นที่ผิวได้มาก มีขนาดเล็กใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย และมีการไหลวนของอากาศได้ดี ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพสูง จึงสมควรศึกษาเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ และคุณลักษณะการไหลของอากาศในการถ่ายเทความร้อน เพื่อทำความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของความร้อน เพราะการนำเอาพลังงานมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจทางทฤษฎีเป็นอย่างดี เพื่อนำไปพัฒนาระบบการถ่ายเทความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้เกิดความก้าวหน้าในวิศวกรรมด้านต่างๆ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการอุตสาหกรรมและเป็นรากฐานของความเจริญทางเทคโนโลยีเพื่อการดำรงชีวิตต่อไป

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการไหลของอากาศโดยการพาความร้อนของ ครีบบั่ทงทรงกระบอกที่มีปลายค่อยๆ เล็กลง
2. ศึกษาผลของค่าฟลักซ์ความร้อน อัตราการไหล การเรียงครีบบั่ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบบั่

ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. เป็นการศึกษาทางการทดลอง และทางทฤษฎีในการพาความร้อนของครีบบั่ทงทรงกระบอกที่มีปลายค่อยๆ เล็กลง
2. ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยการพาโดยพิจารณาการไหลของอากาศผ่านครีบบั่ที่มีค่าฟลักซ์ความร้อนที่ฐานครีบบั่คงที่ (Constant heat flux)
3. ใช้อากาศเป็นสารทำงาน (Working air) โดยให้อากาศไหลในแนวดิ่ง ซึ่งสามารถปรับค่าฟลักซ์ความร้อน และอัตราการไหลของอากาศได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาในการวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในรูปของครีบบั่ทงทรงกระบอกที่มีปลายค่อยๆ เล็กลง
2. ได้เข้าใจถึงค่าพารามิเตอร์และประพุดิกรรมต่างๆ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของครีบบั่
3. ได้ข้อมูลในการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

การทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการถ่ายเทความร้อนในการแก้ไขและพัฒนาเพื่อให้เกิดประโยชน์ เช่นจากการศึกษาเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานที่จะทำการวิจัยนี้ พบว่ามีการศึกษาและทำการทดลองอย่างต่อเนื่อง มีการนำเอาครีบบั่ชนิดต่างๆ มาทำการศึกษาเพื่อหาข้อดีและปัญหา

เบบัสเฮก อะคินทุธ และโพรเบิร์ต (Babus'Haq, Akintunde; & Probert. 1995). ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองการถ่ายเทความร้อนด้วยอากาศของกลุ่มครีบบั่ทงทรงกลมกระบอก ที่วางตั้งอยู่บนฐาน และวางฐานให้อากาศไหลผ่านในแนวนอน อากาศเป็นการไหลแบบบังคับและมีอัตราการไหลแบบคงที่ ในการทดลองได้มีการเปลี่ยนความเร็วลม วัสดุที่ใช้ในการทำครีบบั่เป็นอลูมิเนียมผสม และเหล็กผสม การจัดเรียง ระยะห่างระหว่างครีบบั่ อากาศเข้ามีอุณหภูมิ 20°C และอุณหภูมิที่ฐานของครีบบั่ 40°C จากการรวบรวมผลการทดลองเพื่อพิจารณาหาเหตุผลที่เหมาะสม ที่สุด และมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการวาง

ครีบบแบบเรียงแถวและแบบสลับแถว และเปลี่ยนระยะห่างของครีบ และความเร็วลมรวมทั้งอิทธิพลที่เกิดจากการนำความร้อนจากการทดลองจุดที่ดีที่สุดคือ อัตราส่วนระยะห่างของครีบต่อความโตครีบคือ 1.4 และใช้การจัดวางครีบบแบบเรียงแถวทั้งระบบ โดยครีบที่ทำจากอลูมิเนียมผสมจะให้การถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทความร้อนโดยมีการไหลของอากาศที่ดีที่สุดขึ้นอยู่กับการจัดวางแถวของครีบ และวัสดุที่ใช้ในการทำครีบ

แดส และลาสึลอส (Das; & Razelos. 1997). ได้ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพที่ดีของการพาความร้อนของครีบแท่งทรงกระบอกที่มีปลายค่อยๆ เล็กลง ซึ่งใช้กันมากในระบบปรับอากาศของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ในรูปของการคำนวณทางทฤษฎี โดยคิดจากค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ความโตและความยาวของครีบ ความลาดเอียง สัมประสิทธิ์การพา และชนิดของวัสดุ จากการคำนวณสามารถบอกได้ว่าการแก้ปัญหา การกระจายความร้อนของครีบแท่งทรงกระบอกที่มีปลายค่อยๆ เล็กลงสามารถกระทำได้โดยการกำหนดขนาดและปริมาตรของครีบ แต่ในการปฏิบัติทางที่ดีควรจะพิจารณาถึงสภาวะของครีบและสถานที่ปฏิบัติงานอีกด้วย

แฟบ-บริค (Fabbri. 1999). ได้ทำการทดลองออกแบบครีบที่มีรูปร่างต่าง ๆ แบบรูปร่างไม่สมส่วนตามความยาวในท่อทรงกระบอกเพื่อหาการถ่ายเทความร้อนที่สภาวะที่ดีที่สุด การหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดทางรูปทรงเรขาคณิตจากภายในที่มีการสร้างไม่สมส่วนกัน เพื่อเป็นการยกระดับการถ่ายเทความร้อนภายใต้การไหลแบบราบเรียบและคงที่ ในการสร้างครีบได้ทดลองสร้างให้ครีบมีความโค้งมากน้อยต่างกัน ซึ่งทำให้ค่า Equivalent nusselt number แตกต่างกันไป ซึ่งอัตราความเร็วและอุณหภูมิในการกระจายซึ่งมีครีบในท่อระบบปิดแตกต่างกันออกไป และในการวิเคราะห์ได้แบ่งออกเป็นส่วนเล็กๆ ที่แน่นอน การคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อนในการเปรียบเทียบของเทอมที่มีประโยชน์มาก คือพื้นที่ผิวและรูปทรงเรขาคณิต ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยความยาวท่อ และหาสาเหตุรองลงมาคือ ความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนัก และผลที่มีต่อประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของครีบที่ไม่สมส่วนในครีบกะบอกแบบปิดประการสุดท้าย คือการแตกต่างของเหตุการณ์ และผู้ที่ปฏิบัติในสภาวะที่ดีที่สุดของครีบคือความสมมาตรกันของครีบ

แอลโมเบล และบีเจน (Almogbel; & Bejan. 2000). ได้ทำการศึกษาวีธีที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของครีบชนิดฝั 2 ชั้น โดยออกแบบให้ครีบระบายความร้อนมีการแยกแขนงหลาย ๆ อัน ลักษณะคล้ายก้านของต้นไม้ โดยมีรัศมีเท่ากับความโตของครีบทรงกระบอกภายนอก ซึ่งใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของ การนำความร้อนและการพาความร้อน โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนภายนอก คือความกว้างต่อความหนาของครีบ และอัตราส่วนภายในคือเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอกต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของครีบ และในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนอัตราส่วน, ปริมาตรของครีบ, ค่า Prandtl number และค่า Reynolds number นำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพ

ที่ดีที่สุดในการออกแบบครีบบนแบบโครงสร้างคล้ายต้นไม้ โดยการทดลองเปลี่ยนค่าตัวแปร และค่าอัตราส่วนของรูปทรงนั้น ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดค่อนข้างจะขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิต และขึ้นอยู่กับอัตราความเร็วในการไหลแบบอิสระ และค่า Parndtl number และวัสดุที่ใช้ทำครีบบมีผลเพียงเล็กน้อย และเป็นที่ยอมรับโดยทั่วกันว่ารูปทรงกลมมีการนำความร้อนได้ดีที่สุด และในแง่ของอัตราส่วนภายในและอัตราส่วนภายนอกมีค่าใกล้เคียงกัน

มารริน และคณะ (Marin; et al. 2004). ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยอากาศ ของครีบบนแบบที่มีลักษณะภายนอกเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส หกเหลี่ยมด้านเท่า และทรงกลมกระบอกภายในสภาพ และพื้นที่ผิวเท่ากัน โดยวิธีวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์โดยแบ่งพื้นที่ของครีบบออกเป็นส่วนเล็กๆการวิเคราะห์ โดยวิธีทำการทดลองติดตั้งครีบบนขนาดความหนา 0.2 mm. และขนาดความหนา 0.4 mm. ของคอยล์ร้อนและคอยล์เย็นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 3.8 m x 4.0 m x 2.3 m ของเครื่องทำความเย็นขนาด 5 kW มีอุณหภูมิต่ำสุด -20°C สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน $38-40 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ โดยทำการทดลองใน 1 มิติ และ 2 มิติ และทดลองแบ่งเป็นส่วนเล็กๆเป็นขนาดต่างๆ ซึ่งผลการทดสอบโดยการวิเคราะห์ทางตัวเลขในสภาพที่เหมือนกัน และพื้นที่ผิวเท่ากันอยู่ในสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อน ค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนที่รอบๆครีบบมีของครีบบ และวิ่งเข้าหาอุณหภูมิคงที่เร็ว และดีที่สุดคือ แบบทรงกลม หกเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามลำดับ

เน-ดู และคณะ (Naidu; et al. 2004). ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของพื้นที่ผิวของครีบบนทรงกลมกระบอก ซึ่งปัญหาทางธรรมชาติของการถ่ายเทความร้อนโดยการพาอย่างมีประสิทธิภาพผ่านสารตัวกลางที่ล้อมรอบในแนวตั้งของครีบบนทรงกระบอก ในการวิเคราะห์ทางตัวเลข ซึ่งเป็นการรวมการนำ และการพาซึ่งได้คำนวณแล้ว ในสภาวะที่เหมือนกัน การนำความร้อนในครีบบได้รวมเอาสมการสมดุลมวล สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน ไว้ด้วยกันในการผ่านสารตัวกลาง โดยการวิเคราะห์ทางตัวเลข ใช้วิธี Alternating Direction Implicit method (ADI) เพื่อหาค่าอัตราส่วนของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการนำและการพาความร้อนในแง่ของอัตราส่วน Darcy number เฉพาะประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของครีบบที่แสดงที่ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนผ่านสารตัวกลางผลที่ได้คือ

1. ปัญหาตามธรรมชาติที่เกิดจากการพาความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพผ่านสารตัวกลางของครีบบนทรงกระบอกจะเกิดขึ้นพร้อมกับการนำความร้อน

2. ผลกระทบจากตัวแปรของครีบบในการนำและการพาขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอุณหภูมิ และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในสภาวะที่ผ่านสารตัวกลางเหมือนกัน และในสภาวะที่ไม่สามารถผ่านสารตัวกลาง ต้องนำผลที่ได้ถูกวิจัยมาโดยเฉพาะสาขามาทำการเปรียบเทียบและทำการสมดุลค่าการถ่ายเทความร้อนโดยประมาณ

3. การวิเคราะห์ตัวเลขที่แสดงผลกระทบของ Darcy number โดยคิดค่าที่สูงที่สุดของการผ่านได้ของสารตัวกลาง อุณหภูมิที่ลดลงของครีป และประสิทธิภาพครีปเป็นการกำหนดขึ้น

ฮี และคณะ (He; et al. 2004). ได้ทำการศึกษาธรรมชาติของการพาความร้อนผิวนอกของรูปทรงกระบอกในแนวตั้งโดยไม่คิดความร้อนตามแนวขวางของผนังตามธรรมชาติ การถ่ายเทความร้อนโดยการพา และการไหลในแนวตั้งของแท่งทรงกระบอกเป็นแบบคงที่ แต่ความแตกต่างของอุณหภูมิของพื้นที่ผิวทั้งสองและการศึกษาทางตัวเลขในกรณีไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ซึ่งได้ประยุกต์เพื่อให้สามารถแสดงโดยการจำลองโดยใช้ท่อในเครื่องทำความเย็น

เชลีฟ และซีฟัว (Cherif; & Sifaoui. 2004). ได้ศึกษาทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนโดยผ่านสารตัวกลางกึ่งโปร่งใสรอบวัสดุทรงกระบอก เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น เซลล์รับพลังงานแสงอาทิตย์ โดยที่ภายในชุดทดลองมีความร้อนคงที่ และภายนอกหุ้มฉนวนกันความร้อน และการทดลองเพื่อคำนวณทางตัวเลขได้ทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรในการนำความร้อนการพา การแผ่รังสีความร้อน และค่า Re ปัญหาที่มีผลกระทบที่แตกต่างกัน 4 อย่าง คือ ขนาดของรูปร่าง อุณหภูมิ สถานะ และความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งล้วนแต่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนในการแผ่รังสีทั้งสิ้น

เมอร์ซี และคณะ (Merci; et al. 2005). ได้ทำการทดลองและศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนของฐานทรงกระบอก ผลการทดลองที่น่าสนใจเฉพาะพื้นที่ผิวของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเป็นการปั่นป่วนด้วยหัวฉีด ที่มีอิทธิพลต่อฐานทรงกระบอก การจำลองรูปแบบจากพื้นฐานของปัญหาสองปัญหาคือ การแสดงความปั่นป่วนอย่างรุนแรงที่ผิดปกติ และปัญหาความปั่นป่วนของความหนืดที่หมุนวนตามส่วนโค้ง โดยรวมกับผลกระทบจากท่อไอน้ำที่วิ่งผ่านในการกระจายอิทธิพลของการลำเลียงและความหนืดทำให้เกิดการปั่นป่วนอย่างรุนแรง ในส่วนของการวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้ใช้แบบจำลองต่างๆทำนายผล และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยพิจารณาจากอัตราความลาดเอียงที่เป็นเส้นตรงของการแพร่กระจายเป็นสมมุติฐานในการประยุกต์จากการทดลองพบว่าผลที่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของค่า Re และการพิจารณาระยะห่างของแท่นหัวฉีดที่วางไว้ในระยะไกล ในส่วนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่าแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

เดกทีคิน ออซโทป และซาฮิน (Dagtekin, Oztop; & Sahin. 2005). ได้ทำการวิเคราะห์โดยการคำนวณพลังงานความร้อนที่ส่งผ่านครีปที่ทรงกลมที่มีขนาดและความยาวแตกต่างกัน โดยการไหลเป็นอย่างราบเรียบ โดยในการศึกษาได้ทดลองเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆดังนี้ ค่าความยาวครีป ค่า Re มุมครีป ค่าอัตราส่วนของความยาวของครีปต่อความโตของครีป และอุณหภูมิความร้อนของน้ำ ซึ่งเป็นสารตัวกลางใช้ในการทดลองส่งถ่ายพลังงานความร้อน ในการศึกษาโดยละเอียด ผลจากการวิเคราะห์พลังงานที่

ส่งผ่านครีปในการไหลแบบราบเรียบ จะมีผลขึ้นกับรูปร่างที่ต่างกัน 3 อย่าง คือ ความยาวของครีป มุมสามเหลี่ยม และรูปร่างตัววีของครีป หรือเรียกที่โดยรวมว่ามิติของครีป ซึ่งจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่า การสร้างจำนวนครีปจะมีความหมายและอิทธิพลต่อความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อการผลิตและส่งผ่านพลังงานความร้อนด้วยทั้งนั้น

ฟิลิส และคณะ (Peles; et al. 2005). ได้ทำการศึกษาการสูญเสียความร้อนขนาดเล็กมาก ๆ จากการวางของครีปในการถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบบังคับ ซึ่งเป็นการค้นหาเหตุผลในการถ่ายเทความร้อน และความดันลดที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ที่เกินกว่าจะเก็บไว้ของครีปเป็นการแสดงเพื่อให้เข้าใจง่ายของการต้านทานความร้อนโดยรวม ซึ่งได้รับรองจากผลการทดลอง และการอธิบาย การทดลองถึงผลของรูปทรงทางเรขาคณิต และค่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการไหลของการต้านทานความร้อนโดยรวม โดยการตั้งกฎการต้านทานความร้อนที่สามารถบรรลุผลสำเร็จในการสูญเสียความร้อนของครีป การประเมินค่าความต้านทานความร้อน จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในช่วงของขนาดที่เล็กมาก ๆ ในหลาย ๆ รูปการผลลัพธ์ คือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการไหลที่ถูกสร้างในการต้านทานการพาความร้อน ซึ่งมีค่าอย่างมากแต่น้อยกว่าการต้านทานความร้อนโดยรวม

คอร์ซิวัน (Corcione. 2005). ได้ทำการศึกษาทางตัวเลขในการถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบอิสระการไหลของอากาศเป็นแบบราบเรียบมีทิศทางการไหลในแนวระนาบและมีอุณหภูมิคงที่ โดยการจำลองจัดวางแท่งทรงกระบอกในแนวตั้ง โดยแบ่งเป็น 1 อัน 2-6 อัน และ 2-50 อัน มีการแบ่งระยะจากจุด ศูนย์กลางให้มีระยะห่างเท่า ๆ กัน เป็นการศึกษาทางตัวเลขโดยศึกษาลักษณะเฉพาะทาง เพื่อนำไปพัฒนาการศึกษาโดยโปรแกรม SIMPLE-C เป็นตัวหาคำตอบโดยทำการศึกษาในด้าน การถ่ายเทมวล, การถ่ายเทโมเมนตัม และการถ่ายเทพลังงาน ความยาวของครีป 22.3 มม. ทำการจัดวางแบบเรียงแถว แบบสลับแถว และยังปรับเปลี่ยนค่า *Raleigh number based on the cylinder-diameter* (*Ra*) ให้อยู่ระหว่าง 5×10^2 และ 5×10^5 ผลที่ได้คือ คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับปัจจัยสองประการคือ มิติของครีป และการจัดเรียงของครีป ซึ่งการจัดเรียงครีปจะให้ความสมบูรณ์มากที่สุด

ซาฮิติ และคณะ (Sahiti; et al. 2005). ได้ทำการศึกษาและแสดงการเปรียบเทียบการไหลในท่อของแถวแท่งครีปจากการเปลี่ยนหน้าตัดครีป โดยการสร้างอุโมงค์ลมแบบจำลองในการทดลองมีอากาศเป็นสารทำงานและแบ่งแท่งครีปตามรูปหน้าตัดทางเรขาคณิตเป็น 6 ชนิด คือ รูปทรงรีที่มีมุมต่างๆกัน วงกลม และสี่เหลี่ยมพร้อมกับคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (CFD) เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากการนำและการพาที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ในการทดลองกำหนดให้อากาศมีความเร็วระหว่าง 1.5-4 m/s และให้ความร้อนที่ฐานครีปด้วยไฟฟ้า แถวของแท่งครีปมีลักษณะเรียงแถวและสลับแถว โดยศึกษารูปร่างการไหลของอากาศ และความดันลด ที่เกิดขึ้น ค่า *Ra*, *Nu*, และ *Eu* จากการทดลองพบว่าการสร้างเซลล์มากขึ้นที่ประมาณ 2×10^5 เซลล์ จาก 5×10^5 เซลล์ ขึ้นไปจะให้ค่าความแม่นยำเพิ่มขึ้น 3% ลักษณะ

แท่งครีบบางสลับแถวจะมีการถ่ายเทความร้อนสูงแต่ก็มีความดันลดสูงเช่นเดียวกัน ในด้านรูปร่างของอากาศในการถ่ายเทความร้อนแบบสลับแถวครีบบที่มีรูปหน้าตัดแบบวงรีชนิดมีการถ่ายเทความร้อนสูงและในแบบเรียงแถวครีบบที่มีรูปหน้าตัดแบบวงกลม มีการถ่ายเทความร้อนได้สูงที่สุด

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้ทราบถึงผลการวิเคราะห์และการทดลองของครีบบชนิดต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นครีบบางทรงกลมกระบอก จะเห็นว่าการวิเคราะห์และการทดลองของครีบบางทรงกระบอกที่มีปลายค่อยๆ เล็กลงน้อยมาก ดังนั้นผู้ทำการวิจัยครั้งนี้มองเห็นประโยชน์ในการการทดลอง และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบบ โดยการศึกษาลักษณะการวางของครีบบ การไหลของอากาศ และค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบบบางทรงกระบอกที่มีปลายค่อยๆ เล็กลง

บทที่ 2

ทฤษฎี

หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer)

คือการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธีด้วยกัน คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี การเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น แต่กลไกในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนแต่ละวิธีแตกต่างกันซึ่งครีบรรยายความร้อนโดยวิธีการพา และมีอากาศเป็นสารตัวกลาง

การนำความร้อน (Conduction) คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกัน แต่มีอุณหภูมิต่างกัน ในการนำความร้อนความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสาร โดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง

การพาความร้อน (Convection) คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงาน และการเคลื่อนที่ของการไหล

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) คือการที่ความร้อนเคลื่อนที่ได้โดยมิต้องอาศัยตัวกลาง ดังเช่นในการนำและการพา ในการแผ่รังสีความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีในสุญญากาศ

หลักการพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพา คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของการไหล การพายังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด การพาตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection) และการพาโดยการบังคับ (Forced convection)

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ 2-1 ซึ่งเขียนได้ดังนี้คือ

$$q = h(T_h - T_c) \quad (2-1)$$

สมการนี้เป็นสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ในกรณีทั่วไป ปริมาณที่สำคัญที่สุดในสมการนี้ก็คือ h (สัมประสิทธิ์การพาความร้อน)

ถ้ารู้ค่าของ h จะคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ จะเห็นว่า มีปริมาณต่างๆ มากมายที่มีอิทธิพลต่อการพาความร้อน เช่น ลักษณะและการวางตัวของพื้นผิว ความเร็วของของไหล (ในกรณีของการพาโดยการบังคับ) ความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างพื้นผิวและของไหล (ในกรณีของการพาตามธรรมชาติ) เพราะปริมาณนี้จะทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหลขึ้น คุณสมบัติต่างๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น (ρ) ความหนืด (μ) ค่าการนำความร้อน (k) ความร้อนจำเพาะ (C_p) เป็นต้น การที่จะคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ เราจะต้องรู้ว่าแต่ละปริมาณที่กล่าวมาแล้ว มีอิทธิพลอย่างไรต่อค่าของ h วิธีการที่จะคำนวณหาค่า h จึงเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน การจะหาสมการทั่วไป สมการเดียวมาใช้สำหรับคำนวณ h ให้ใช้ได้ในทุกกรณีนั้นยังทำไม่ได้ จุดมุ่งหมายที่สำคัญของการศึกษาเรื่องการพาความร้อนสำหรับวิศวกรก็คือ การหาวิธีที่จะคำนวณค่า h ในกรณีที่สำคัญๆ ซึ่งพบกันบ่อยๆ ในทางวิศวกรรมศาสตร์

การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural or free convection)

คือการเคลื่อนที่ของความร้อน ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลไม่ถูกทำให้เคลื่อนไหวโดยกลไกภายนอก วัตถุซึ่งมีผิวเรียบอยู่ในของไหลซึ่งอยู่นิ่งถ้าอุณหภูมิของผิวสูงกว่าอุณหภูมิของของไหล ความร้อนจะเริ่มเคลื่อนที่มายังของไหลที่ชิดกับผนัง ทำให้ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ชิดผนังต่ำลง ซึ่งทำให้เกิดแรงผลักดันให้ของไหลลอยตัวขึ้นของไหลที่อยู่ต่ำกว่า าก็จะเคลื่อนเข้ามาแทนที่ และทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหล

เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนในกรณีนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณต่างๆ หลายปริมาณ เช่น คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล ขนาดและลักษณะของของแข็ง อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างของไหลและพื้นผิว นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของสาร ซึ่งมีผลต่อแรงลอยตัวของสาร ก็ยังมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนด้วย ถ้าจะหาสมการมาใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยวิธีการวิเคราะห์เป็นสิ่งที่ยากมาก และทำได้ในกรณีง่ายๆ บางกรณีเท่านั้น สมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สำหรับการพาตามธรรมชาติส่วนมากแล้วได้จากการวิเคราะห์เชิงมิติ

การพาโดยการบังคับ (Forced convection)

ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อของไหลมีความเร็วอยู่แล้วด้วยกลไกภายนอก เช่น พัดลมหรือสูบน้ำ เมื่อของไหลมีความเร็ว เราจะต้องทราบกลไกในการเคลื่อนที่ของของไหลก่อน โดยปกติ เราจะแบ่งการไหลของของไหลเป็นสองแบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน

(Turbulent flow) ในการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งของไหลไหลเป็นชั้นๆ หนานกับความร้อน จะถ่ายเทจากผิวของของแข็ง โดยการนำ และถ่ายเทต่อ ๆ กันไปในของไหลโดยการนำผ่านชั้นของของไหล ในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลด้วย การเคลื่อนที่ของความร้อนส่วนใหญ่ จะเกิดจากอนุภาคของของไหลที่ได้รับความร้อนมาแล้วเคลื่อนที่นำความร้อนไปยังที่อื่น ดังนั้นยิ่งการไหลแบบปั่นป่วนมากเท่าใด การเคลื่อนที่ของความร้อนจะยิ่งมากขึ้นเท่านั้นในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึง การพาโดยการบังคับของการเคลื่อนที่ของของไหล

การพาความร้อนภายนอก (External convection heat transfer)

การพาความร้อนภายนอกเกิดจากของไหลเป็นสารตัวกลาง โดยของไหลมิได้ถูกจำกัดให้ไหลในบริเวณที่กำหนด แต่เป็นการไหลผ่านผิวนอกของของแข็ง เช่นการไหลผ่านผนังราบ การไหลตั้งฉากกับวัตถุรูปทรงกระบอก การไหลของของไหลมากระทบกับของแข็งรูปร่างลักษณะต่างๆ ในทิศทางใดก็ได้

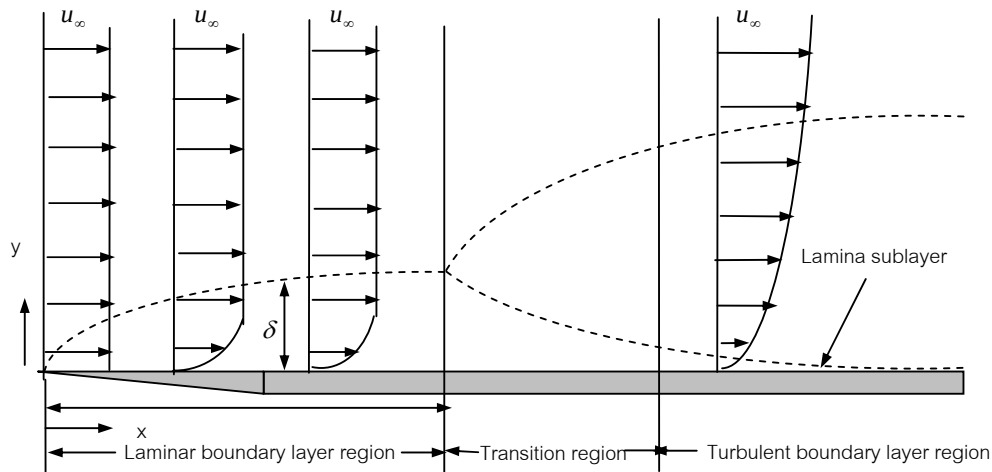
การพิจารณาไหลของของไหลผ่านผนังราบดังแสดงในภาพประกอบ 1 จะเห็นได้ว่า การที่มีผนังอยู่ในของไหลทำให้ความเร็วของของไหลส่วนที่อยู่ใกล้กับผนังเปลี่ยนไป เมื่อพิจารณาแล้วอาจจะแบ่งของไหลออกเป็นสองบริเวณ บริเวณแรกอยู่ใกล้กับผนัง เป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากการที่ผนังราบมาอยู่ในของไหล ทำให้ความเร็วของของไหลในบริเวณนี้เปลี่ยนไป บริเวณที่สองเป็นบริเวณที่ของไหลไม่ได้รับอิทธิพลจากผนังราบ

ของไหลบริเวณแรกซึ่งได้รับอิทธิพลจากผนังนั้นเรียกกันว่าบาวดาร์แลเยอร์ (Boundary layer) จะเห็นจากภาพประกอบ 1 ว่าความเร็วของของไหลที่ผิวของผนังนี้มีค่าเป็นศูนย์ แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นจนเท่ากับความเร็วของของไหลภายนอก บาวดาร์แลเยอร์ (u_∞) หรือที่เรียกว่า ความเร็วของฟรีสตรีม (Free stream velocity) จะเห็นได้ว่า บาวดาร์แลเยอร์เกิดขึ้นที่ปลายของผนังแล้วค่อยๆ มีความหนาเพิ่มขึ้นไปตามทิศทางของการไหลของของไหล ในช่วงแรก บาวดาร์แลเยอร์จะเป็นแบบลามินาร์ เมื่อบาวดาร์แลเยอร์มีความหนาเพิ่มขึ้นถึงจุดๆ หนึ่ง การไหลจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนและบาวดาร์แลเยอร์จะค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็นเทอร์บูเลนต์บาวดาร์แลเยอร์ (Turbulent boundary layer) การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่อยเป็นค่อยไป ในช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้การไหลจะเป็นแบบราบเรียบและปั่นป่วนผสมกันบริเวณนี้เรียกว่า ทรานซิชัน โซน (Transition zone) ถึงแม้ว่าการไหลจะเปลี่ยนจากราบเรียบเป็นปั่นป่วนแล้ว การไหลในชั้นบางๆ ของของไหลส่วนที่อยู่ติดกับผนังก็ยังเป็นแบบราบเรียบอยู่ บริเวณนี้มีชื่อเรียกว่า ลามินาร์ซับแลเยอร์ (Laminar sublayer)

ในเชิงของความเร็ว อาจกล่าวได้ว่า บาวดาร์แลเยอร์ คือบริเวณของของไหลที่ค่าของ du/dy ไม่เท่ากับศูนย์ ในกรณีนี้ ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress) หรือแรงที่ของไหลกระทำที่ผิวของผนังต่อหน่วยพื้นที่ ในกรณีที่มีการไหลในบาวดาร์แลเยอร์เป็นแบบราบเรียบ ให้ได้โดยสมการ

$$\tau_0 = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=0} \quad (2-2)$$

โดยที่ μ คือความหนืด (Dynamic viscosity) ของของไหล



ภาพประกอบ 1 แสดงการไหลขนานกับผนังราบ

เนื่องจากการไหลแบบราบเรียบคือการไหลที่ของไหลเคลื่อนที่เป็นชั้นๆ ไม่มีการเคลื่อนไหวของอนุภาคของไหลในทิศทางอื่นนอกจากทิศทางของการไหลๆ การถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นของบาวดาร์แลเยอร์ และตั้งฉากกับผนังในกรณีของลามินาร์บาวดาร์แลเยอร์ จึงเป็นการเคลื่อนที่แบบการนำความร้อน ซึ่งเขียนได้ดังนี้คือ

$$Q = Q/A = -k(dT/dy) \quad (2-3)$$

จะเห็นได้ว่า เมื่อการไหลของของไหลเป็นแบบราบเรียบ ความเค้นและอัตราการถ่ายเทความร้อนคำนวณได้จากสมการที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในสมการที่ (2-2) และ (2-3)

เมื่อการไหลของของไหลเปลี่ยนไปเป็นแบบปั่นป่วนแล้ว จะมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในทิศทางอื่นนอกจากทิศทางของการไหล การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงขึ้น และสมการที่ (2-3) จะใช้ในการคำนวณค่าของการถ่ายเทความร้อนไม่ได้ เพราะการเคลื่อนที่ของความร้อนในกรณีนี้ มิได้เป็นไปโดยวิธีการนำความร้อนอย่างเดียว ในทำนองเดียวกัน ความเค้นก็ไม่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-2) เช่นเดียวกัน หากการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ถึงแม้บาวดาร์แลเยอร์จะเปลี่ยนจากแบบราบเรียบเป็นแบบ

ปั่นป่วน แต่ของไหลชั้นบางๆ ที่อยู่ติดกับผนังซึ่งเรียกว่า ลามินาร์สับแลเยอร์นั้นยังมีลักษณะ เป็นแบบ ลามินาร์บาวดารีแลเยอร์อยู่ ดังนั้นสำหรับชั้นบางๆ นี้ สมการที่ (2-2) และ (2-3) ยังใช้คำนวณค่าความเค้นและการถ่ายเทความร้อนได้

ภาพประกอบ 1 แสดงให้เห็นว่า มีบาวดารีแลเยอร์อยู่สามแบบ คือ แบบลามินาร์ เทอร์บูลแลนท์ และ ทรานซิชัน ปริมาณที่มีความสำคัญมากในการที่จะกำหนดว่า บาวดารีแลเยอร์จะเป็นแบบไหน คือ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Re = \frac{u_{\infty} x}{\nu} \quad (2-4)$$

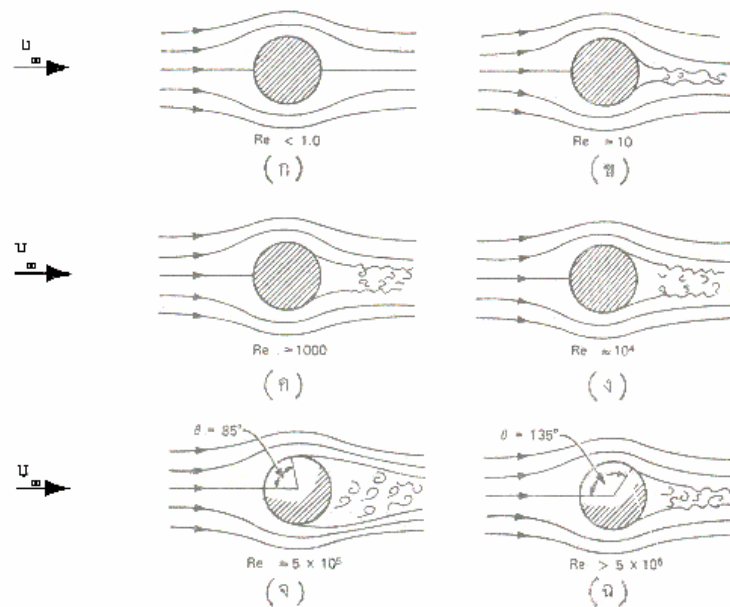
โดยที่ x คือระยะทางที่วัดจากปลายของผนังไปตามทิศทางการไหลของของไหล ได้มีการกำหนดค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สำหรับบาวดารีแลเยอร์แบบต่างๆ ในกรณีของการไหลนานกับผนังราบไว้ดังนี้

$$\text{บาวดารีแลเยอร์แบบลามินาร์} \quad 0 < Re < 5 \times 10^5$$

$$\text{บาวดารีแลเยอร์แบบทรานซิชัน} \quad 5 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$$

$$\text{บาวดารีแลเยอร์แบบเทอร์บูลแลนท์} \quad Re > 5 \times 10^6$$

หากผิวของผนังหยาบมาก บาวดารีแลเยอร์แบบลามินาร์จะเริ่มเปลี่ยนเป็นแบบทรานซิชันที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำกว่า 5×10^5 และบางครั้งบาวดารีแลเยอร์หยุดเป็นแบบลามินาร์ ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำลงถึง 10^5



ภาพประกอบ 2 แสดงการไหลตั้งฉากกับท่อกกลม (นักสิทธิ์ คุวัฒนาชัย, [14])

ในกรณีของการไหลตั้งฉากกับวัตถุรูปทรงกระบอก ในภาพประกอบ 2 นั้น จะเห็นได้ว่า วัตถุมีอิทธิพลต่อการไหลของของไหลค่อนข้างมาก ลักษณะการไหลของของไหลขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหลหรือค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งคำนวณโดยใช้เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อเป็นความยาวดังนี้ คือ

$$Re = \frac{u_{\infty} d_o}{\nu} \quad (2-5)$$

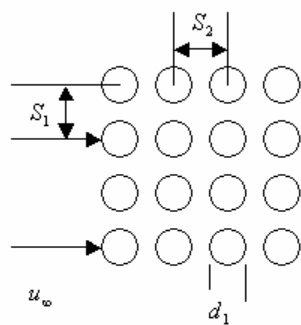
จะเห็นได้ว่า ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำมากๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 2 ก ของไหลเกาะผิวของผนังท่อโดยรอบ จุดหน้าสุดของวงกลมที่สัมผัสกับของไหลเป็นจุดที่ของไหลหยุดนิ่ง (Stagnation point) จุดที่อยู่ตรงกันข้ามกับจุดๆ นี้ ซึ่งอยู่ด้านหลังก็เป็นจุดซึ่งของไหลนิ่งเช่นเดียวกัน เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้น บาวดาเรียลเยอร์เริ่มแยกตัวออกจากผิวของท่อที่บริเวณจุดที่ของไหลหยุดนิ่งทางด้านหลัง ดังแสดงในภาพประกอบ 2 ข และแยกตัวมากขึ้นเรื่อยๆ และบริเวณที่ของไหลแยกตัวเริ่มเคลื่อนที่มาทางด้านหน้า ดังแสดงในภาพประกอบ 2 ค และ ง ในกรณีนี้การไหลที่แยกตัวออก การไหลเป็นแบบปั่นป่วน บริเวณที่ของไหลแยกตัวออกนี้ อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ทิศทางต่างๆ กันและผสมกันอย่างรุนแรง บริเวณนี้มีชื่อเรียกว่า เทอร์บูเลนต์ เวค (Turbulent wake)

บริเวณการแยกตัวจะใหญ่ขึ้นและเคลื่อนที่มาข้างหน้าเรื่อยๆ ในขณะที่เรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น บริเวณนี้จะใหญ่ที่สุดเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่า 5×10^5 และหลังจากนั้น ก็จะมีการลดขนาดลง ดังแสดงในภาพประกอบ 2 จ และ ภาพประกอบ 2 ฉ

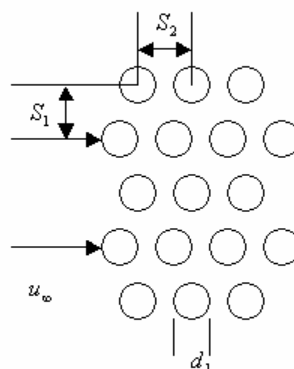
สำหรับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนนั้นได้พบว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวของท่อกับของไหลจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ มีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วงความเร็วของของไหลที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้ก็เพราะว่า เมื่อลักษณะการไหลของของไหลเป็นแบบปั่นป่วน การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจะมีค่าสูงกว่า เมื่อการไหลเป็นแบบราบเรียบ เพราะอนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ไปในทิศต่างๆ และผสมกันอย่างรุนแรง

การพาความร้อนโดยการไหลผ่านกลุ่มท่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนมากจะประกอบด้วยท่อหลายท่อวางเรียงกันเป็นกลุ่ม ซึ่งเรียกกันว่ากลุ่มท่อ การเรียงท่อจะมีอยู่สองแบบ คือ การเรียงท่อที่อยู่ในแนวเดียวกัน และการเรียงสลับ สำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในกรณีนั้นๆ จะใช้สมการที่หามาได้สำหรับท่อเดียว ไม่ได้เพราะการไหลของของไหลซึ่งมีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมากนั้น แตกต่างไปจากกรณีของการไหลผ่านท่อเดียวมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งท่อที่อยู่ในแถวหลังๆ จากการทดลองพบว่า สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนของท่อที่อยู่ในแถวท้ายๆ จะมีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนในแถวต้นๆ ทั้งนี้เพราะความปั่นป่วน (Degree of turbulence) ของของไหลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อของของไหลยิ่งไหลผ่านท่อมากแถวขึ้น และความปั่นป่วนนี้มีส่วนในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน



(ก) เรียงในแนวเดียวกัน



(ข) เรียงสลับ

ภาพประกอบ 3 แสดงการเรียงท่อแบบแนวเดียว และการเรียงแบบสลับ

สำหรับสมการที่จะใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้น จากการทดลองได้พบว่าสมการในรูปต่อไปนี้ใช้ได้ผลคือ สมการที่เสนอโดย Grimison ซึ่งให้ไว้ใน Incropera and Dewitt [17] ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\overline{Nu} = 1.13 D Re_{\max}^P Pr^{\frac{1}{3}} \quad (2-5)$$

ค่าของ D และ P ในสมการที่ (2-5) จะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางท่อ และ เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (s_1, s_2 และ d) ซึ่งแสดงไว้ในภาพประกอบ 3 ค่าของ D และ P ให้ไว้ในตาราง 1 โดยที่

$\overline{Nu}$	คือค่าเฉลี่ยนัสเซลน์มเบอร์
D	คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองสำหรับใช้กับสมการที่ (2-5)
P	คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองสำหรับใช้กับสมการที่ (2-5)
s_1	คือค่าระยะห่างของท่อในแนวดิ่ง, m
s_2	คือค่าระยะห่างของท่อในแนวนอน, m
d	คือค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ, m

สมการที่ (2-5) ใช้ได้ในกรณีที่กลุ่มท่อมีมากกว่า 10 แถว หากกลุ่มท่อน้อยกว่า 10 แถว ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยเฉลี่ย จะมีค่าต่ำกว่าที่ให้ในสมการที่ (2-5) หากกลุ่มท่อมี 4 แถว ค่าสัมประสิทธิ์ การพาความร้อนจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ให้ประมาณ 12 % โดยที่แถวแรกจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนเท่ากับในกรณีของท่อเดียว จากการศึกษาพบว่า ในกรณีของการเรียงสลับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะเพิ่มขึ้น จนถึงแถวที่ 5 หรือ 6 แล้วจะมีค่าคงที่

การคำนวณค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของกลุ่มท่อกับของไหล เราอาจทำได้โดยใช้สมการที่ (2-6)ซึ่งเสนอโดย Jakob and Hawkins[19] ซึ่งให้ค่าโดยประมาณ

$$\overline{Nu} = 0.33 Re_{\max}^{0.6} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (2-6)$$

ในสมการที่ (2-6) ค่าของเรย์โนลด์์นัมเบอร์คำนวณได้โดยใช้ความเร็วของของไหล ตอนที่ผ่านพื้นที่ระหว่างท่อที่มีค่าต่ำสุด (ก็คือความเร็วสูงสุด) สำหรับคุณลักษณะของของไหลนั้น หาได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างผนังท่อ และอุณหภูมิของของไหล

ตาราง 1 ค่าของ D และ P สำหรับใช้ในสมการที่ (2-5) (Ozisik,[21])

การจัดท่อ	S_2 / d	S_2 / d							
		1.25		1.50		2.0		3.0	
		P	D	P	D	P	D	P	D
เรียงในแนวเดียวกัน (Inline)	1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.0633	0.752
	1.50	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.202	0.0678	0.744
	2.00	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.1980	0.648
	3.00	0.290	0.610	0.357	0.584	0.374	0.581	0.2860	0.608
เรียงสลับ (Staggered)	0.6	-	-	-	-	-	-	0.213	0.636
	0.9	-	-	-	-	0.446	0.571	0.401	0.521
	1.0	-	-	0.497	0.558	-	-	-	-
	1.12	-	-	-	-	0.478	0.565	0.518	0.560
	5	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
	1.5	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
	2.00	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
	2.50	0.310	0.592	0.756	0.580	0.442	0.562	0.421	0.574
	3.00								

สำหรับการสูญเสียความดันเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มท่อ Ozisik ได้ให้สมการสำหรับการคำนวณไว้ดังนี้

$$\Delta P = \frac{2 f G_{\max}^2 n \left(\frac{\mu_w}{\mu} \right)^{0.14}}{\rho g} \quad (2-7)$$

โดยที่ $G_{\max}$ คือความเร็วเชิงมวลสูงสุด
 n คือจำนวนแถวของท่อในทิศทางของการเคลื่อนที่ของของไหล
 g มีค่า $1 \text{ kgm} / \text{Ns}^2$
 μ_w คือความหนืดที่คำนวณที่อุณหภูมิของผิวของผนัง

สำหรับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในกรณีนี้ Jakob ได้ให้สมการสำหรับการคำนวณไว้ดังนี้คือ

สำหรับกลุ่มท่อที่เรียงสลับ

$$f = \left[0.25 + \frac{0.118}{\left(\frac{S_1}{d} - 1 \right)^{1.08}} \right] \text{Re}_{\max}^{-0.16} \quad (2-8)$$

สำหรับกลุ่มท่อที่เรียงในแนวเดียวกัน

$$f = \left[0.044 + \frac{0.08 \frac{S_2}{d}}{\left(\frac{S_1}{d} - 1 \right)^{0.43 + 1.12 \frac{d}{S_2}}} \right] \text{Re}_{\max}^{-0.15} \quad (2-9)$$

การถ่ายเทความร้อนจากครีป

ปัญหาการถ่ายเทความร้อน มีสาเหตุมาจากขีดจำกัดในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และการมีพื้นที่จำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน จากสมการ $Q = hA(T_h - T_c)$ จะเห็นว่า วิธีหนึ่งที่จะเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนก็คือ การเพิ่มพื้นที่ใช้ในการระบายความร้อน และวิธีการง่าย ๆ ที่จะเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนก็คือ การติดโลหะแผ่นบางๆ เข้ากับผิวโลหะเดิมเพื่อเพิ่มพื้นที่ขึ้น แผ่นโลหะที่เพิ่มขึ้นนี้ ต้องเสียความร้อนให้กับอากาศรอบๆ จึงมีอุณหภูมิไม่เท่ากับอุณหภูมิของผิวโลหะเดิม ดังนั้นการเพิ่มพื้นที่ขึ้น 10 เท่าจึงไม่จำเป็นว่าการถ่ายเทความร้อนจะต้องเพิ่มขึ้น 10 เท่า ด้วยความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของพื้นที่ดังกล่าว

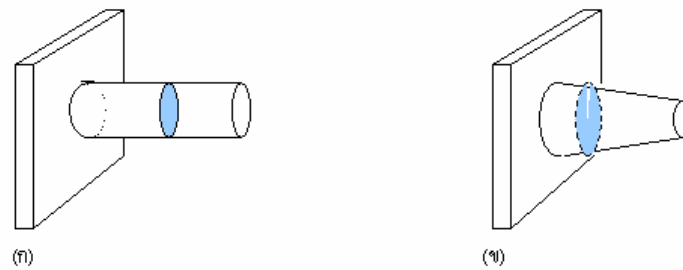
ชนิดของครีป

มีวิธีการจำแนกครีปอยู่สองวิธีคือ จำแนกโดยลักษณะของรูปตัดของครีป และจำแนกตามรูปร่างของครีป

ครีปแบ่งออกตามลักษณะรูปตัดดังนี้

1. ครีปที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอ (Fin of uniform cross section) ดังแสดงในภาพประกอบ 4 (ก)
2. ครีปที่มีหน้าตัดไม่สม่ำเสมอ (Fin of nonuniform cross section) ดังแสดงในภาพประกอบ 4 (ข)

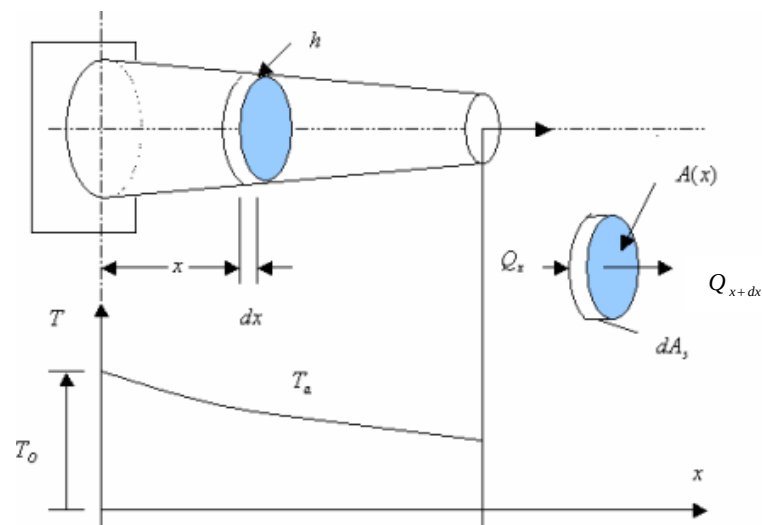
ประกอบ 4 (ข)



ภาพประกอบ 4 ครีปที่แบ่งตามลักษณะหน้าตัด

สมการของครีปที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ

สมการของครีปเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งได้จากการพิจารณาความสมดุลของความร้อนบนส่วนหนึ่งของครีป พิจารณาการเคลื่อนที่ของความร้อน โดยการนำความร้อนเข้าและออกจากส่วนของครีปซึ่งมีความยาว dx ดังแสดงในภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ครีปที่มีหน้าตัดไม่สม่ำเสมอ และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับความยาวครีป

พิจารณาการเคลื่อนที่ของความร้อน โดยการนำความร้อนเข้าและออกจากส่วนของครีปซึ่งมีความยาว dx ดังแสดงในภาพประกอบ 5

จากสมการของฟูริเยร์ สมการการนำความร้อนเขียนได้ดังนี้

$$Q = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right)$$

อัตราการนำความร้อนเข้ามายังส่วนของครีปที่มีความยาว dx

$$Q_x = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right)$$

อัตราการนำความร้อนออกจากส่วนของครีปที่มีความยาว dx

$$\begin{aligned} Q_{x+dx} &= Q_x + \left(\frac{dQ_x}{dx} \right) dx \\ &= -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) - k \frac{d}{dx} \left(\frac{AdT}{dx} \right) dx \end{aligned}$$

(พื้นที่หน้าตัด A เปลี่ยนแปลงกับระยะทาง x ในกรณีนี้) อัตราการนำความร้อน
ผลลัพธ์ เข้าส่วนของครีปที่มีความยาว dx

$$\begin{aligned} Q_{cond} &= Q_x - Q_{x+dx} \\ &= k \frac{d}{dx} \left(\frac{AdT}{dx} \right) dx \\ &= \left[kA \left(\frac{d^2 T}{dx^2} \right) + k \left(\frac{dA}{dx} \right) \left(\frac{dT}{dx} \right) \right] dx \end{aligned}$$

อัตราการพาความร้อนจากส่วนของครีปซึ่งมีความยาว dx

$$Q_{conv} = h dA_s (T - T_a)$$

อัตราในการสะสมความร้อนในส่วนของครีปซึ่งมีความยาว dx

$$Q_s = Adx \rho C_p \left(\frac{dT}{dt} \right)$$

จากการสมดุลของพลังงาน ความร้อนที่เคลื่อนที่เข้ามาสู่ส่วนของครีบบที่มีความยาว dx โดยการนำ จะเท่ากับอัตราการพาความร้อนออกจากครีบบ รวมกับอัตราการสะสมความร้อน ดังนั้น

$$\left[kA \left(\frac{d^2 T}{dx^2} \right) + k \left(\frac{dA}{dx} \right) \left(\frac{dT}{dx} \right) \right] dx = h dA_s (T - T_s) + A dx \rho C_p \left(\frac{dT}{dt} \right)$$

หรืออาจเขียนได้ดังนี้

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{1}{A} \left(\frac{dA}{dx} \right) \left(\frac{dT}{dx} \right) - \frac{h}{kA} \left(\frac{dA_s}{dx} \right) (T - T_o) - \frac{\rho C_p}{k} \left(\frac{dT}{dt} \right) = 0 \quad (2-10)$$

สมการนี้ เป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียล ที่ใช้ได้กับครีบบที่มีพื้นที่หน้าตัดใด ๆ ก็ได้

ประสิทธิภาพของครีบบ (Fin efficiency)

ประสิทธิภาพของครีบบ คืออัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนจากครีบบจริง และจากครีบบประสิทธิภาพ 100% คือ ครีบบที่มีอุณหภูมิเท่ากับโลหะเดิมทุกประการ

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากครีบบที่มีประสิทธิภาพ 100% เขียนได้ดังนี้

$$Q = Plh(T_o - T_a) \quad (2-11)$$

$$= Plh\theta_o$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากครีบบจริง เขียนได้จากสมการ

$$Q_o = mkA\theta_o \tanh(ml) \quad (2-12)$$

เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพของครีบบเขียนได้ดังนี้

$$\eta_F = \frac{mkA\theta_o \tanh(ml)}{Plh\theta_o}$$

$$\text{แต่ } m^2 = hP / kA$$

ดังนั้น เราจะได้ว่า

$$\eta_F = \frac{\tanh(ml)}{ml} \quad (2-13)$$

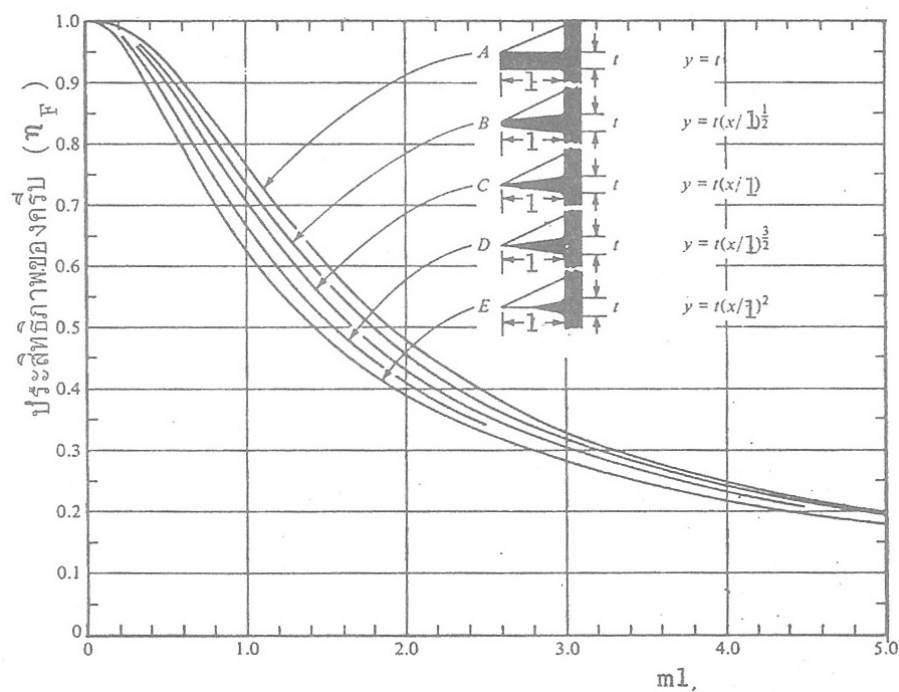
Q คืออัตราการถ่ายเทความร้อนจากครีปที่มีประสิทธิภาพ 100%, W

Q_o คืออัตราการถ่ายเทความร้อนจากครีปจริง, W

P คือความยาวรอบพื้นที่หน้าตัด (A), m

l คือความยาวของครีป, m

สำหรับการหาประสิทธิภาพของครีปแท่งทรงต่างๆ นั้น การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพยุ่งยากมาก ได้มีการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของครีปแบบต่างๆ แล้วเสนอการวิเคราะห์ ในรูปของกราฟเพื่อความสะดวกในการใช้



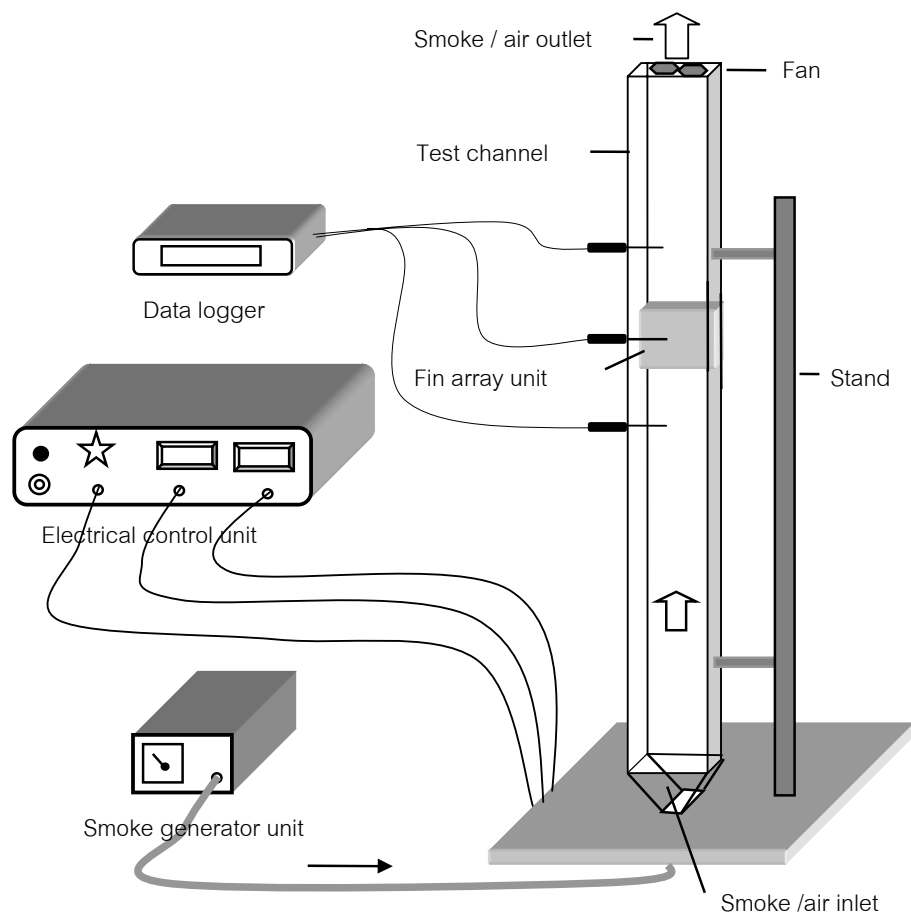
ภาพประกอบ 6 ประสิทธิภาพของครีปตรง

นอกจากครีปกลมแล้วสำหรับครีปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และครีปสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้นอาจหาประสิทธิภาพ โดยการแปลงครีปเหล่านี้ให้เป็นครีปกลมที่มีพื้นที่เท่ากัน

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการทดลองจะใช้ชุดครีบทดสอบจำนวน 2 ชุด มีลักษณะการวางครีบบนแนวเดียวกัน (In-line) และแบบสลับแนว (Staggered) วางอยู่ในช่องอุโมงค์ลมในแนวดิ่ง ซึ่งจะใช้อากาศเป็นสารทำงาน (Working air) โดยที่สามารถเปลี่ยนความเร็วของอากาศในช่องอุโมงค์ลม ในการควบคุมอัตราความร้อนของครีบจะใช้ฮีตเตอร์ที่ประกอบอยู่ด้านหลังของครีบเป็นตัวควบคุมให้ได้อัตราความร้อนตามต้องการ



ภาพประกอบ 7 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ในการทดลอง

จากภาพประกอบ 7 ประกอบด้วยชุดทดลองและอุปกรณ์ต่างๆดังต่อไปนี้

1. ชุดควบคุมระบบไฟฟ้าในการให้อัตราความร้อน
2. ชุดอุณหภูมิแบบปรับการไหลของอากาศได้
3. ชุดควบคุมฮีตเตอร์ให้อัตราความร้อนครับ
4. ชุดเครื่องวัดอุณหภูมิ
5. ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศ
6. ชุดครีบทดสอบแบบเรียงในแนวเดียวกัน (In-line) และเรียงสลับแนว (Staggered)
7. ชุดกำเนิดควัน (Smoke generator)
8. กล้องดิจิตอล (Digital camera)



ภาพประกอบ 8 แสดงอุปกรณ์ในขณะทำการทดลอง



ภาพประกอบ 9 แสดงการประกอบชุดครีปเข้ากับอุโมงค์ลม



ภาพประกอบ 10 ชุดครีปแบบเรียงแถว และสลับแถวที่บรรจุในชุดให้ความร้อน



ภาพประกอบ 11 ชุดกำเนิดคลื่น



ภาพประกอบ 12 ชุดเครื่องมือวัดความเร็วของอากาศ

ชุดทดลองได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนปรับ-ควบคุม ประกอบด้วยชุดปรับพลัซความร้อน (Heat flux) ความเร็วลม และชุดวัดอุณหภูมิความร้อนเป็นระบบดิจิทัลโดยบรรจุรวมไว้ในตู้คอลโทล ส่วนที่สองซึ่งแยกออกมาจะเป็นส่วนของอุโมงค์ลมประกอบไปด้วย อุโมงค์ลม ครัวที่บรรจุในชุดให้ความร้อน (Heater) และพัดลมดูดอากาศ โดยคุณสมบัติต่างๆของครัวแสดงในตาราง 2 ในส่วนของอุโมงค์ลมเป็นกล่องขนาด 0.07 m x 0.12 m x 1.02 m ด้านหน้าส่วนที่ติดตั้งครัวเป็นอิลลิคไลเพื่อสังเกตและบันทึกภาพประพจน์การไหลของอากาศ ส่วนที่สามเป็นชุดกำเนิดควัน (Smoke generator) โดยชุดทดลองพร้อมอุปกรณ์แสดงในภาพประกอบ 11

ตาราง 2 แสดงคุณสมบัติและขนาดต่างๆของครัวที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะ ครัว	วัสดุครัว	ขนาดครัว $\phi D - \phi d - L$ (mm.)	ขนาดฐานครัว กว้าง-ยาว-หนา (mm.)	จำนวน ครัว (อัน)	พ.ท.รับ ความร้อน (m^2)	พ.ท.ผิวถ่ายเท ความร้อน (m^2)
เรียงแถว	อลูมิเนียม	13 – 7.24 – 67	110 – 100 – 15	16	0.01	0.044
สลับแถว	อลูมิเนียม	13 – 7.24 – 67	110 – 100 – 15	17	0.01	0.046

ตาราง 3 แสดงค่าความแม่นยำ และค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของอุปกรณ์	ค่าความแม่นยำ	ค่าความคลาดเคลื่อน
ชุดเครื่องมือวัดความเร็วของอากาศ	0.2 %	± 0.01
ชุดเครื่องมือวัดความร้อน(ชนิด T), ชุดแสดงผล	0.1 %	± 0.10

วิธีการทดลอง

การเก็บข้อมูลจากการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ประกอบชุดครัวที่ต้องการทดสอบ
2. เปิดและปรับชุดควบคุมฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของครัวให้คงที่เพื่อเก็บข้อมูล
3. เปิดและปรับมอเตอร์ของอุโมงค์ลมเพื่อควบคุมอัตราการไหลให้ได้ตามต้องการ
4. เมื่อปรับความร้อนเข้าของครัว และอัตราไหลของอากาศ (Flow rate) ได้ตามต้องการ

ให้ระบบทำงานจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) จึงเก็บข้อมูลตามที่ต้องการ

5. ตรวจสอบความเร็วของอากาศอีกครั้ง
6. ทำการปล่อยควันให้ไหลไปกับอากาศเพื่อบันทึกภาพการไหลของอากาศที่ผ่านครีป
7. ทำตามข้อที่ 1-6 โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของครีป, อัตราการไหล และลักษณะของครีปทดสอบแบบเรียงแถว (In-line) และแบบสลับแถว (Staggered) เก็บข้อมูลตามที่ต้องการพร้อมบันทึกภาพการไหลของอากาศ

เนื่องจากชุดครีปทดลองเป็นแบบสมมาตร (Symmetry) ทั้งสองแบบ จึงทำการทดลองและศึกษาด้านซ้ายของชุดครีปเพียงครึ่งเดียว โดยทำการวัดอุณหภูมิของผิวครีป และอุณหภูมิของอากาศแต่ละจุดและนำมาหาค่าเฉลี่ย การวัดอุณหภูมิของผิวครีปแบ่งออกเป็น 4 ระดับ คือ ในระดับบริเวณฐานของชุดครีป (T_0), ส่วนล่าง (T_1), กลาง (T_2), และปลายของครีป (T_3) โดยวัดบริเวณผิวของฐานครีปตามจุดต่างๆ ในกรณีที่ครีปไม่อยู่ในแนวศูนย์กลางต้องทำการวัดที่ผิวครีปทั้งด้านบน-ตัวล่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย และนำมาหาค่าเฉลี่ยผิวรวม และบันทึกผลในรูปแบบของตาราง

ในส่วนอุณหภูมิของอากาศแบ่งการวัดเป็น 3 ระดับ คือในแนวระดับของส่วนล่าง, กลาง, และปลายครีป อากาศในอุโมงค์ลมทำการวัดอุณหภูมิทั้งขาเข้าและขาออก โดยขาออก การวัดแบ่งเป็น 3 จุดตามระดับการไหลเช่นกันคือที่แนวระนาบ T_1 , T_2 , T_3 ซึ่งอยู่ในระดับความสูงของครีป 6, 35, 62 mm. ตามลำดับ ห้องปฏิบัติการส่งถ่ายความร้อนมีอุณหภูมิห้องประมาณ 25°C เป็นอุณหภูมิที่สะดวกในการทดลองแบบต่อเนื่อง การบันทึกภาพลักษณะการไหลของอากาศผ่านครีปทำโดยการปล่อยกลุ่มควันผสมกับอากาศเพื่อเป็นการสนับสนุนผลการทดลอง และนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับการศึกษาโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์

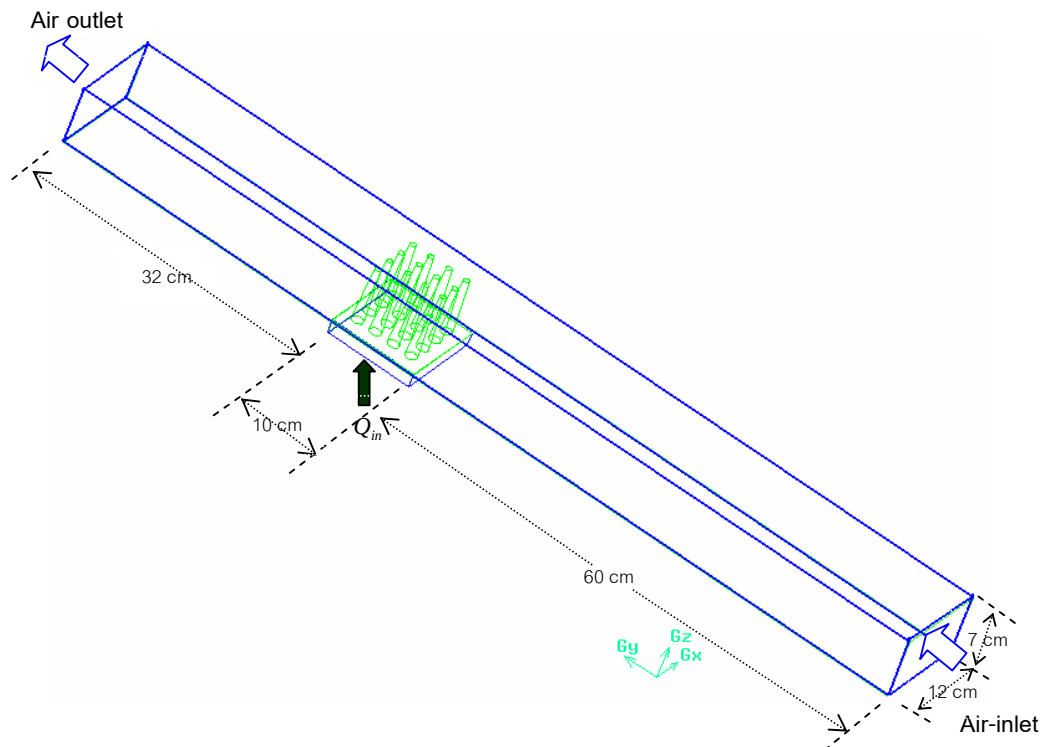
ตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

จัดตัวแปรที่จะทำการศึกษาวัดออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มตัวแปรที่กำหนดให้เปลี่ยนแปลง (ตัวแปรอิสระ) ได้แก่
 - ค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ที่ให้กับครีปแท่งทรงกระบอกที่มีปลายค่อยๆ เล็กลง
 - อัตราการไหลของอากาศ (Flow rate) ที่ผ่านครีป
 - ลักษณะการจัดเรียงตัวของครีป
2. กลุ่มตัวแปรตามที่ต้องการวัดค่า (ตัวแปรตาม) ได้แก่
 - อุณหภูมิของครีปแท่งทรงกระบอกที่มีปลายค่อยๆ เล็กลง
 - อุณหภูมิของอากาศที่ผ่านครีป
 - ลักษณะและอัตราการไหลของอากาศ (Flow rate) ที่ผ่านครีป

ตาราง 4 แสดงเงื่อนไขในการทดลองของครีบลักษณะแบบเรียงแถว และแบบสลับแถว

ลักษณะการ จัดเรียงครีบล	อัตราความ ร้อน (kW/m ²)	ความเร็ว ของอากาศ (m/s)	อัตรา ความร้อน (kW/m ²)	ความเร็ว ของอากาศ (m/s)
แบบเรียงแถว และ แบบสลับแถว	0.91	0.28	1.82	0.28
		0.56		0.56
		0.83		0.83
		1.11		1.11
		1.39		1.39
		1.67		1.67
	2.73	0.28	3.64	0.28
		0.56		0.56
		0.83		0.83
		1.11		1.11
		1.39		1.39
		1.67		1.67



ภาพประกอบ 13 แสดงไดอะแกรม และขนาดของชุดทดลองในส่วนของอุโมงค์ลม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนของการคำนวณได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการอนุรักษ์มวล สมการเวียร์สโตก (Navier stroke equation) แบบของไหลอัดตัวไม่ได้ สมการพลังงาน และพลังงานจลน์ของการปั่นป่วนแบบ Low Reynolds number ในการวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ซึ่งมีระบบคำนวณสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 13

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนของอุโมงค์ลม

- ทางเข้า ความเร็วของอากาศสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดทางเข้าที่ u_∞ กำหนดตามผลการทดลอง อุณหภูมิอากาศทางเข้า (T_{in}) = อุณหภูมิห้อง ($T_R = 25.12^\circ\text{C}$)
- ทางออก ความดันของอากาศที่ทางออก (P_{out}) = ความดันบรรยากาศ (P_{amb})

- ผนัง ไม่มีความร้อนเข้าและออกจากระบบ (Adiabatic surface)
- ไม่มีการลื่นไถลระหว่างอากาศกับผนัง (No slip condition)

ในส่วนของครีป

- ไม่มีการสูญเสียความร้อนในส่วนของการนำความร้อนเข้าระบบ
- กำหนดฟลักซ์ความร้อนคงที่ ที่ q กำหนดตามผลการทดลอง
- ไม่มีการลื่นไถลระหว่างอากาศกับผิวครีป (No slip condition)

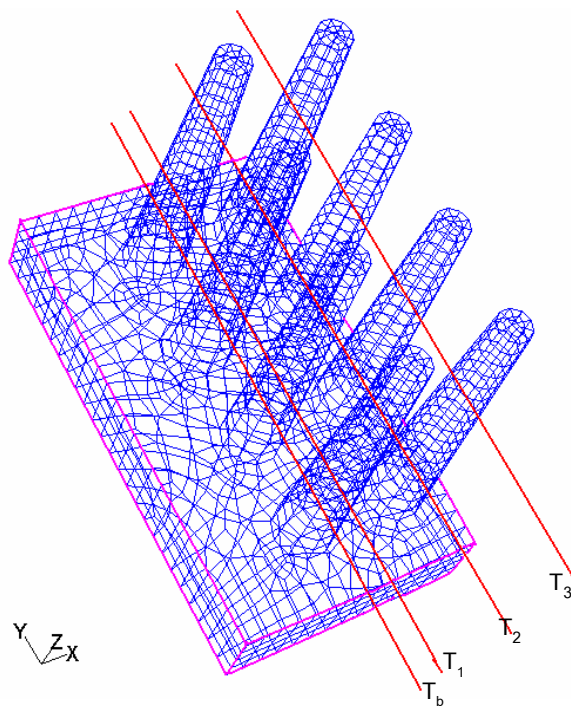
ขั้นตอนการคำนวณ

1. กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และค่าเริ่มต้นในการคำนวณโดยให้ค่าเท่ากับการทดลอง
2. กำหนดเงื่อนไขในการคำนวณ เป็นอุณหภูมิและการไหลของอากาศ อัตราความร้อน (Heat flux) โดยให้มีการไหลของอากาศเป็นแบบปั่นป่วน รวมทั้งการถ่ายเทความร้อน
3. คำนวณสมการโมเมนตัมเพื่อทำการหาความเร็ว
4. คำนวณสมการพลังงานเพื่อหาพลังงานรวมจำเพาะ
5. คำนวณค่าพลังงานจลน์ของการปั่นป่วน และอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของการปั่นป่วน โดยใช้แบบจำลอง $k-\varepsilon$ model
6. ในกรณีค่าความถูกต้องของคำตอบไม่เป็นที่ยอมรับให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 3-5 ใหม่ผลการคำนวณที่ผู้เข้าหาคำตอบกระทั่งค่าที่ได้จากการคำนวณถูกต้องยอมรับได้ตามค่าที่กำหนด จึงทำการหยุดการคำนวณและแสดงผล (Convergence)

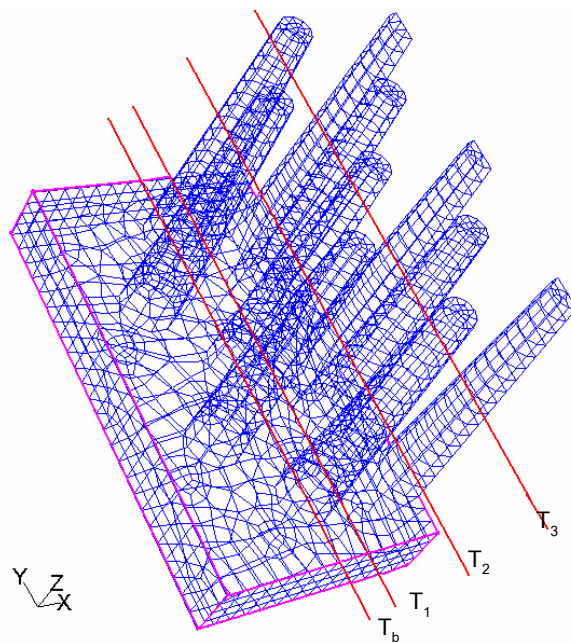
การหาผลเฉลยของสมการควบคุม (Governing equation) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งคู่ควบกันอยู่ ได้ใช้หลักวิธีพื้นฐานของปริมาตรควบคุม ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยแบ่งขอบเขตการคำนวณออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ ทำการอินทิเกรตสมการควบคุมในแต่ละปริมาตรควบคุม พร้อมทั้งจัดให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิต ทำการดิสครีตสมการควบคุม ซึ่งอยู่ในรูปอินทิกรัล และทำการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของปริมาตรต่างๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยหนึ่งๆ กับปริมาตรต่างๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยข้างเคียงให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น จากนั้นจึงทำการแก้สมการ เพื่อหาผลเฉลยต่อไป ซึ่งระเบียบวิธีดังกล่าวเรียกว่าวิธีการคำนวณแบบปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) เป็นการประยุกต์กระบวนการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics) การจำลองการไหลของอากาศภายในอุโมงค์ลม ด้วยโปรแกรม FLUENT 6.0 โดยการวิเคราะห์ผลเพื่อหาคำตอบจากสมการ $k-\varepsilon$ model ด้วยการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้น ในส่วนของกรณีวิเคราะห์เป็นการวิเคราะห์ของไหลที่ไหลภายในอุโมงค์ลม ซึ่งถูกกำหนดให้วางในแนวตั้งกำหนดให้อุณหภูมิที่ผนัง

ด้านนอกของอุโมงค์ลม (T_{wall}) มีค่าคงที่ตลอดช่วงการทดสอบ ส่วนอากาศที่ทางเข้า (T_{in}) และอัตราการไหลของอากาศให้มีการแปรเปลี่ยนตามการทดลอง

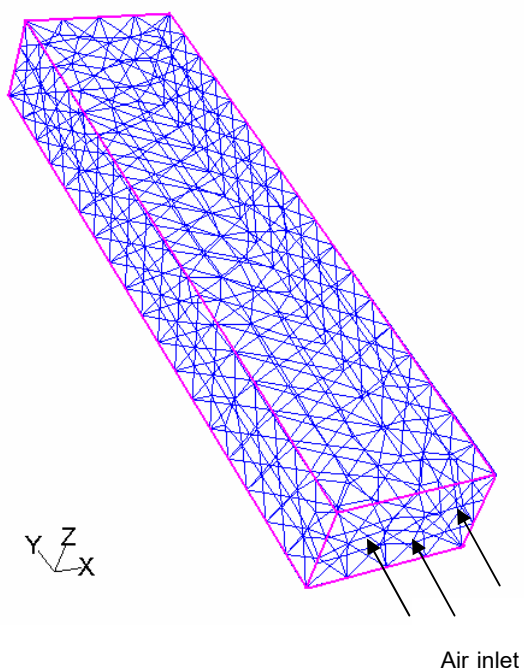
เนื่องจากครีปเป็นแบบสมมาตร (Symmetry) จึงทำการสร้างครีปในการคำนวณครึ่งหนึ่งของครีปจริงโดยสร้างเซลล์สี่เหลี่ยม (Quadrilaterals cells) ในครีปลักษณะแบบเรียงแถว (in-line) และสลับแถว (Staggered) 3.60×10^5 - 3.70×10^5 เซลล์ เพื่อความสะดวกและใช้เวลาในการคำนวณน้อยลงในส่วนของการสร้างเซลล์ของอุโมงค์ลมจะเป็นแบบสามเหลี่ยม (Triangular cells) ทั้งสองลักษณะดังแสดงในภาพประกอบ 14-16



ภาพประกอบ 14 แสดงการสร้างเซลล์ และการแบ่งระดับในการคำนวณในครีปลักษณะแบบเรียงแถว



ภาพประกอบ 15 แสดงการสร้างเซลล์ และการแบ่งระดับในการคำนวณของครีบลักษณะแบบสลับแถว



ภาพประกอบ 16 แสดงเซลล์ในอุโมงค์ลมที่ใช้ในการคำนวณ

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผล

การเปรียบเทียบผล

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ทางด้านการทดลอง ซึ่งได้มีการสร้างครีบท่อวางกรวยกลมตัดยอด 2 แบบคือ แบบเรียงแถว (In-line layout) และสลับแถว (Staggered layout) สำหรับใช้ในการทดลองเก็บข้อมูล แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการต่าง ๆ และส่วนทางด้านการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้โปรแกรมฟลูเอนท์ (FLUENT 6.0) ในการคำนวณ สำหรับผลที่ได้จากทั้งสองส่วนจะถูกบันทึกในรูปแบบของตาราง และนำผลมาแสดงในลักษณะของกราฟแสดงการเปรียบเทียบของตัวแปรต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงอยู่ในรูปตัวแปรต่างๆ ดังนี้

- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยของอากาศของอุโมงค์ทดลอง

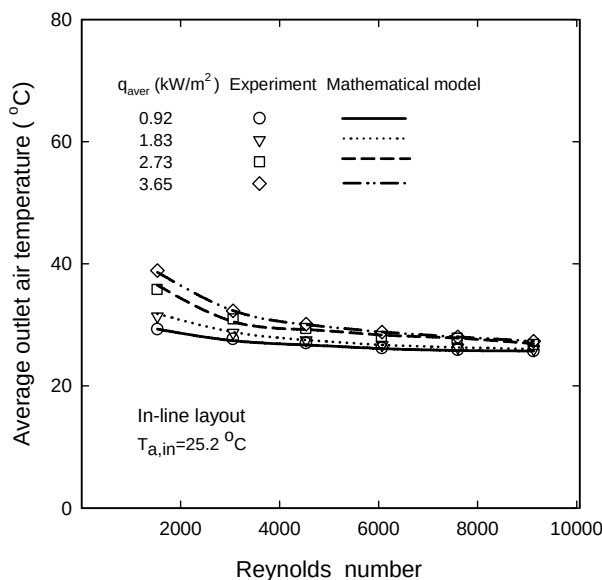
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวครีบท่อ

- แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครีบท่อ

- แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu)

- แสดงรูปแบบการไหลของอากาศที่ไหลผ่านครีบท่อ

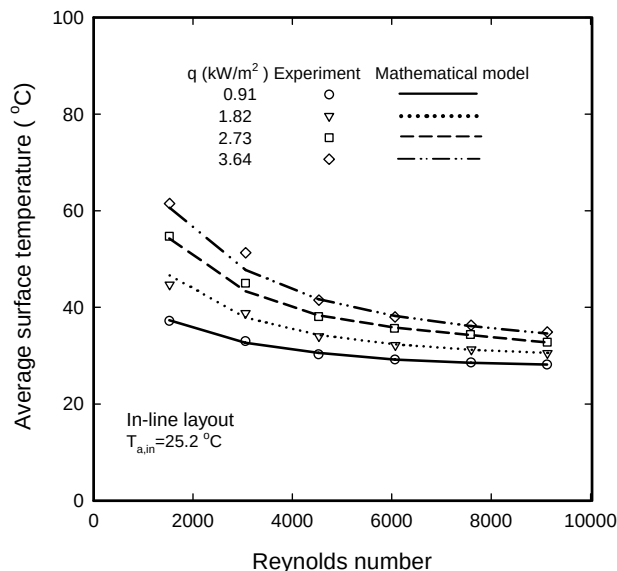
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองและการคำนวณของครีบลักษณะแบบเรียงแถว



ภาพประกอบ 17 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของอากาศเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ ในกรณีครีบลักษณะแบบเรียงแถว

ภาพประกอบ 17 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิทางออกของอากาศเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง กับผลการคำนวณของชุดทดสอบของครีบลักษณะแบบเรียงแถว ที่พลัคซ์ความร้อนต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 25.2 °C โดยอุณหภูมิของอากาศที่ทางออกวัดจากการทดลองทั้งหมด 3 จุด

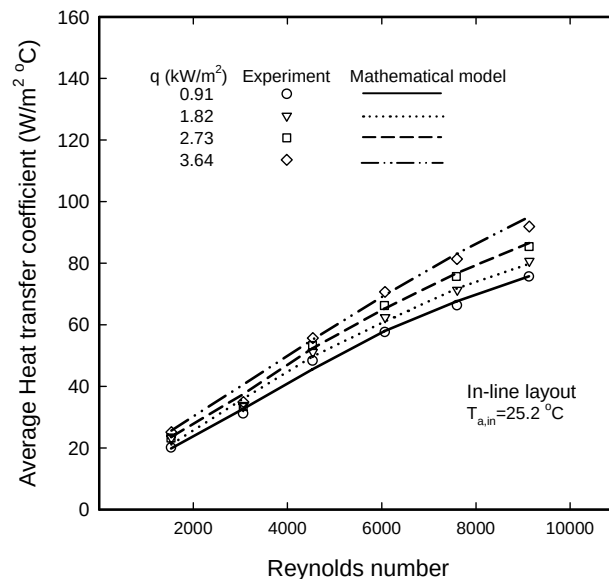
จากการพบว่าเมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์สูงขึ้นอุณหภูมิทางออกของอากาศมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ก็เนื่องจากว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลของอากาศสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนมีน้อยกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ ดังนั้นอุณหภูมิทางออกของอากาศจึงมีแนวโน้มลดลง และที่อัตราการไหลของอากาศสูงๆ อัตราการลดลงของอุณหภูมิจะมีแนวโน้มลดลง และเมื่ออัตราการไหลของอากาศคงที่พบว่าอุณหภูมิทางออกของอากาศมีค่าสูงขึ้นเมื่อพลัคซ์ความร้อนที่มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถ่ายเทให้กับอากาศแปรตามพลัคซ์ความร้อนที่ให้กับระบบ แต่อย่างไรก็ตามผลของความร้อนที่มีความเด่นชัดในช่วงอัตราการไหลของอากาศต่ำๆ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง และผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีความสอดคล้องกันดี โดยให้ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 0.02 เปอร์เซ็นต์



ภาพประกอบ 18 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของครีบกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์
ในกรณีครีบริยงตัวแบบเรียงแถว

ภาพประกอบ 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวครีบกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่างกัน โดยอุณหภูมิผิวครีปได้จากการวัดอุณหภูมิของส่วนที่เป็นฐาน 5 จุดและอุณหภูมิในส่วนที่เป็นครีป 12 จุด ในแต่ละความเร็วของอากาศ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข) ซึ่งอุณหภูมิของครีปวัดทั้งบริเวณด้านหน้าครีปและหลังครีป

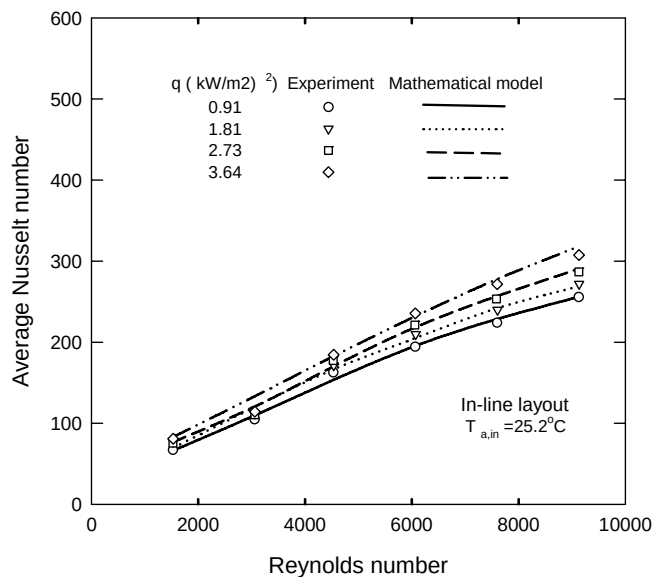
จากกราฟพบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น อุณหภูมิของผิวครีปลดลง ทั้งนี้ก็เพราะว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวครีปให้กับอากาศขึ้นอยู่กับอัตราการระบายความร้อน (Cooling capacity) ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวครีปจึงมีแนวโน้มลดลงดังแสดงในกราฟ เมื่อให้อัตราการไหลของอากาศคงที่ พบว่าอุณหภูมิของผิวครีปแปรตามความร้อนที่ให้ ซึ่งจะเห็นว่าที่ค่าอัตราการไหลของอากาศต่ำๆ ความต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กันจะมีค่ามากแตกต่างกัน ลดลงเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีความสอดคล้องกันดี โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 0.03 เปอร์เซ็นต์



ภาพประกอบ 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ ในกรณีครีปเรียงตัวแบบเรียงแถว

ภาพประกอบ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของอากาศที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กัน

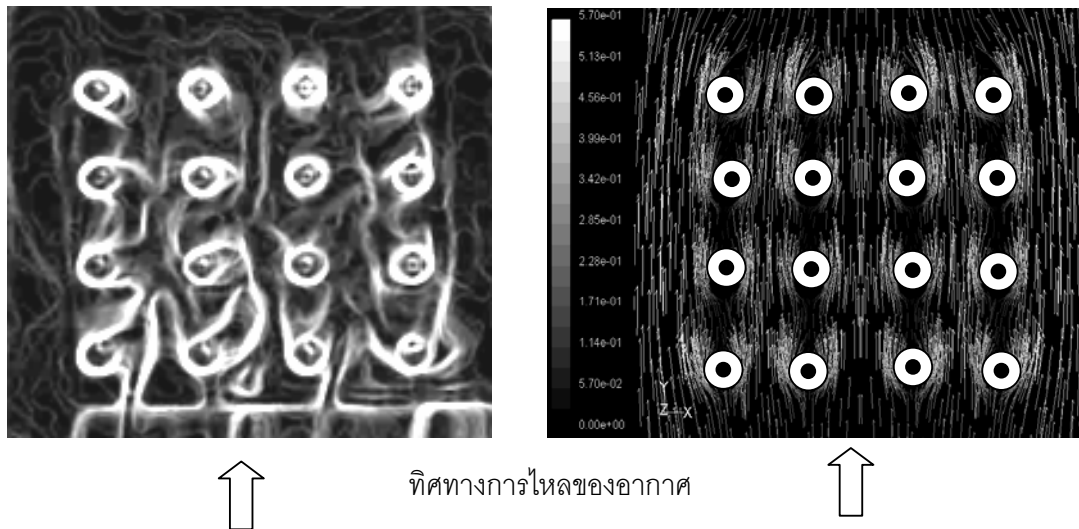
จากกราฟพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแปรตามความสามารถในการระบายความร้อนของอากาศ และเมื่ออัตราการไหลของอากาศคงที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นตามความร้อนที่ให้ และในขณะที่อัตราการไหลของอากาศมีค่าต่ำ ความต่างของค่าสัมประสิทธิ์ที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กันมีค่าน้อย และค่าความต่างจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น โดยที่ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงและที่อัตราการไหลของอากาศมากที่สุด จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุด เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลที่ได้มีความสอดคล้องกันดี โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.84 เปอร์เซ็นต์



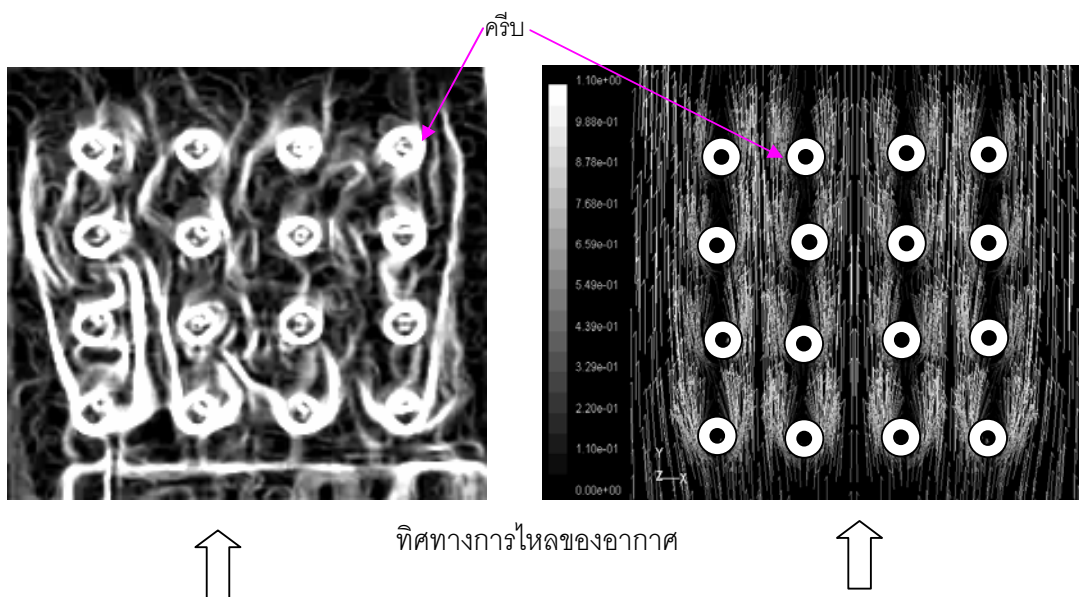
ภาพประกอบ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์
ในกรณีรีบริงตัวแบบเรียงแถว

ภาพประกอบ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์
ของอากาศที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่างกัน

จากกราฟพบว่าค่าตัวเลขนัมเบอร์มีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะว่าค่าตัวเลขนัมเบอร์แปรตามความสามารถในการระบายความร้อนของอากาศ และเมื่ออัตราการไหลของอากาศคงที่ พบว่าค่าตัวเลขนัมเบอร์เพิ่มขึ้นตามความร้อนที่ให้ และในช่วงที่อัตราการไหลของอากาศมีค่าต่ำพบว่าความต่างของค่าตัวเลขนัมเบอร์ที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่างกันมีค่าน้อยและค่าความต่างนี้จะเพิ่มมากขึ้นที่อัตราการไหลของอากาศสูงขึ้นกราฟมีลักษณะสอดคล้องกับกราฟค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในภาพประกอบ 19 เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทดลอง และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีความสอดคล้องกันดีโดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 0.85 เปอร์เซ็นต์



(a) $q = 3.64 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 1531$

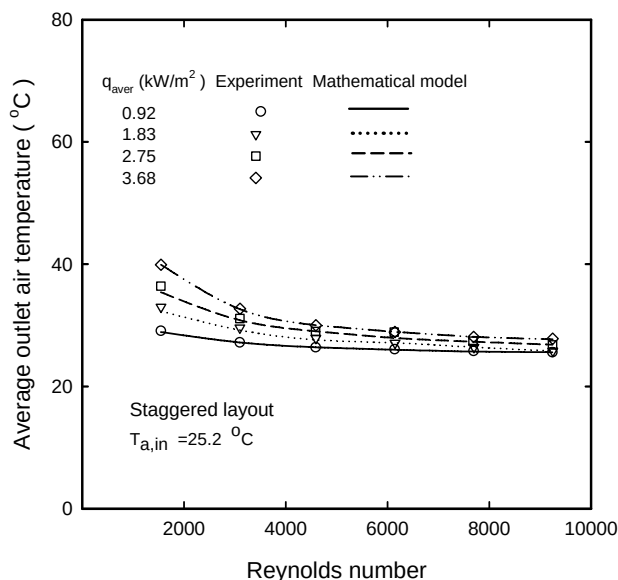


(b) $q = 3.64 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 3061$

ภาพประกอบ 21 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลของอากาศที่ได้จากการทดลอง และได้จากการคำนวณในกรณีครีปเรียงตัวแบบเรียงแถว

จากภาพประกอบ 21 แสดงให้เห็นการไหลของอากาศที่ผ่านกลุ่มครีปทั้งการทดลอง และการคำนวณที่มีความสอดคล้องกัน และจะเห็นการไหลวนของอากาศบริเวณหลังครีปในภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองเนื่องจากการถ่ายภาพตามความลึกของชุดครีป แต่ในส่วนของการคำนวณเชิงตัวเลขไม่แสดงการไหลวนของอากาศให้เห็นเด่นชัดเนื่องจากการตัดภาพที่บริเวณด้านหน้าของครีป

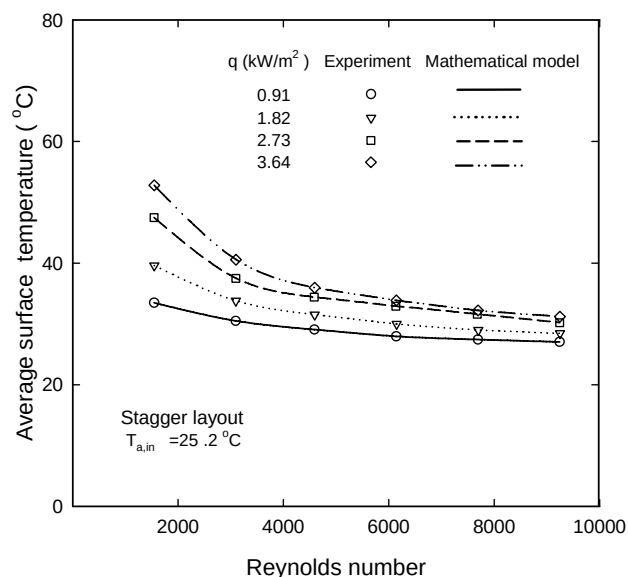
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองและการคำนวณของครีบลักษณะแบบสลับแถว



ภาพประกอบ 22 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยของอากาศกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์
ในกรณีครีปเรียงตัวแบบสลับแถว

ภาพประกอบ 22 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิขาออกของอากาศเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองกับผลการคำนวณของชุดทดสอบของครีปที่เรียงตัวแบบสลับแถว ที่พลัซความร้อนต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า 25.2 °C โดยอุณหภูมิของอากาศที่ทางออกวัดจากการทดลองทั้งหมด 3 จุด

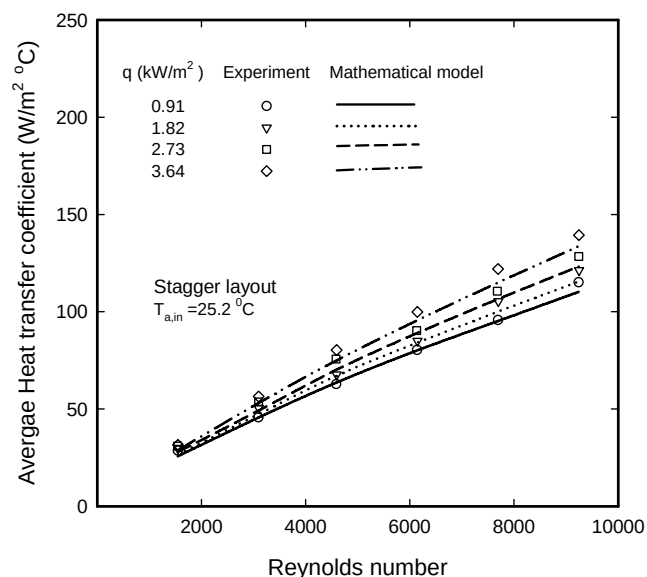
จากกราฟพบว่าเมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์สูงขึ้นอุณหภูมิขาออกของอากาศมีแนวโน้มลดลงทั้งนี้ก็เป็นจากว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลของอากาศสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนมีน้อยกว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ ดังนั้นอุณหภูมิขาออกของอากาศซึ่งมีแนวโน้มลดลง และในช่วงที่อัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น อัตราการลดลงของอุณหภูมิจะมีแนวโน้มลดลง และเมื่ออัตราการไหลของอากาศคงที่พบว่าอุณหภูมิขาออกของอากาศมีค่าสูงขึ้นเมื่อพลัซความร้อนที่ให้มีความสูงขึ้น ทั้งนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถ่ายเทให้กับอากาศแปรตามความร้อนตามพลัซความร้อนที่ให้กับระบบ อย่างไรก็ตามผลของความร้อนที่ให้ความเด่นชัดในช่วงอัตราการไหลของอากาศต่ำๆ เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่ามีความสอดคล้องกันดี โดยให้ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 0.53 เปอร์เซ็นต์



ภาพประกอบ 23 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของครีบกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์
ในกรณี ครีบเรียงตัวแบบสลับแถว

ภาพประกอบ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวครีบกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่างกัน โดยอุณหภูมิผิวครีปได้จากการวัดอุณหภูมิของส่วนที่เป็นฐาน 3 จุดและอุณหภูมิในส่วนที่เป็นครีป 18 จุดในแต่ละความเร็วของอากาศ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข) ซึ่งอุณหภูมิของครีปที่วัดทั้งบริเวณด้านหน้าครีปและหลังครีป

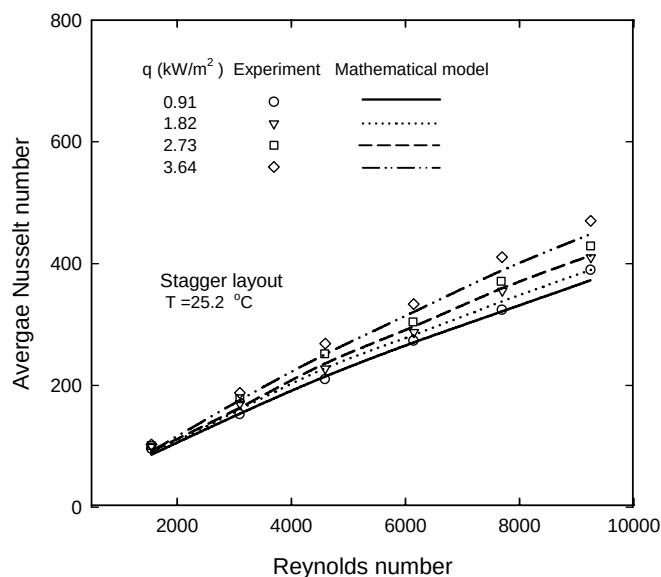
จากกราฟพบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น อุณหภูมิของผิวครีปลดลง ทั้งนี้ก็เพราะว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวครีปให้กับอากาศขึ้นอยู่กับอัตราการระบายความร้อน (Cooling capacity) ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวครีปจึงมีแนวโน้มลดลงดังแสดงในกราฟ เมื่อให้อัตราการไหลของอากาศคงที่พบว่า อุณหภูมิของผิวครีปแปรตามความร้อนที่ให้ โดยที่ค่าความต่างของค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิผิวชุดครีปที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่างกันน้อยลงโดยแปรตามอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่ามีความสอดคล้องกันดี โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 0.88 เปอร์เซ็นต์



ภาพประกอบ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ในกรณีครีปเรียงตัวแบบสลับแถว

ภาพประกอบ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของอากาศที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่างกัน

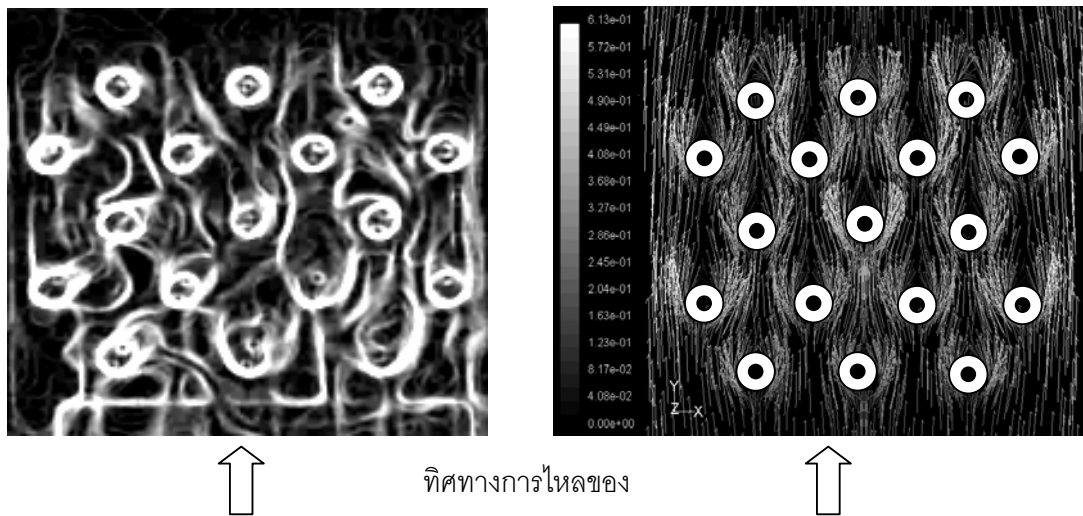
จากกราฟพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแปรตามความสามารถในการระบายความร้อนของอากาศ และเมื่ออัตราการไหลของอากาศคงที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นตามความร้อนที่ให้ และในขณะที่อัตราการไหลของอากาศมีค่าต่ำความต่างของค่าสัมประสิทธิ์ที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่าง ๆ กันมีค่าน้อย และค่าความต่างจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศ สูงขึ้น โดยที่ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงและมีอัตราการไหลของอากาศมากที่สุดจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุด เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลที่ได้มีความสอดคล้องกันดี โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 4.13 เปอร์เซ็นต์



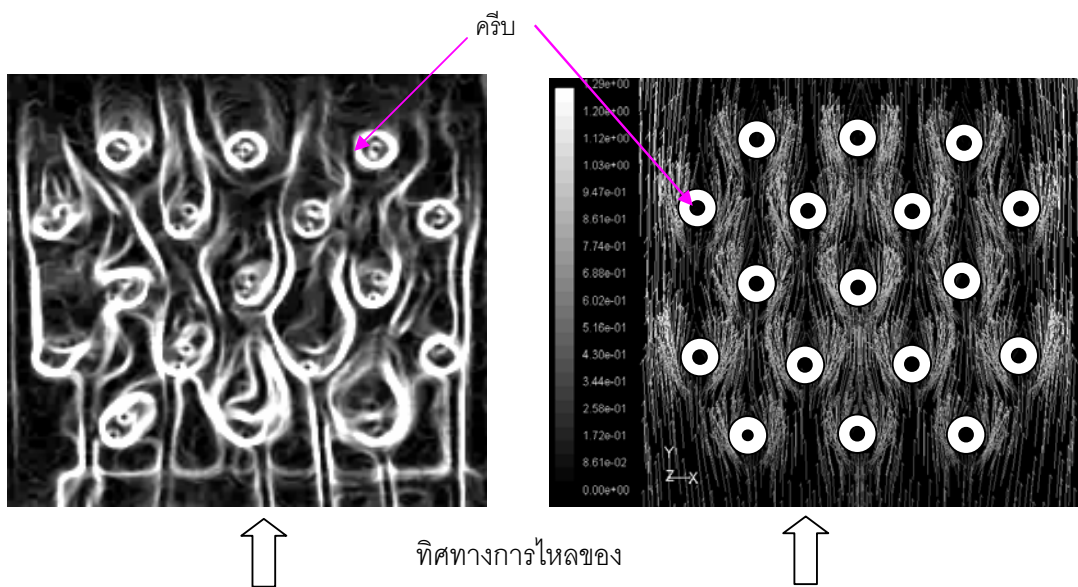
ภาพประกอบ 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์
ในกรณีกริดเรียงตัวแบบสลับแถว

ภาพประกอบ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์
ของอากาศที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กัน

จากกราฟพบว่าค่าตัวเลขนัมเบอร์มีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็
เพราะว่าค่าตัวเลขนัมเบอร์แปรตามความสามารถในการระบายความร้อนของอากาศ และเมื่ออัตรา
การไหลของอากาศคงที่พบค่าตัวเลขนัมเบอร์เพิ่มขึ้นตามความร้อนที่ให้ และในขณะที่อัตราการไหล
ของอากาศมีค่าต่ำพบว่า ความต่างของค่าตัวเลขนัมเบอร์ที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กันมีค่าน้อย แล
ค่าความต่างนี้จะค่อยๆ เพิ่มมากขึ้นที่อัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น กราฟมีลักษณะสอดคล้องกับ
กราฟค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในภาพประกอบ 24 เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองและ
จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่ามีความสอดคล้องกันดี โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย
ประมาณ 4.10 เปอร์เซ็นต์



(a) $q = 3.64 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 1550$



(b) $q = 3.64 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 3100$

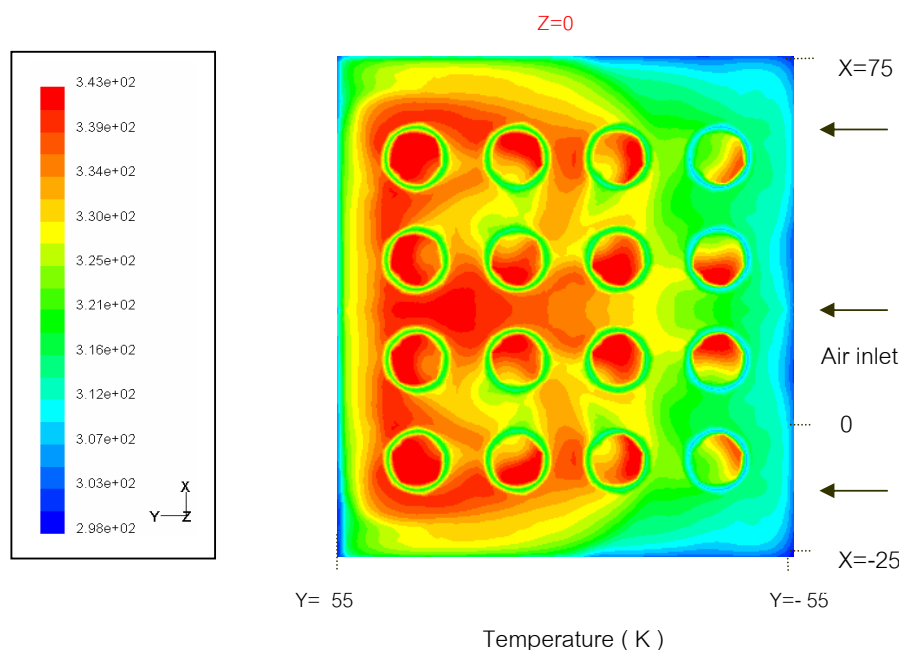
ภาพประกอบ 26 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลของอากาศที่ได้จากการทดลอง และได้จากการคำนวณในกรณีครีปเรียงตัวแบบสลับแถว

จากภาพประกอบ 26 แสดงให้เห็นการไหลของอากาศที่ผ่านกลุ่มครีปทั้งการทดลอง และการคำนวณที่มีความสอดคล้องกัน และจะเห็นการไหลวนของอากาศบริเวณหลังครีปในภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองเนื่องจากการถ่ายภาพตามความลึกของชุดครีป แต่ในส่วนของการคำนวณเชิงตัวเลขมีการไหลวนของอากาศแต่ไม่เด่นชัดเท่ากับผลการทดลองเนื่องจากการตัดภาพที่บริเวณด้านหน้าของชุดครีป

การศึกษาเชิงพารามิเตอร์ของครีบลักษณะแบบเรียงแถว (In-line layout)

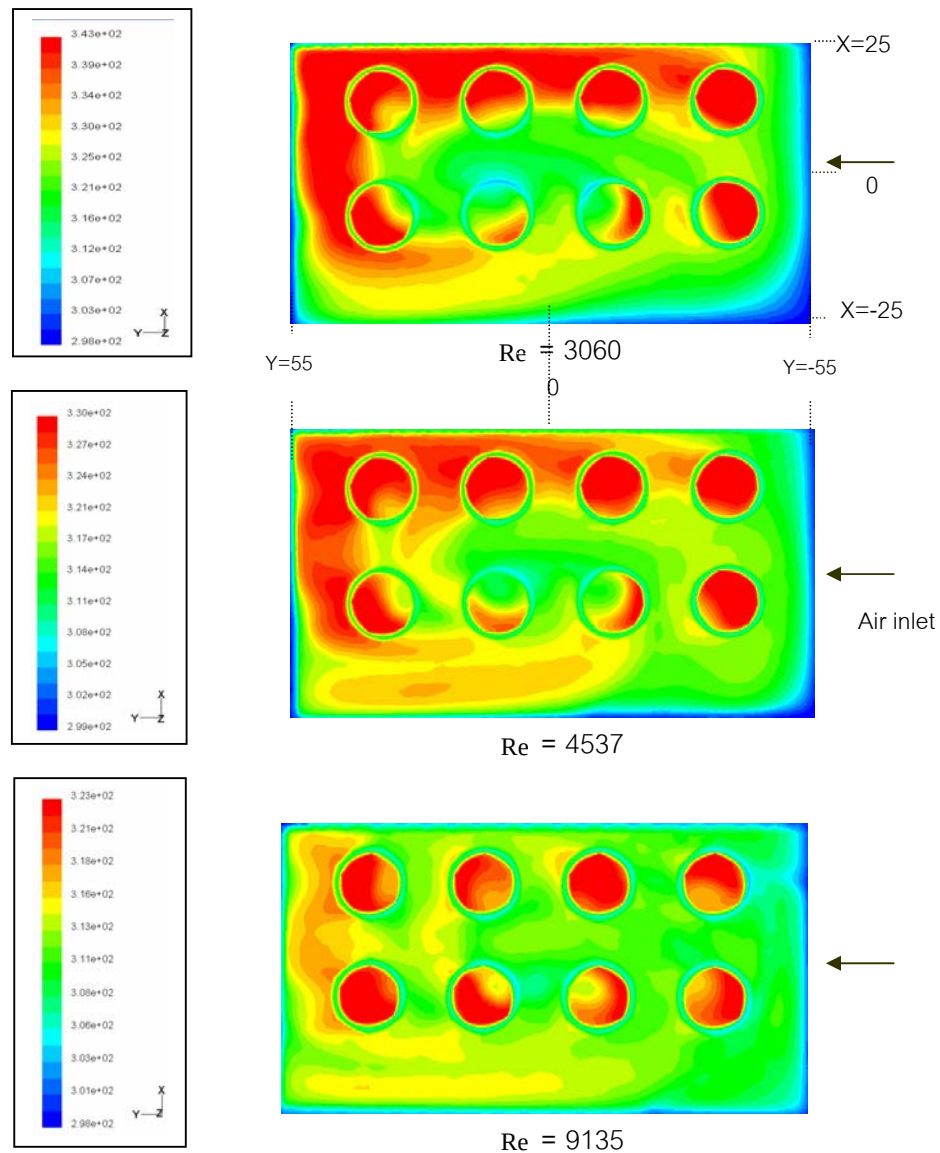
การถ่ายเทความร้อนแบบแบบบังคับ (Force convection)

การนำเสนอการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาของอากาศแบบบังคับโดยการคำนวณของโปรแกรม (CFD) ทำให้ทราบลักษณะการไหลของอากาศ การแพร่กระจายของความร้อน (Diffusions) ของครีบบนแบบเรียงแถว ดังแสดงให้ทราบในภาพประกอบ 27-31 และได้ทำการวัดอุณหภูมิของผิวครีบลูกของอากาศ อุณหภูมิอากาศขาออก เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ยรวม และนำไปหาค่าตัวแปรต่างๆ



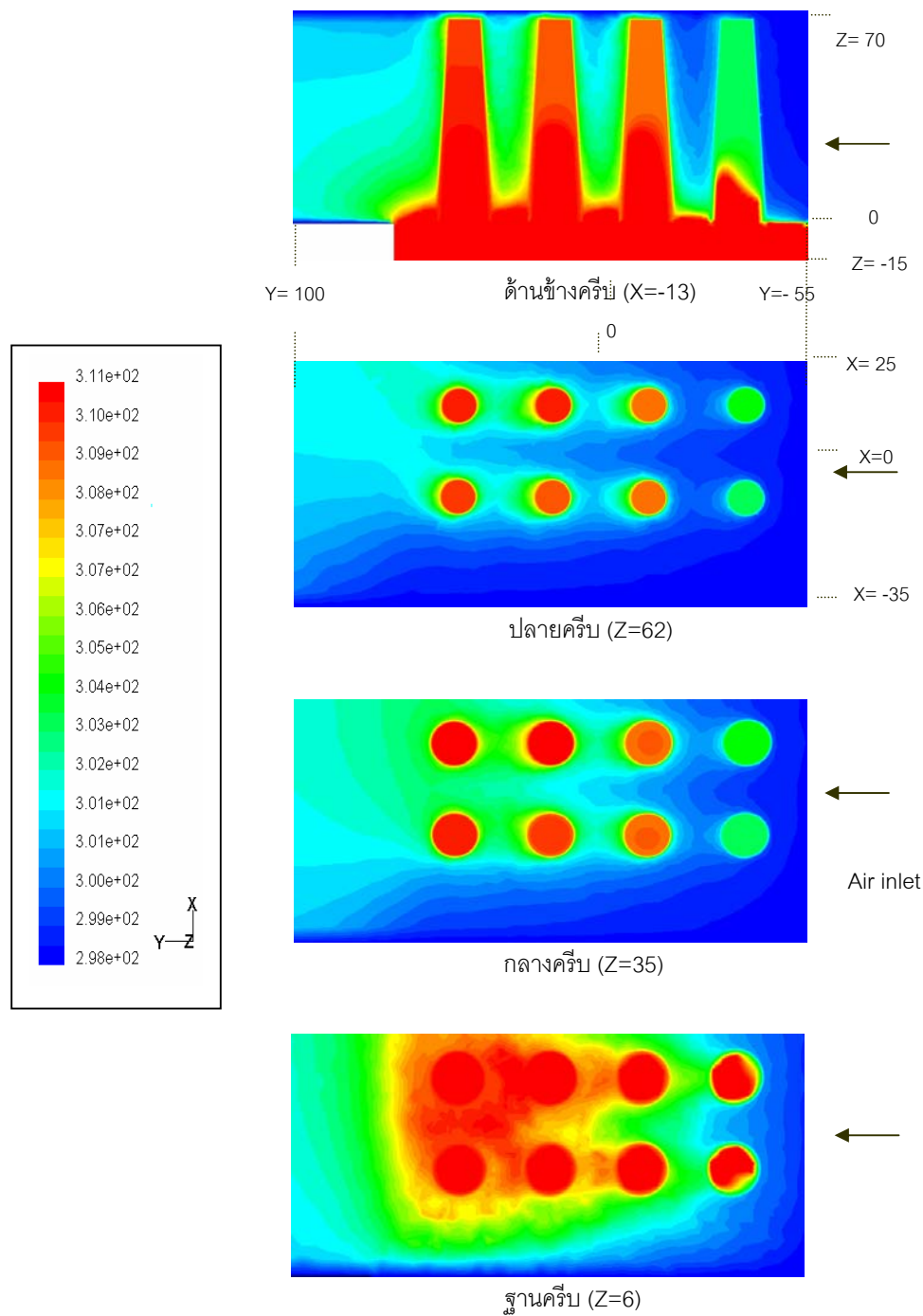
ภาพประกอบ 27 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ฐานครีบลูกที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 1531$

จากภาพประกอบ 27 เป็นภาพพื้นที่หน้าตัดที่ความสูง 6 มม.จากบริเวณฐานครีบลูก อากาศที่ไหลเข้าทางด้านขวามือ ได้ปะทะกับผิวครีบลูกในแถวด้านหน้า และพาความร้อนไปรวมในส่วนบริเวณส่วนหลังครีบลูก โดยเฉพาะในส่วนตรงกลางของชุดครีบลูกมากที่สุดทำให้ในส่วนนั้นของครีบลูกอุณหภูมิมีสูงอันเนื่องมาจากในส่วนทางด้านหลังของชุดครีบลูกอากาศจะมีอัตราการความเร็วลดลง เนื่องจากการขวางการไหลของตัวครีบลูกในแถวเดียวกัน ส่งผลกระทบให้ความเร็วของอากาศสัมผัสกับผิวบริเวณฐานครีบลูกในส่วนนั้นน้อยลง ซึ่งแสดงว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวครีบลูกให้กับอากาศในบริเวณด้านหน้าครีบลูกจะมากกว่าบริเวณอื่นๆ อันแสดงได้จากสีของอุณหภูมิ



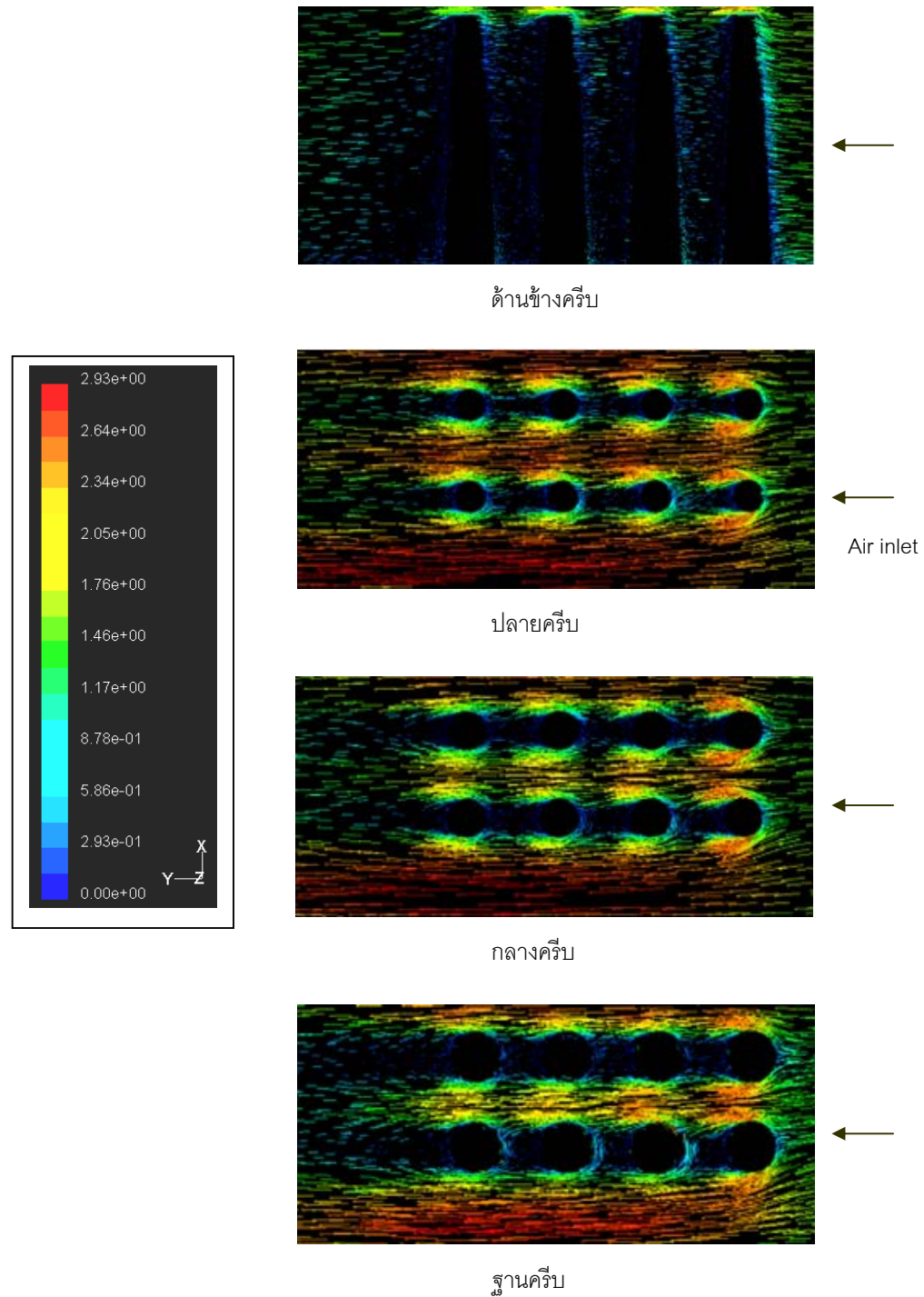
ภาพประกอบ 28 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ฐานครีปที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$ ที่ Re ต่างๆกัน

จากภาพประกอบ 28 เป็นภาพพื้นที่หน้าตัดที่ความสูง 6 มม.จากบริเวณฐานครีป ที่ค่าอัตราการไหลของอากาศต่างๆกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวครีป ให้กับอากาศได้มากขึ้นโดยจะเห็นจากภาพที่ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของอากาศน้อยๆ จะมีความร้อนแพร่กระจายในบริเวณส่วนหลังครีปสูง และเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากขึ้นการแพร่กระจายของความร้อนในส่วนหลังครีปน้อยลง แต่ก็ยังมีความร้อนหลงเหลือในส่วนของตัวครีปให้เห็นอยู่ อันแสดงได้จากสีที่บอกค่าของอุณหภูมิ



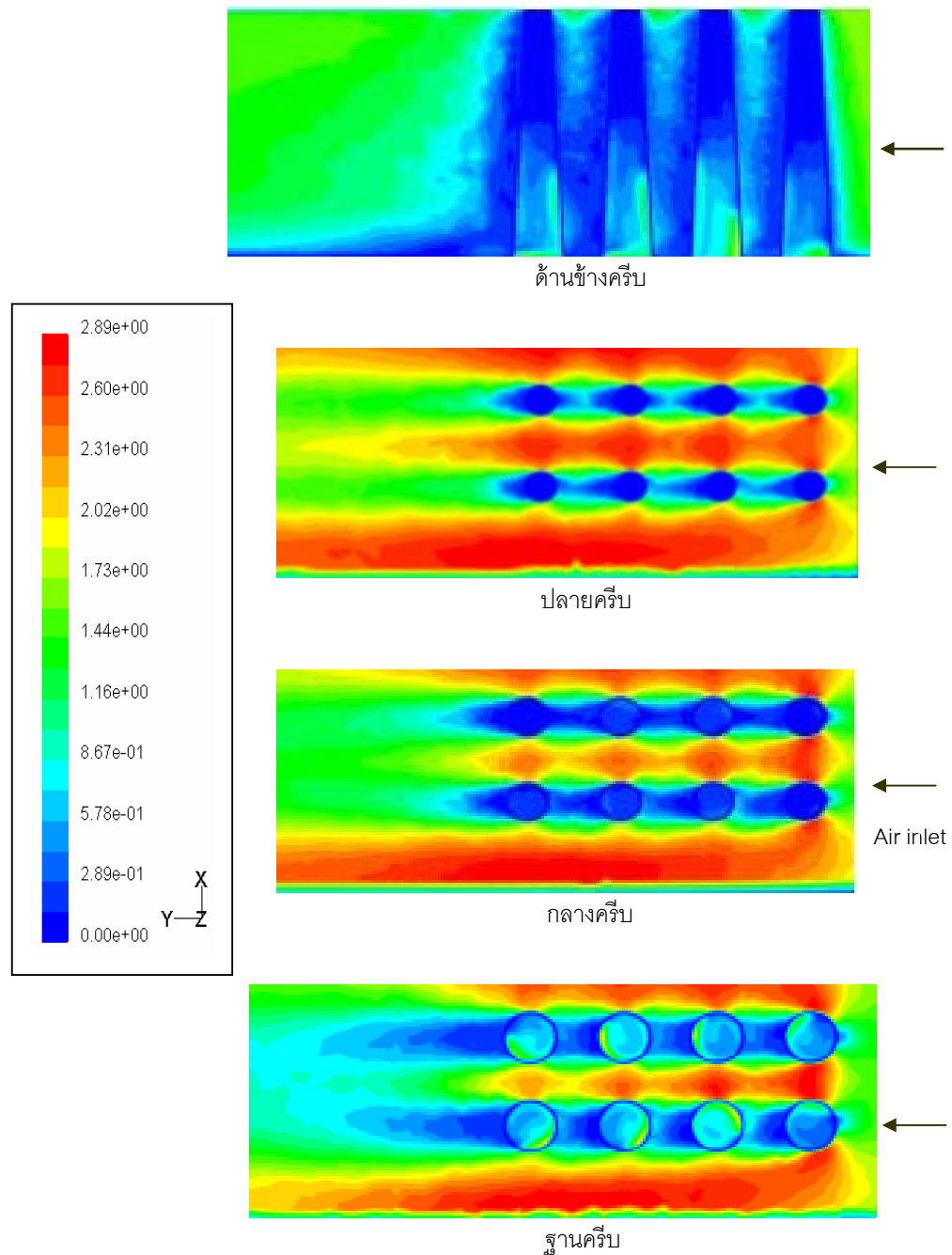
ภาพประกอบ 29 แสดงการกระจายของอุณหภูมิที่หน้าตัดต่างๆ ที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 1531$

จากภาพประกอบ 29 แสดงว่าบริเวณส่วนปลายของครีป และในส่วนของบริเวณด้านหน้าของครีป มีอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวครีปให้กับอากาศได้มาก ทำให้อุณหภูมิในบริเวณนั้นมีค่าต่ำ ซึ่งจะทำให้การแพร่กระจายความร้อนให้กับอากาศ และความร้อนที่แสดงอยู่ในตัวครีป อันจะดูได้จากสี



ภาพประกอบ 30 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่หน้าตัดต่างๆที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 1531$

จากภาพประกอบ 30 เป็นภาพพื้นที่หน้าตัดที่ความสูง 6 มม. 35 มม. และ 62 มม. จากบริเวณฐานครีปและด้านข้างของครีป ซึ่งแสดงว่าบริเวณส่วนปลายของครีป และระยะช่องว่างระหว่างครีปในบริเวณแถวแรกมีอัตราการไหลของอากาศสูงสุด และต่ำสุดในส่วนด้านหลังของครีปโดยเฉพาะแถวหลังสุด



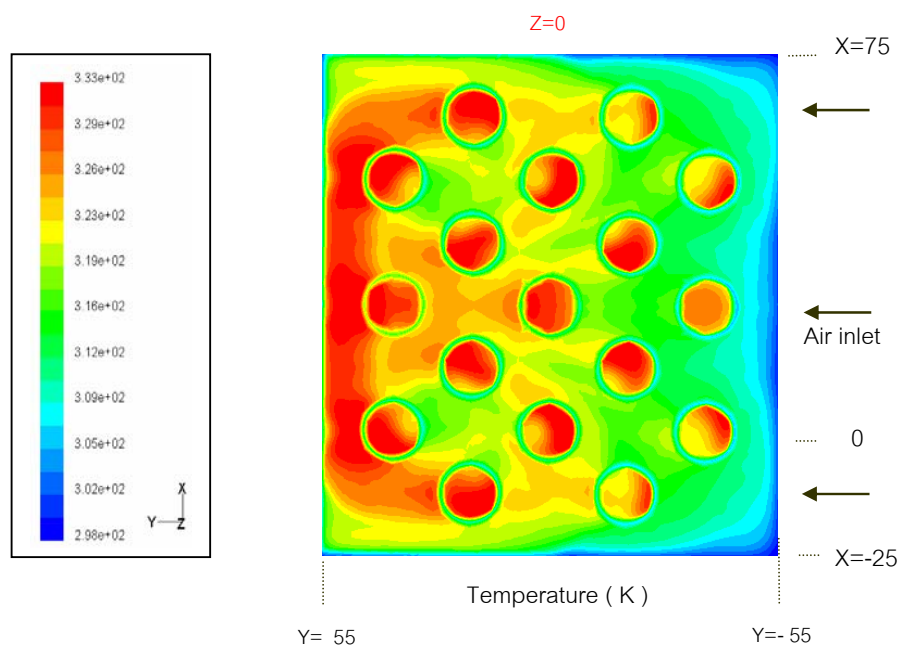
ภาพประกอบ 31 แสดงความเร็วของอากาศที่หน้าตัดต่างๆกันที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 4537$

จากภาพประกอบ 31 เป็นภาพพีทีทีหน้าตัดที่ความสูง 6 มม. 35 มม. และ 62 มม. จากฐานครีป และด้านข้างของครีป ซึ่งแสดงว่าบริเวณส่วนปลายของครีป มีอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านผิวครีปด้วยความเร็วสูง ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนได้มาก และจากภาพด้านข้างการไหลของอากาศที่มีความเร็วต่ำในบริเวณด้านหลังครีป เนื่องจากการขวางการไหลในส่วนของตัวครีป ซึ่งจะดูได้จากสี

การศึกษาเชิงพารามิเตอร์ของครีบลักษณะแบบสลับแถว (Staggered layout)

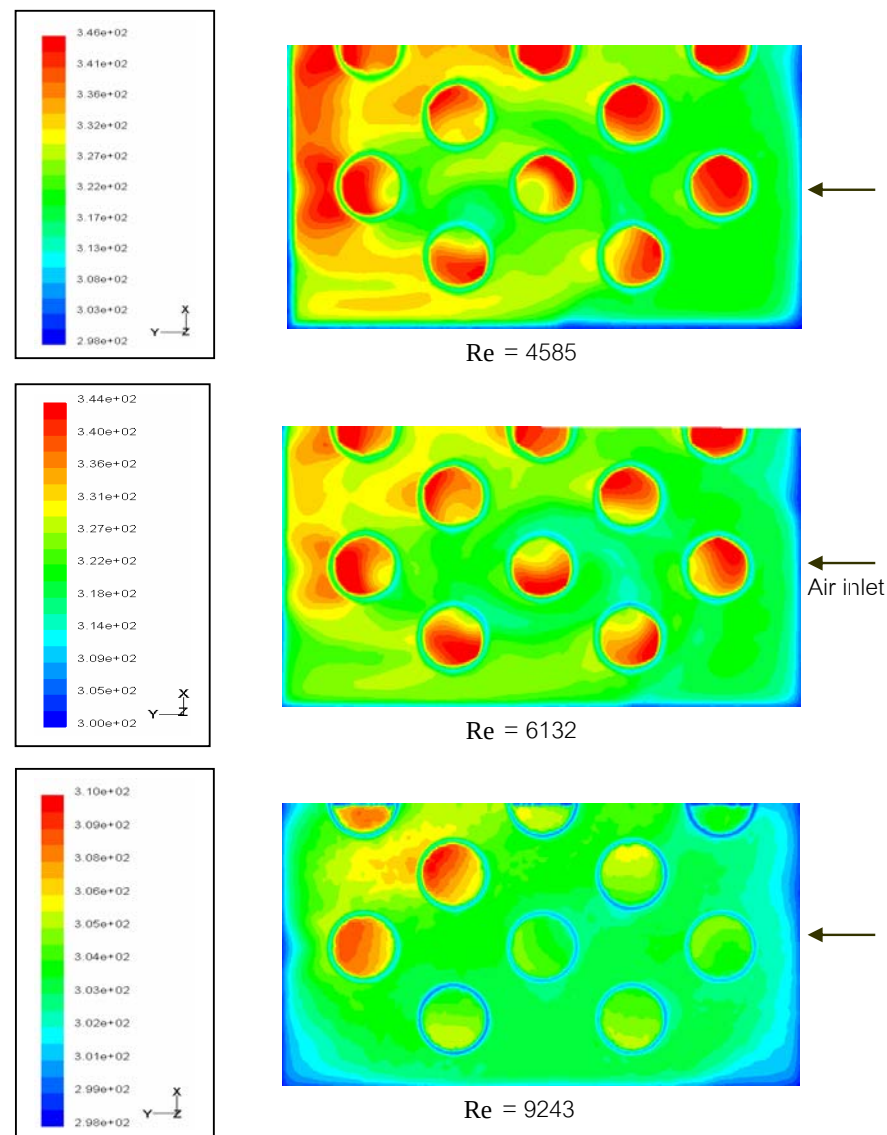
การถ่ายเทความร้อนแบบบังคับ (Force convection)

การนำเสนอการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาของอากาศแบบบังคับโดยการคำนวณของโปรแกรม (CFD) ทำให้ทราบลักษณะการไหลของอากาศ การแพร่กระจายของความร้อน (Diffusions) ของครีบบนสลับแถว ดังแสดงให้ทราบในภาพประกอบที่ 32-36 และได้ทำการวัดอุณหภูมิของผิวครีบล้อ อุณหภูมิของอากาศเพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ยรวม และค่าตัวแปรต่างๆ



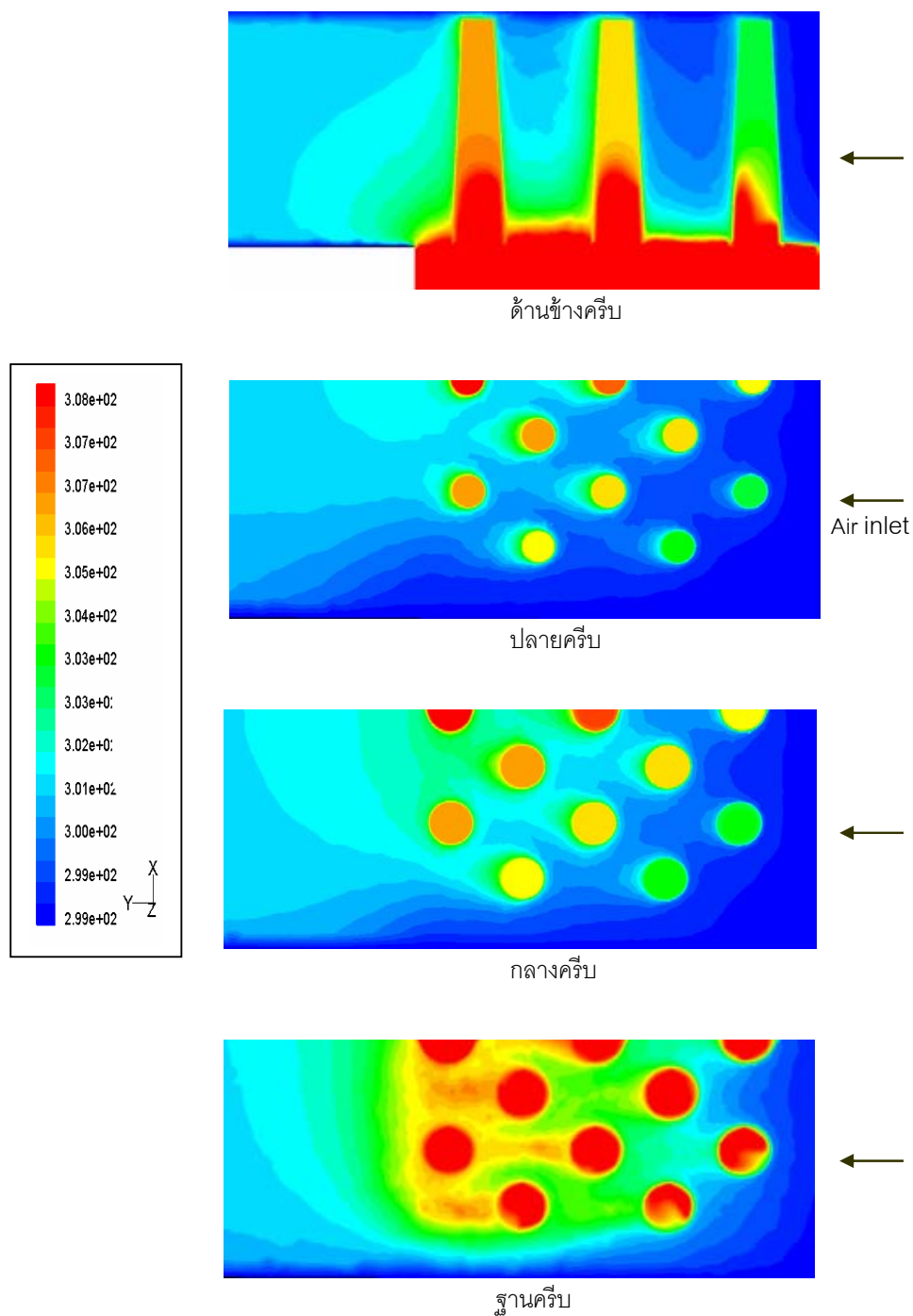
ภาพประกอบ 32 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ฐานครีบล้อที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 3100$

จากภาพประกอบ 32 เป็นภาพพื้นที่หน้าตัดที่ความสูง 6 มม.จากบริเวณฐานครีบล้อ อากาศที่ไหลเข้าทางด้านขวามือ ได้ปะทะกับผิวครีบล้อในแถวด้านหน้า และพาความร้อนไปรวมในส่วนบริเวณส่วนหลังครีบล้อโดยเฉพาะในส่วนตรงกลางของชุดครีบล้อมากที่สุดทำให้ในส่วนนั้นของครีบล้ออุณหภูมิมีสูง อันเนื่องมาจากในส่วนของด้านหลังของชุดครีบล้ออากาศจะมีอัตราการความเร็วลดลง เนื่องจากการขวางการไหลของตัวครีบล้อในแถวเดียวกันส่งผลกระทบบังคับให้ความเร็วของอากาศสัมผัสกับผิวบริเวณฐานครีบล้อในส่วนนั้นน้อยลง แต่จะมีอากาศบางส่วนที่เปลี่ยนทิศทางไปปะทะกับครีบล้อแถวด้านข้าง ทำให้มีการหมุนวนของอากาศ แสดงว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวครีบล้อให้กับอากาศในบริเวณด้านหน้าครีบล้อจะได้ออกมาว่าบริเวณอื่นๆ และในส่วนที่ติดกับผิวครีบล้อก็จะระบายความร้อนได้ดี โดยจะมีขอบวงกลมตามจุดที่ตั้งของตัวครีบล้อ อันแสดงได้จากสีของอุณหภูมิ



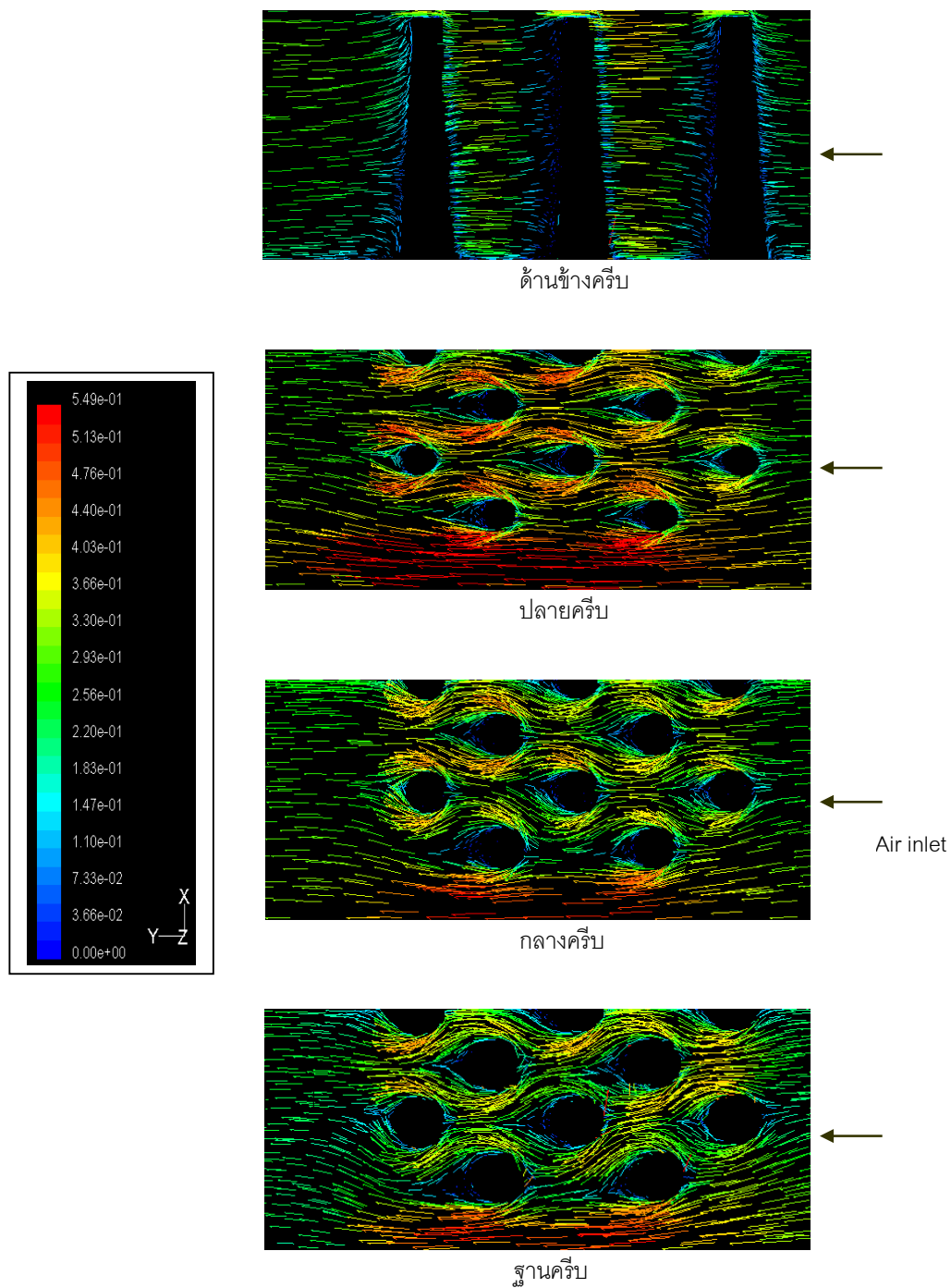
ภาพประกอบ 33 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ฐานครีป ที่ $q = 2.73 \text{ kW/m}^2$ ที่ Re ต่างๆ กัน

จากภาพประกอบ 33 เป็นภาพพื้นที่หน้าตัดที่ความสูง 6 มม. จากบริเวณฐานครีป ที่ค่าอัตรา
การไหลของอากาศต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเท
ความร้อนจากผิวครีปให้กับอากาศได้มากขึ้น โดยจะเห็นจากภาพที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของอากาศน้อยๆ
จะมีความร้อนแพร่กระจายในบริเวณส่วนหลังครีปสูง และเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากขึ้น การแพร่กระจาย
ของความร้อนในส่วนหลังครีปน้อยลง แต่ก็ยังมีความร้อนหลงเหลือในส่วนของตัวครีปในแถวหลังสุดให้
เห็นอยู่ อันแสดงได้จากสีที่บอกค่าของอุณหภูมิ



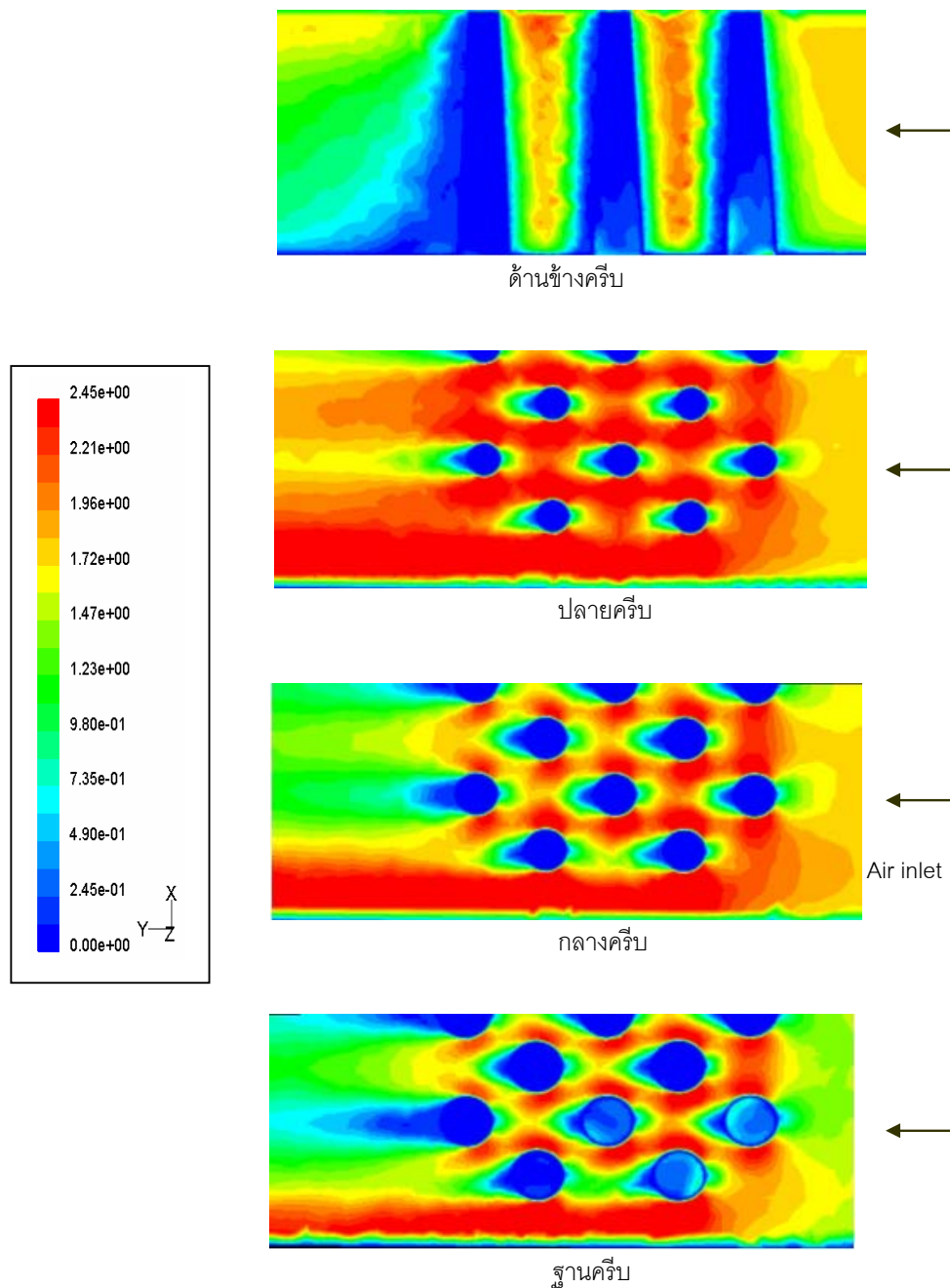
ภาพประกอบ 34 แสดงการกระจายของอุณหภูมิที่หน้าตัดต่างๆ ที่ $q = 0.91 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 1546$

จากภาพประกอบ 34 แสดงว่าบริเวณส่วนปลายของครีป และในส่วนของบริเวณด้านหน้าของครีปมีอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวครีปให้กับอากาศได้มาก ทำให้อุณหภูมิในบริเวณนั้นมีค่าต่ำ ซึ่งจะเห็นการแพร่กระจายความร้อนให้กับอากาศ และความร้อนที่แสดงอยู่ในตัวครีป อันจะดูได้จากสี



ภาพประกอบ 35 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่หน้าตัดต่างๆ $q = 0.91 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 1546$

จากภาพประกอบ 35 เป็นภาพพื้นที่หน้าตัดที่ความสูง 6 มม. 35 มม. และ 62 มม. จากบริเวณฐานครีปและด้านข้างของครีป ซึ่งแสดงว่าบริเวณส่วนปลายของครีป และระยะช่องว่างระหว่างครีปในบริเวณแถวแรกมีอัตราการไหลของอากาศสูงสุด และต่ำสุดในส่วนด้านหลังของครีป โดยเฉพาะแถวหลังสุด



ภาพประกอบ 36 แสดงความเร็วของอากาศที่หน้าตัดต่างๆกันที่ $q = 2.73 \text{ kW/m}^2$ และ $Re = 9243$

จากภาพประกอบ 36 ซึ่งแสดงว่าบริเวณส่วนปลายของครีป มีการไหลของอากาศที่ไหลผ่านผิวครีปด้วยความเร็วสูง ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนได้มาก และจากภาพด้านข้างการไหลของอากาศที่มีความเร็วต่ำในบริเวณด้านหลังครีป เนื่องจากการขวางการไหลในส่วนของตัวเอง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในภาพตัดบริเวณฐานครีป โดยเฉพาะครีปแถวหลังสุด โดยบอกได้จากสีของความเร็ว

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาทั้งการทดลองแล้วนำผลมาคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการ และการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลที่ได้จากทั้งสองวิธีมาเสนอในลักษณะกราฟ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ภาพที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของอากาศ ดังที่เสนอในบทที่ 5 ผลที่สามารถสรุปได้ดังนี้

- อุณหภูมิทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิผิวชุดครีบเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าสเกลล้นน์เบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพลังความร้อนสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณ และการทดลองมีความสอดคล้องกันดี

- อุณหภูมิทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิผิวชุดครีบเฉลี่ยมีค่าน้อยลงเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการทดลอง และจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันโดยให้ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 0.23 เปอร์เซ็นต์สำหรับอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และประมาณ 0.46 เปอร์เซ็นต์สำหรับอุณหภูมิผิวชุดครีบเฉลี่ย

- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าสเกลล้นน์เบอร์มีค่าสูงขึ้นโดยแปรตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณมีความสอดคล้อง และใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 2.49 เปอร์เซ็นต์สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและประมาณ 2.48 เปอร์เซ็นต์สำหรับค่าสเกลล้นน์เบอร์

- การถ่ายเทความร้อนในส่วนของครีบที่มีลักษณะการเรียงตัวแบบสลับแถวดีกว่าแบบเรียงแถวอันเกิดจากการไหลวนของอากาศ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบทรงกระบอก เป็นการวิจัยที่มีขอบเขตที่กว้างและมีรายละเอียดมาก ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาได้บางส่วนเท่านั้น เพราะว่ามีขีดจำกัดในด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในการเก็บข้อมูล ทำให้ไม่สามารถศึกษาการถ่ายเทความร้อนครอบคลุมได้ทั้งหมด ในอนาคตอาจมีการเพิ่มเติมเงื่อนไขหรืออุปกรณ์อย่างเช่น

1. อาจทำการเพิ่มความเร็วลมให้สูงขึ้น

2. อาจทำการเพิ่มกริดให้ละเอียดมากขึ้นในส่วนของโมเดลเพื่อทำการศึกษาการไหลวนของอากาศด้านหลังครีป
3. อาจทำการศึกษาถึงผลกระทบในกรณีที่อุณหภูมิทางเข้าของระบบไม่คงที่ และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุด
4. อาจออกแบบให้ตัวครีปสามารถถอดเปลี่ยนได้ โดยใช้ฐานครีป และชุดให้ความร้อน (Heater) ตัวเดียวกันเพื่อศึกษารูปทรง และขนาดของครีปได้หลากหลาย
5. อาจออกแบบสร้างชุดอุโมงค์ลม ที่ทำจากอคริลิคใส เพื่อศึกษาและเก็บภาพการไหลของอากาศได้ง่ายและสะดวก
6. อาจออกแบบให้อุปกรณ์วัดความเร็วลมเป็นอุปกรณ์มาตรฐานในระบบที่แสดงให้เห็นทราบในที่สังเกตได้สะดวกเพื่อให้การทดลองเป็นไปอย่างต่อเนื่อง
7. อาจทำการหาความดันลด (Pressure drop) ในระบบ

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- นักสิทธิ์ คุ้มพัฒนาชัย. (2533). *การถ่ายเทความร้อน*. ปรับปรุงและพิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ. โครงการตำราเรียนสำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- R. F. Babus'Haq, K. Akintunde; & S. D. Probert. (1995). Thermal performance of a pin fin assembly. In *International Journal, Heat and Fluid Flow*, V.16. pp. 50-55
- S. Das; & P. Razelos. (1997). Optimization of convective trapezoidal profile circular pin fins. In *Int. Comm, Heat d Mass Transfer*, V. 24. No.4. pp. 553-541
- G. Fabbri. (1999). Optimum profiles for asymmetrical longitudinal fins in cylindrical ducts. In *International Journal, Heat and Mass Transfer*, V.42. pp. 551-523
- M. Almogbel;& A. Bejan. (2000) Cylindrical trees of pin fins. In *International Journal, Heat and Mass Transfer*, V.43. pp 4285-4297
- L. Marin; et al. (2004). Analysis of polygonal fins using the boundary element method. In *Applied Thermal Engineering*, V. 24. pp.1321-1339
- S.V Naidu; et al. (2004). Performance of a circular fin in a cylindrical porous enclosure. In *Int. Comm, Heat Mass Transfer*, V. 31. No.8. pp. 1209-1218
- Y.L. He; et al. (2004). Steady natural convection in a vertical cylindrical envelope with adiabatic lateral wall. In *International Journal, Heat and Mass Transfer*, V. 47 . pp. 3131-3144
- B. Cherif; & M.S. Sifaoui. (2004). Theoretical Study of heat transfer by radiation conduction and convection in semi-transparent porous medium in a cylindrical enclosure. In *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, V.83. pp. 519-527
- B. Merci, M.P.E. Mesbah; & J.W. Baughn. (2005). Experimental and numerical study of turbulent heat transfer on a cylindrical pedestal. In *International Journal, Heat and Fluid Flow*, V. 26. pp. 233-243
- I. Dagtekin, H. F. Oztog; & A. Z.Sahin. (2005) An analysis of entropy generation through a circular duct with different shaped longitudinal fins for laminar flow. In *International Journal, Heat and Mass Transfer*, V. 48. pp. 171-181
- Y. Pced; et al. (2005) Forced convective heat transfer across a pin fin micro heat sink. In *International Journal, Heat and Mass Transfer*, V. 48. pp. 3615-3627

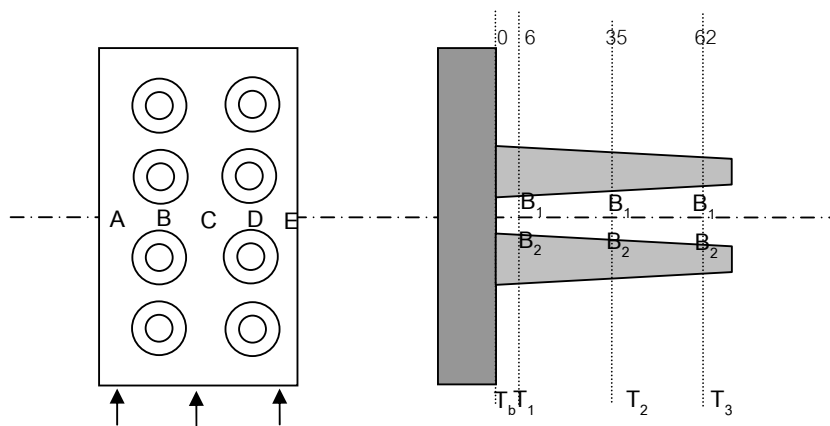
- M. Corcione. (2005) Correlating equations for free convection heat transfer from horizontal isothermal cylinders set in a vertical array. In *International Journal, Heat and Mass Transfer*, V. 48. pp. 3660-3673
- N.Sahiti; et al. (2005). Performance comparison of pin fin in-duct flow arrays with various pin cross-sections. In *Applied thermal Engineering*, V.26. pp. 1176-1192
- A. D. Kraus, A. Aziz; & J. Welty. (1999). *Extended Surface Heat Transfwer*. International Edition. A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons,INc.
- S.Kakac; et al. (1999). *Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers*. International Edition. London. Kluwer Academic Publishers
- Incropera, F.P.; & Dewitt, D.P. (1985). *Introduction to Heat Transfer*. International Edition. . London. John wiley & Sons, Inc.
- J. P. Holman. (1997). *Heat Transfer*. Eighth Edition. Singapore. McGraw-Hill,INC.
- Jackop, M.; & Hawkins,G.A. (1957) *Elements of Heat Transfer*. International Edition. London. John Wiley & Sons, Inc.
- K. Shah Ramesh; & P. Sekulic Dusan. (2001). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. John Wiley & Sons,Inc
- M.N. Ozisik, (1977). *Basic Heat Transfer*. Kogakusha. International Edition. Turkey. McGraw-Hill, Ltd,
- , J.R. Welty, (1978). *Engineering Heat Transfer*. International Edition. London. John Wiley & Sons, Inc.
- Y. A. Cengel. (1998). *Heat Transfer*. International Edition. North America. McGraw-Hill.

ภาคผนวก

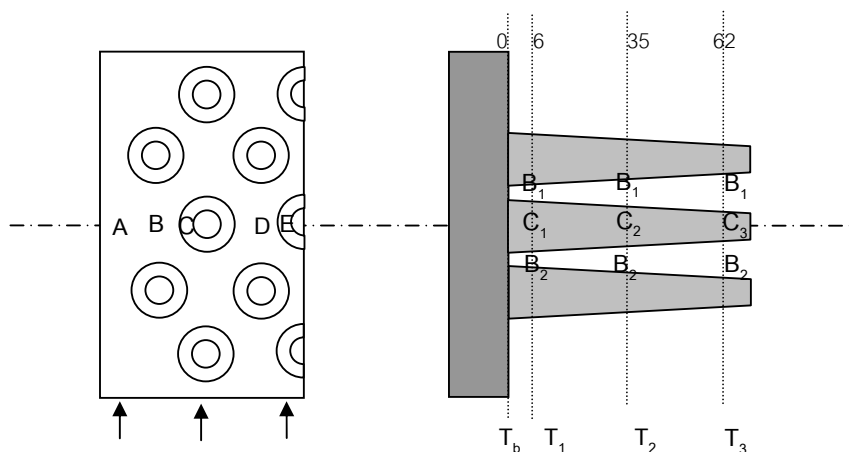
ภาคผนวก ก
ตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางแสดงผลการทดลอง

จากการทดลองที่ค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) 0.91, 1.82, 2.72, และ 3.64 kW/m^2 ที่ความเร็วลม 0.28, 0.56, 0.83, 1.11, 1.39, และ 1.56 m/s โดยแบ่งในแนวระนาบออกเป็น 4 ระดับคือที่แนวระนาบ T_{base} , T_1 , T_2 , T_3 โดยมีความสูงของระนาบ 0, 6, 35, และ 62 mm. ตามลำดับได้วัดอุณหภูมิของครีปและอากาศโดยแสดงผลของอากาศเฉลี่ยในตาราง A1-A8 ในส่วนบริเวณผิวของฐานครีปตามจุดต่างๆเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย และในกรณีที่ครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลางต้องทำการวัดความร้อนที่ผิวครีปทั้งด้านบน-ด้านล่างเพื่อหาค่าเฉลี่ยโดยแสดงค่าในตาราง B1-B8 และนำมาหาค่าเฉลี่ยผิวรวมโดยแสดงค่าในตาราง C1-C8 โดยใช้สัญลักษณ์ในการอ่านค่าดังนี้



ภาพประกอบ 37 แสดงจุดและระดับที่วัดอุณหภูมิครีปแบบเรียงแถว(In-line)



ภาพประกอบ 38 แสดงจุดและระดับที่วัดอุณหภูมิครีปแบบสลับแถว(Staggered)

สัญลักษณ์

q	=	ความร้อนที่ให้กับครีป, W
u_{∞}	=	ความเร็วของอากาศ, km/hr (m/s)
T_{in}	=	อุณหภูมิทางเข้า, °C
T_{out}	=	อุณหภูมิทางออก, °C
T_f	=	อุณหภูมิอากาศ, °C
T_s	=	อุณหภูมิผิวครีป, °C
T_{base}	=	อุณหภูมิที่ผิวบริเวณฐาน, °C
$\overline{T}_x$	=	อุณหภูมิเฉลี่ย, °C
T_1, T_2, T_3	=	อุณหภูมิที่แนวระนาบ 1, 2, และ 3, °C
A, B, C, D, E	=	อุณหภูมิที่จุด A, B, C, D, และ E, °C
X ที่ T_x	=	อุณหภูมิจุด X ที่ระนาบ T_x , °C
X ที่ $\overline{T}_x$	=	อุณหภูมิเฉลี่ยที่จุด X นั้นๆ ที่ระนาบ T_x , °C

ตำแหน่งเฉลี่ยของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ

B	=	$(B_1 + B_2) / 2$
D	=	$(D_1 + D_2) / 2$
C	=	$(C \text{ ที่ } T_1 + C \text{ ที่ } T_2 + C \text{ ที่ } T_3) / 3$
E	=	$(E \text{ ที่ } T_1 + E \text{ ที่ } T_2 + E \text{ ที่ } T_3) / 3$
$\overline{T}_{out}$	=	$(T_1 + T_2 + T_3) / 3$
$\overline{T}_f$	=	$\{จุด (A+B+C) \text{ ที่ } T_1, T_2, T_3\} / 9$
$\overline{T}_s$	=	$\{A+B+C+D+จุด (B+D) \text{ ที่ } T_1, T_2, T_3\} / 10$

ผลการทดลองของครีบลักษณะแบบเรียงแถว (In-line)

ตาราง 5 แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีบล และทางออกเฉลี่ยของครีบบแบบเรียงแถวที่ $q = 0.91 \text{ kW/m}^2$

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิอากาศ ($q = 0.91 \text{ kW/m}^2$)												T_f	T_{out}
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1			T_2			T_3			T_{out}			$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
		A	C	D	A	C	D	A	C	D	T_1	T_2	T_3		
0.28	25.7	29.3	31.2	32.7	27.1	29.5	29.7	26.9	27.2	27.8	31.1	29.1	27.8	29	29.3
0.56	25.6	27.7	28.9	29.3	26.2	27.2	27.9	25.8	26.1	26.1	28.6	27.4	26.7	27.2	27.6
0.83	25.5	26.7	27.4	27.5	25.2	26.1	26.3	25.4	25.3	25.3	27.7	26.9	25.9	26.1	26.8
1.11	25.2	25.1	25.5	28.8	24.9	25.5	25.6	24.9	25	25.1	27	26	25.5	25.6	26.2
1.39	25.1	24.9	25.3	25.6	24.8	25	25.2	24.7	24.8	24.7	26.2	26	25.6	25	25.9
1.67	25.1	24.8	24.8	25.2	24.2	24.3	24.5	24.2	24	24	25.8	25.7	25.6	24.4	25.7

ตาราง 6 แสดงอุณหภูมิของผิวครีบลที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลางเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 7

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิผิวครีบล ($q = 0.91 \text{ kW/m}^2$)											
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1				T_2				T_3			
		B_1	B_2	D_1	D_2	B_1	B_2	D_1	D_2	B_1	B_2	D_1	D_2
0.28	25.7	42.7	39.3	41.2	39.2	41.3	38.7	39.1	38.4	37.2	35.4	36.4	35.6
0.56	25.6	34.4	34.5	33.6	36.4	32.8	33.3	32.4	34.4	30.7	31.4	31	32
0.83	25.5	32	31.3	31.8	31.5	31	31	30.5	30.9	29.8	30	29.7	30.3
1.11	25.2	31.2	31.7	31	31	30.2	30	30	30.7	28.8	30.5	28.4	30.1
1.39	25.1	30.5	30.5	30.6	30.6	29.5	28.7	29.3	29.3	29.3	28.2	28.3	28.3
1.67	25.1	30.2	29.6	30.2	30	29.2	28.4	29	28.5	28.7	27.5	28	27.8

ตาราง 7 แสดงอุณหภูมิจากบริเวณฐานของครีบล อุณหภูมิครีบลเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีบล

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิของผิวครีบลเฉลี่ย ($q = 0.91 \text{ kW/m}^2$)											T_s
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_{base}					T_1		T_2		T_3		$^{\circ}\text{C}$
		A	B	C	D	E	B	D	B	D	B	D	
0.28	25.7	35.8	39.2	34.9	29	37.8	41	40.2	40	38.8	36.3	36	37.2
0.56	25.6	31.9	34.5	32	34.5	31.5	34.5	35	33.1	33.4	31.1	31.5	33.0
0.83	25.5	29.1	30.6	28.7	31.2	29.2	31.7	31.7	31.1	30.7	29.9	30	30.3
1.11	25.2	27.1	29	27.6	28.5	27.5	31.5	31	30.1	30.4	29.7	29.3	29.2
1.39	25.1	26.5	28.6	27.3	28.1	27	30.5	30.6	29.1	29.3	28.8	28.3	28.6
1.67	25.1	26.3	28.3	27.1	27.9	26.8	29.9	30.1	28.8	28.8	28.1	27.9	28.2

ตาราง 8 แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีป และทางออกเฉลี่ยของครีปแบบเรียงแถวที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิอากาศ ($q = 1.82 \text{ kW/m}^2$)												T_f	T_{out}
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1			T_2			T_3			T_{out}			$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
		A	C	D	A	C	D	A	C	D	T_1	T_2	T_3		
0.28	24.9	29.5	34.7	38.4	27.2	31.3	34.2	27	27.9	29.6	33.8	31.8	28.7	31.1	31.4
0.56	25.1	28.4	31.1	32.5	26.5	28.5	30.5	25.9	26.3	26.4	31	28.6	26.5	28.5	28.7
0.83	25	25.9	26.7	27.8	25.2	26	26.7	25	25.3	25.5	29.1	27.5	25.8	26	27.5
1.11	24.8	25.8	26.3	27.2	24.8	25.6	26.5	24.9	25.1	25.3	28.3	26.5	25.4	25.7	26.7
1.39	24.8	25.7	26.5	27	24.8	25.3	26	24.8	24.9	25.1	27.6	26.2	25.1	25.6	26.3
1.67	24.8	25.6	26.2	26.9	24.9	25.1	25.9	24.5	24.7	24.8	27.1	25.9	24.9	25.4	26

ตาราง 9 แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลางเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 10

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิผิวครีป ($q = 1.82 \text{ kW/m}^2$)											
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1				T_2				T_3			
		B_1	B_2	D_1	D_2	B_1	B_2	D_1	D_2	B_1	B_2	D_1	D_2
0.28	26	46.7	44.8	46.2	45.5	44	42.9	43.2	43.4	39.5	39.8	39.2	40.3
0.56	25.1	40.4	42.7	42.8	42.8	37.8	41	39.4	40.4	36.2	36	36.2	33.7
0.83	25.6	37.1	35.6	34.6	36.3	35.1	34.2	32.1	34.8	32.5	32.2	30.8	30.7
1.11	25.6	34.7	35	32.9	32	30.7	32.5	30.5	30.4	28.7	30.2	29	29.9
1.39	25.6	31.3	32	31.8	31.8	30.3	31	29.4	30.8	27.8	30	28.4	29.7
1.67	25	31.5	31.4	31.3	31.3	29.9	30.6	29.6	30.4	28.5	29.9	28.3	29.4

ตาราง 10 แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิของผิวครีปเฉลี่ย ($q = 1.82 \text{ kW/m}^2$)											T_s
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_{base}					T_1		T_2		T_3		$^{\circ}\text{C}$
		A	B	C	D	E	B	D	B	D	B	D	
0.28	26	45.1	50.3	43.3	50.3	44.6	45.8	45.9	43.5	43.3	39.7	39.8	44.7
0.56	25.6	37.3	40.6	36.6	40.9	36.6	41.6	42.8	39.4	39.9	36.1	35	38.8
0.83	25.5	32.7	36.7	32.7	36.1	33.3	36.4	35.5	34.7	33.5	32.4	30.8	34.0
1.11	25.2	31.6	35.2	31.9	35.2	32.2	34.9	32.5	31.6	30.5	29.5	29.5	32.2
1.39	25.1	31.1	34	30.8	34	32	31.7	31.8	30.7	30.1	28.9	29.1	31.3
1.67	25.1	29.8	32.4	30.2	32	30	31.5	31.3	30.3	30	29.2	28.9	30.5

ตาราง 11 แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีป และทางออกเฉลี่ยของครีปแบบเรียงแถวที่ $q = 2.73 \text{ kW/m}^2$

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิอากาศ ($q = 2.73 \text{ kW/m}^2$)												T_f	T_{out}
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1			T_2			T_3			T_{out}			$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
		A	C	D	A	C	D	A	C	D	T_1	T_2	T_3		
0.28	26	31.4	35.5	38.8	29.2	33.5	36.2	29.1	31.3	32.1	39.3	36.4	31.7	33	35.8
0.56	25.1	31.3	32.6	34.3	26.6	30.5	30.7	26.3	27.3	27.7	33	30.2	29.8	29.7	31
0.83	25.6	28.7	31.2	33.6	26.1	28.4	30.3	25.8	26.1	26.4	32	29.5	26.7	28.5	29.4
1.11	25.6	27	28.8	30.9	25.6	26.8	28	25.4	25.9	25.9	30.6	27.7	26.1	27.1	28.1
1.39	25.6	26.8	28.5	29.5	25.5	26.4	28	25.3	25.8	25.7	30	27.5	25.9	26.8	27.8
1.67	25	26.2	27.7	28.6	25.6	26	27.5	25.3	25.3	25.4	28.6	26.8	25	26.4	26.8

ตาราง 12 แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลางเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 13

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิผิวครีป ($q = 2.73 \text{ kW/m}^2$)											
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1				T_2				T_3			
		B_1	B_2	D_1	D_2	B_1	B_2	D_1	D_2	B_1	B_2	D_1	D_2
0.28	26	58.3	57.2	61.2	59.4	56	49.5	59.6	58	50.5	44.5	52.6	46.9
0.56	25.1	49	47	48.8	47.8	47.6	46.9	46.9	46.1	40	43	43.8	44.4
0.83	25.6	40.1	39.8	41.2	39.2	37	39.1	38.3	37.2	35	35.3	34.6	35.3
1.11	25.6	36.6	37.5	38.1	36.3	35.3	37.2	37	36.5	32.9	34	33.2	34.6
1.39	25.6	34.8	36	35.5	35.6	33.9	34.5	34.2	35.4	30.4	32.8	30.3	31.9
1.67	25	34.2	33.6	34.5	33.6	32.4	33	31.2	34	29	31.1	30.6	28.2

ตาราง 13 แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิของผิวครีปเฉลี่ย ($q = 2.73 \text{ kW/m}^2$)												T_s
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_{base}					T_1		T_2		T_3		$^{\circ}\text{C}$	
		A	B	C	D	E	B	D	B	D	B	D		
0.28	26	48.3	59.1	50.2	62.3	55.3	57.8	60.3	52.8	58.8	47.5	49.8	54.7	
0.56	25.1	41.1	48.5	40.1	47.6	41.9	48	48.3	47.3	46.5	41.5	44.1	45.0	
0.83	25.6	35.7	43	34	42.8	36.1	40	40.2	38.1	37.8	35.2	35	38.1	
1.11	25.6	33.7	38.5	31.4	38.8	35.2	37.1	37.2	36.3	36.8	33.5	33.9	35.7	
1.39	25.6	33.5	38.4	31	38.6	34	35.4	35.6	34.2	34.8	31.6	31.1	34.4	
1.67	25	32.7	36.1	29.5	36.6	32.9	33.9	34.1	32.7	32.6	30.1	29.4	32.8	

ตาราง 14 แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีป และทางออกเฉลี่ยของครีปแบบเรียงแถวที่ $q = 3.64 \text{ kW/m}^2$

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิอากาศ ($q = 3.64 \text{ kW/m}^2$)												T_f	T_{out}
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1			T_2			T_3			T_{out}			$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
		A	C	D	A	C	D	A	C	D	T_1	T_2	T_3		
0.28	25.3	33.4	44.2	47.4	29	37.5	37	30	32.5	34.2	46.3	38.6	31.8	36.1	38.9
0.56	25.2	31.9	37.6	38.3	27	31.8	33	26.5	27.9	27.7	36	31	26.1	31.3	32.3
0.83	25	28.6	32.6	33.3	26.2	29.7	30.7	26	27.8	27.5	33.2	29.7	25.3	29.2	30.1
1.11	25.2	28.4	31	32.1	26	28.2	29.8	25.9	25.9	26	31.2	28.1	25	28.1	28.8
1.39	25.2	26	29.2	28.5	25	26.6	27.4	24.7	25.2	24.8	30.5	28	25	26.4	28
1.67	25.3	27.2	29	29.8	25.8	27.2	27.9	25.8	26.4	26.2	28	27.3	25	27.3	27.3

ตาราง 15 แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลางเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 16

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิผิวครีป ($q = 3.64 \text{ kW/m}^2$)											
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1				T_2				T_3			
		B_1	B_2	D_1	D_2	B_1	B_2	D_1	D_2	B_1	B_2	D_1	D_2
0.28	26	66.2	66	66.1	64.3	64.1	68.5	60.2	62.6	51.4	56.9	51.2	55.5
0.56	25.1	57	56.4	55.8	55.2	53.1	49.8	49.1	51.8	45	47.8	45.8	44.4
0.83	25.6	41.3	50.2	40	50.6	40.8	42.1	39.4	42	34.4	38.8	35.2	38
1.11	25.6	40.6	39.6	40	40.2	38	38.6	37	37.4	31.8	36.8	32.6	34.7
1.39	25.6	39.1	39.1	40.4	40.7	37.2	38	37.7	38.5	33.2	36.2	30.2	34.3
1.67	25	36.7	37.6	36.8	37.4	33.1	35.2	34.1	35.8	30.7	33.6	30.1	33.8

ตาราง 16 แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิของผิวครีปเฉลี่ย ($q = 3.64 \text{ kW/m}^2$)												T_s
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_{base}					T_1		T_2		T_3		$^{\circ}\text{C}$	
		A	B	C	D	E	B	D	B	D	B	D		
0.28	26	58.3	69.8	65.3	64.8	54.6	66.1	65.2	63.3	61.4	54.2	53.4	61.5	
0.56	25.1	49.5	61.5	47	55.7	45.8	56.2	55.5	51.5	50.5	46.4	45.1	51.3	
0.83	25.6	37	48	38	48.6	38	45.8	45.3	41.5	40.7	36.6	36.6	41.5	
1.11	25.6	34.2	44.8	36.2	44.3	35.3	40.1	40.1	38.3	37.2	34.3	33.7	38.0	
1.39	25.6	33.3	42.3	33.8	42.3	33.6	39.1	38.6	35.6	36.1	32.7	32.3	36.3	
1.67	25	31.8	40	33	39.1	32.4	37.2	37.1	34.2	35	32.2	32	34.9	

ผลการทดลองของครีบลักษณะแบบสลับ (Staggered)

ตาราง 17 แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีบล และทางออกเฉลี่ยของครีบบแบบสลับแถวที่ $q = 0.91 \text{ kW/m}^2$

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิอากาศ ($q = 0.91 \text{ kW/m}^2$)												T_f	T_{out}
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1			T_2			T_3			T_{out}			$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
		A	B	D	A	B	D	A	B	D	T_1	T_2	T_3		
0.28	25.4	27.4	28.2	32.1	26	26.6	28.6	26	26.1	27.3	30.4	28.9	28.1	27.6	29.1
0.56	25.3	26.5	26.8	28.8	25.7	26.1	28	25.4	25.6	26.6	28.7	27.3	26	26.6	27.2
0.83	25.2	26.2	26.3	27.3	25.6	25.4	26.8	25.3	25.4	25.3	27	26.4	25.8	26	26.4
1.11	25.1	25.6	25.8	26.7	25.5	25.3	26	25.2	25.1	25.2	26.7	26.3	25.2	25.6	26.1
1.39	25	25.4	25.5	26.1	25.4	25.2	25.8	25.1	25.1	25	26.4	26.1	25	25.4	25.8
1.67	25	25.3	25.4	26	25.1	25.1	25.8	25.1	25.1	24.8	26	25.7	25	25.3	25.6

ตาราง 18 แสดงอุณหภูมิของผิวครีบลที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลางเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 19

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิผิวครีบล ($q = 0.91 \text{ kW/m}^2$)																	
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1						T_2						T_3					
		B_1	B_2	C	D_1	D_2	E	B_1	B_2	C	D_1	D_2	E	B_1	B_2	C	D_1	D_2	E
0.28	25.4	31.4	33.4	34	32.4	33.3	32.8	31.1	32.4	35.4	31	32.4	31.2	30.5	31.4	32.7	30.9	31.1	30
0.56	25.3	30.5	31.3	29.4	30.5	31.7	30.5	30.2	31.5	30.9	29.8	31.6	30.2	29.5	30.7	29.2	28.9	30.1	29
0.83	25.2	29	29.6	29.4	28.5	29.4	29.1	28.4	29.6	29	29	30.1	28.6	29.7	29.7	27.8	27.4	29	27.7
1.11	25.1	27.5	28.7	27.1	27.5	27.5	28.3	28.3	28.3	28.1	27.2	28.1	27.4	28	28.6	27	27.1	27.9	26.9
1.39	25	27.8	27.8	27	26.6	26.9	28	27.6	27.6	27	26.3	26.7	26.8	26	26.5	26.3	26.9	26.9	26
1.67	25	27.2	27.2	27	26	26.2	26.8	27.3	27.3	26.5	26.8	26.1	26.3	26.9	26.9	26.1	26.9	26.9	26

ตาราง 19 แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีบล อุณหภูมิครีบลเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีบล

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิของผิวครีบลเฉลี่ย ($q = 0.91 \text{ kW/m}^2$)											T_s
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_{base}			T_{fin}		T_1		T_2		T_3		$^{\circ}\text{C}$
		A	B	D	C	E	B	D	B	D	B	D	
0.28	25.7	36.6	38.6	38.5	34	31.3	32.4	32.9	31.8	31.7	31	31	33.6
0.56	25.6	30.5	31.1	31.2	29.8	29.9	30.9	31.1	30.9	30.7	30.1	29.5	30.5
0.83	25.5	29.8	30.2	30.5	28.7	28.5	29.3	29	29	29.6	29.7	28.2	29.3
1.11	25.2	28	29.2	29.1	27.4	27.5	28.1	27.5	28.3	27.7	28.3	27.5	28.1
1.39	25.1	27.7	28.6	28.5	26.8	26.9	27.8	26.8	27.6	26.5	27.3	26.9	27.4
1.67	25.1	27.3	28.4	28.3	26.5	26.4	27.2	26.1	27.3	26.5	26.9	26.9	27.1

ตาราง 20 แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีป และทางออกเฉลี่ยของครีปแบบสลั๊บแถวที่ $q = 1.82 \text{ kW/m}^2$

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิอากาศ ($q = 1.82 \text{ kW/m}^2$)												T_f	T_{out}
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1			T_2			T_3			T_{out}			$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
		A	B	D	A	B	D	A	B	D	T_1	T_2	T_3		
0.28	25.5	30.8	33	43.4	28.4	30.2	39.7	27.7	28.5	31.9	39.3	34.2	30.2	32.6	33
0.56	25.6	27	28.2	32.4	26.2	27.2	32.2	26.3	26.6	28.9	33	31	28.3	28.3	29.6
0.83	25.2	26.7	27.2	30.1	25.9	26.2	29.1	25.6	25.8	27.3	29.9	25.3	26.6	27.1	27.9
1.11	25.3	26.5	27	29.2	25.9	26.2	28.9	25.7	25.7	26.7	29.1	27.6	26.3	26.9	27.1
1.39	25	25.5	25.8	27.6	25.5	25.7	27	25.7	25.7	26.5	28.5	27.3	26.3	26.1	26.4
1.67	24.6	24.2	24.6	26	23.8	24.1	25.9	23.8	23.8	24.2	27.1	25.9	25.2	24.5	25.8

ตาราง 21 แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลางเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 22

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิผิวครีป ($q = 1.82 \text{ kW/m}^2$)																	
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1						T_2						T_3					
		B_1	B_2	C	D_1	D_2	E	B_1	B_2	C	D_1	D_2	E	B_1	B_2	C	D_1	D_2	E
0.28	25.5	40.1	40.9	42.3	41.6	38.4	42.3	37.8	39.7	40.2	38.8	39.5	39.8	34.8	37.8	34.6	36.8	38.4	34.9
0.56	25.6	33.4	34.9	35.9	32.7	35.2	34.4	31.4	32.7	34.2	31.6	33.2	33.6	30.5	32.1	32.1	29.7	31.2	32.4
0.83	25.2	31.3	32.2	32.3	31	32.4	31.5	30.3	31.7	32	30	30.6	29.8	28.7	30.1	29.3	29.6	30.1	29.2
1.11	25.3	30	30.6	31	30	30.8	30.3	30.6	30.1	30.2	28.8	29.8	29.6	27.8	29.3	28.6	28	29.5	27.3
1.39	25	29.1	29.5	30.5	28.2	28.2	29.1	29	29	29.6	28.2	27.9	28.5	26.7	27.5	27.3	26.9	27.2	27.7
1.67	24.6	29	28.7	30.2	28	28.2	27.9	28.4	28.4	29.3	28	27.1	27.2	26.5	27.3	27.2	26.6	27.5	26.6

ตาราง 22 แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิของผิวครีปเฉลี่ย ($q = 1.82 \text{ kW/m}^2$)												T_s
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_{base}			T_{fin}		T_1		T_2		T_3		$^{\circ}\text{C}$	
		A	B	D	C	E	B	D	B	D	B	D		
0.28	25.5	40.2	41.3	43.6	39	39	40.5	40	38.8	39.2	36.3	37.6	39.6	
0.56	25.6	37.8	38.2	38.6	34.1	33.5	34.2	34	32.1	32.4	31.3	30.5	34.2	
0.83	25.2	35	36.7	36.4	31.2	30.2	31.8	31.7	31	30.3	29.4	29.9	32.1	
1.11	25.3	31.3	31.6	31.5	29.9	29.1	30.3	30.4	30.4	29.3	28.6	28.8	30.3	
1.39	25	30.3	30.4	30.7	29.1	28.4	29.3	29.2	29	28.1	27.1	27.1	29.0	
1.67	24.6	29.6	29.6	29.8	28.9	27.2	28.9	28.1	28.4	27.6	26.9	27.1	28.4	

ตาราง 23 แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีป และทางออกเฉลี่ยของครีปแบบสลั๊บแถวที่ $q = 2.73 \text{ kW/m}^2$

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิอากาศ ($q = 2.73 \text{ kW/m}^2$)												T_f	T_{out}
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1			T_2			T_3			T_{out}			$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
		A	B	D	A	B	D	A	B	D	T_1	T_2	T_3		
0.28	25.3	30.8	33.6	47.4	28.2	30.7	45.2	28	29.1	30.4	43.2	31.6	29.6	33.7	36.4
0.56	25.4	27.9	29.5	35.1	27.2	28.5	34.6	26.8	27.4	30.5	33	30.4	27.8	29.7	31.1
0.83	25.2	26.6	27.4	31.6	26.3	26.5	30.1	25.5	25.7	26.9	31.7	29.5	26.9	27.4	29
1.11	25.1	26.5	27.2	30.7	25.7	26.2	29.6	25.4	25.6	27.1	30.5	28.6	26.6	27.1	28.2
1.39	25.1	25.9	26.6	29.5	25.3	25.6	28.9	25.2	25.2	26.2	29.6	27.6	26.1	26.5	27.4
1.67	25	25.9	26.4	29.1	25.1	25.5	28.5	25.1	25.2	26	28.9	27.3	25.8	26.3	26.8

ตาราง 24 แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลางเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 25

u_∞ m/s	T_{in} °C	อุณหภูมิผิวครีป ($q = 2.73 \text{ kW/m}^2$)																	
		T_1						T_2						T_3					
		B_1	B_2	C	D_1	D_2	E	B_1	B_2	C	D_1	D_2	E	B_1	B_2	C	D_1	D_2	E
0.28	25.3	49.5	51.3	52.4	47.2	50.7	49.9	45.7	47.3	51.8	45.5	47.5	45.7	40.2	44.1	42.6	38.2	42.2	42.8
0.56	25.4	38.3	40.3	42.5	36.5	40.7	39.3	36.2	36.9	40.6	34	36.7	37.2	32.7	34.4	36.2	31.6	32.9	34.9
0.83	25.2	34.8	35.2	35.4	33.8	35	33.2	32.4	33.7	34.5	32.2	32.7	30.8	30.3	32.1	30.3	30.7	32.5	30.5
1.11	25.1	32.3	34	33.8	31.9	33.9	32.3	31.4	32.5	32.9	31.1	31.9	30.5	30.1	31.5	29.8	29.9	31	29.1
1.39	25.1	30.5	31.2	31.6	30.4	31	31.4	29.8	30.7	31.1	29.7	30.5	30.3	28.2	30	28.3	28.6	29.8	28.8
1.67	25	29.8	30.8	29.5	30.2	30.7	30.5	29.5	30	30.1	29.2	29.8	29.5	28.3	29.4	27.8	28.2	29.6	28.2

ตาราง 25 แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิของผิวครีปเฉลี่ย ($q = 2.73 \text{ kW/m}^2$)											T_s
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_{base}			T_{fin}		T_1		T_2		T_3		$^{\circ}\text{C}$
		A	B	D	C	E	B	D	B	D	B	D	
0.28	25.7	50.8	52	53.8	48.9	46.1	50.4	49	46.5	46.5	42.2	40.2	47.9
0.56	25.6	48.9	50.1	50.9	39.8	37.1	39.3	38.6	36.6	35.4	33.6	32.3	38.3
0.83	25.5	41.3	42.6	43.5	33.4	31.5	35	34.4	33.1	32.5	31.2	31.6	35.3
1.11	25.2	33.8	35.6	34.8	32.2	30.6	33.2	32.9	32	31.5	30.8	30.5	33.4
1.39	25.1	32.3	33.2	33	30.3	30.2	30.9	30.7	30.3	30.1	29.1	29.2	31.5
1.67	25.1	30.7	32.4	32	29.1	29.4	30.3	30.5	29.8	29.5	28.9	28.9	30.1

ตาราง 26 แสดงอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผิวครีป และทางออกเฉลี่ยของครีปแบบสลั๊บแถวที่ $q = 3.64 \text{ kW/m}^2$

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิอากาศ ($q = 3.64 \text{ kW/m}^2$)												T_f	T_{out}
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1			T_2			T_3			T_{out}			$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
		A	B	D	A	B	D	A	B	D	T_1	T_2	T_3		
0.28	25.3	32.6	38	55.2	29.7	32.6	50.3	29.3	30.4	39.8	51	41.2	31.9	37.5	39.9
0.56	25.2	30.2	32.4	41.2	28.5	30.3	41	28	28.8	32.2	42.3	36.2	31.7	32.5	32.7
0.83	25	28.9	31	38.5	26.4	28.6	35.6	25.6	26.2	28.6	34.2	31.2	28.2	29.9	30
1.11	25.2	27.5	28.2	32.2	26	26.5	31.3	25.6	25.7	27.2	33.2	30.5	28.2	27.8	28.9
1.39	25.2	26.9	27.4	30.7	25.6	25.9	29.6	25.6	25.6	26.5	31.7	29.3	27.2	27.1	28.1
1.67	25.3	26.8	27.6	30.2	25.3	25.5	28.9	25.1	24.9	26	26.1	28	30.4	26.7	27.8

ตาราง 27 แสดงอุณหภูมิของผิวครีปที่ไม่อยู่ในแนวศูนย์กลางเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยในตาราง 28

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิผิวครีป ($q = 3.64 \text{ kW/m}^2$)																	
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_1						T_2						T_3					
		B_1	B_2	C	D_1	D_2	E	B_1	B_2	C	D_1	D_2	E	B_1	B_2	C	D_1	D_2	E
0.28	25.3	50.4	50.4	54	49.5	48.5	54.3	45.6	47.3	51.3	46.5	46.5	42.3	42.2	42.2	41.3	39.3	41.1	41.6
0.56	25.2	39.3	39.3	42.8	38.6	38.6	39.5	36.6	36.6	42.3	42.8	43.8	38.1	36.3	34.4	34.3	30.1	34.4	33.8
0.83	25	35.5	34.5	34.4	32.3	36.4	33.7	33.1	33.1	34.6	30.4	34.5	31.2	28.8	33.5	31.1	29.6	33.5	29.6
1.11	25.2	33.2	33.2	34	30.2	35.6	32.3	32	32	32.4	31.8	31.2	30.6	29.2	32.4	30.3	30	31	29
1.39	25.2	30.9	30.9	30.2	30.7	30.7	30.8	30.3	30.3	30.3	30.1	30.1	30.5	29.1	29.1	30.4	29.2	29.2	29.3
1.67	25.3	30	30.6	29.6	30.5	30.5	30.5	29.8	29.8	29.6	29.5	29.5	29.6	28.9	28.9	28.1	28.9	28.9	28.2

ตาราง 28 แสดงอุณหภูมิบริเวณฐานของครีป อุณหภูมิครีปเฉลี่ย และอุณหภูมิผิวเฉลี่ยรวมของชุดครีป

u_∞	T_{in}	อุณหภูมิของผิวครีปเฉลี่ย ($q = 3.64 \text{ kW/m}^2$)												T_s
m/s	$^{\circ}\text{C}$	T_{base}			T_{fin}		T_1		T_2		T_3		$^{\circ}\text{C}$	
		A	B	D	C	E	B	D	B	D	B	D		
0.28	25.7	50.8	52	53.8	48.9	46.1	50.4	49	46.5	46.5	42.2	40.	53.2	
0.56	25.6	43	42.6	43.6	39.8	37.1	39.3	38.6	36.6	35.4	33.6	32.	40.6	
0.83	25.5	41.3	41.3	43.5	33.4	31.5	35	34.4	33.1	32.5	31.2	31.	36.5	
1.11	25.2	36.6	39.1	37.9	32.2	30.6	33.2	32.9	32	31.5	30.8	30.	34.2	
1.39	25.1	34.6	36.1	34.6	30.3	30.2	30.9	30.7	30.3	30.1	29.1	29.	32.3	
1.67	25.1	30.7	32.4	32	29.1	29.4	30.3	30.5	29.8	29.5	28.9	28.	31.2	

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ

เมื่อทำการทดลองและเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณมาเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือการคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง โดยมีขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้

ข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

- ขนาดของอุโมงค์ลม 0.7 ม. × 0.12 ม. × 1.02 ม.
- อุณหภูมิอากาศเข้าประมาณ 25 °C
- พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของครีบบีบเรียงแถว = 0.04365 m²
- พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของครีบบีบเรียงแถว = 0.04596 m²

1. การคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

$$D_h = \frac{4 \times \text{Cross sectional area for fluid flow}}{\text{Wetted perimeter}} \Rightarrow \frac{4ab}{2(a+b)} \quad (1)$$

$$= \frac{4 \times 0.12 \times 0.07}{2(0.12 + 0.07)}$$

$$D_h = 0.0884 \text{ m}$$

D_h คือ Hydraulic diameter, m

a คือความยาวของหน้าตัดอุโมงค์ลม, m

b คือความกว้างของหน้าตัดอุโมงค์ลม, m

2. การคำนวณหา ตัวเลขเรย์โนลด์

$$\text{Re} = \frac{u_\infty D_h}{\nu} \quad (2)$$

(ในกรณีที่ความเร็วอากาศ 0.28 m/s ที่อากาศเข้า 25.7 °C)

$$= \frac{0.28 \times 0.0884}{1.621 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 1527.90$$

Re คือค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Raynolds Number)

u_∞ คือความเร็วฟรีสตรีม, m/s

ν คือความหนืดจลน์ศาสตร์, m^2/s

3. การคำนวณหาพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนของครีป

$$A_s = A_p + A_f \quad (3)$$

A_s คือพื้นที่ถ่ายเทความร้อนโดยรวม, m^2

A_p คือพื้นที่ผิวที่ฐานที่สัมผัสกับอากาศ, m

A_f คือพื้นที่ผิวทั้งหมดของครีป, m^2

$$A_p = L_2 L_3 - \pi R^2 \cdot N_t \quad (4)$$

$$A_f = \pi (R+r) \cdot (L_1^2 + (R-r)^2)^{\frac{1}{2}} + \pi (R^2 + r^2) - \pi R^2 \cdot N_t \quad (5)$$

L_1 คือความสูงของครีป, m

L_2 คือความยาวผิวฐานครีปด้านที่อากาศไม่ไหลผ่าน, m

L_3 คือความยาวผิวฐานครีปด้านที่อากาศไหลผ่าน, m

R คือรัศมีครีปด้านใหญ่, m

r คือรัศมีครีปด้านเล็ก, m

N_t คือจำนวนครีป

3.1 ครีปแบบเรียงแถว(In-line)

$$\begin{aligned} A_{pi} &= (110 \times 100) - (\pi \times 6.5^2 \times 16) = 0.00888 \text{ m}^2 \\ A_{fi} &= 16 \times (\pi (6.5+3.62) \times (6.7^2 + (6.5-3.62)^2)^{\frac{1}{2}} + \pi (6.5^2 + 3.62^2) - \pi \times 6.5^2) = 0.03477 \text{ m}^2 \\ &= 0.00888 + 0.03477 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$A_{si} = 0.04365 \text{ m}^2$$

3.2 ครีบบนแบบสลับแถว (Staggered)

$$A_{ps} = (110 \times 100) - (\pi \times 6.5^2 \times 17) = 0.00874 \text{ m}^2$$

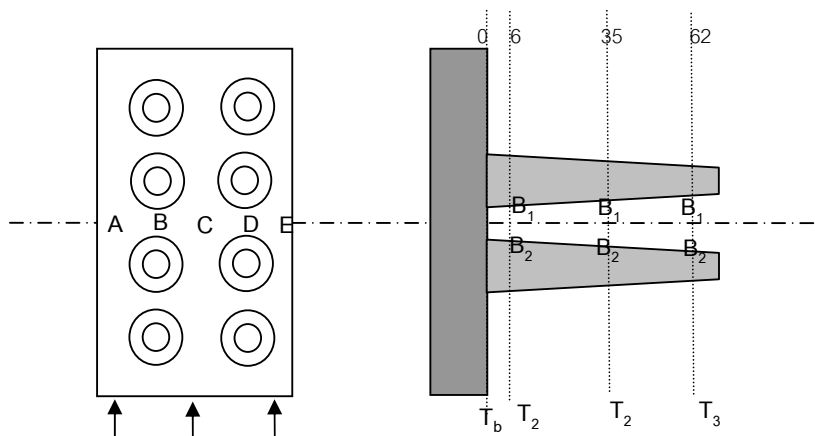
$$A_{fs} = 17 \times (\pi (6.5 + 3.62) \times (6.7^2 + (6.5 - 3.62)^2)^{\frac{1}{2}} + \pi (6.5^2 + 3.62^2) - \pi \times 6.5^2) = 0.03695 \text{ m}^2$$

$$= 0.00874 + 0.03695 \text{ m}^2$$

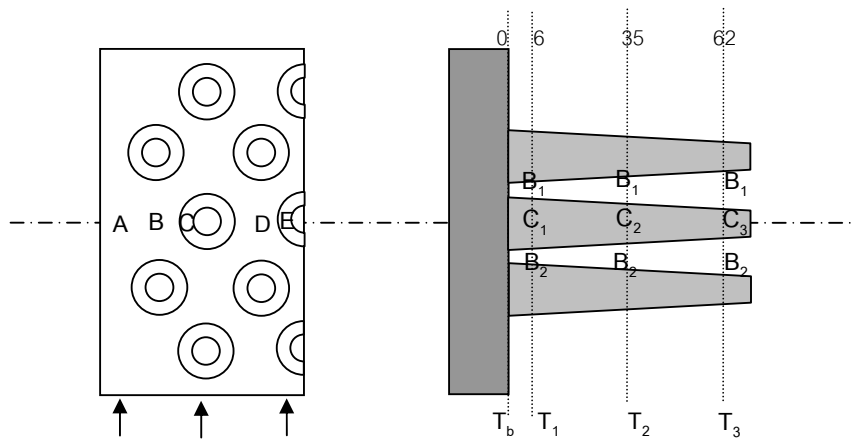
$$A_{ss} = 0.04569 \text{ m}^2$$

4. การคำนวณหาอุณหภูมิเฉลี่ย

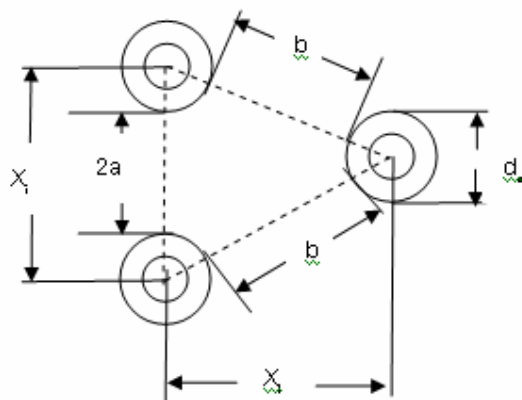
เนื่องจากชุดครีบทดลองเป็นแบบสมมาตร (Symmetry) ทั้งสองแบบ จึงทำการทดลองและศึกษาด้านซ้ายของชุดครีบบ้างเพียงครึ่งเดียว การวัดอุณหภูมิของผิวครีบบ้าง การวัดอุณหภูมิของผิวครีบบ้าง แบ่งออกเป็น 4 ระดับ คือบริเวณฐานของชุดครีบบ้างส่วนล่าง, กลาง, และปลายของครีบบ้าง ส่วนอุณหภูมิของอากาศแบ่งการวัดออกเป็น 3 ระดับ คือในแนวระดับของส่วนล่าง, กลาง, และปลายของครีบบ้างซึ่งอยู่ในระดับความสูงของครีบบ้าง 6, 35, 62mm. อากาศข้างนอกการวัดแบ่งเป็น 3 จุดเช่นกันคือที่แนวระนาบ T_1 , T_2 , T_3 การวัดในกรณีที่ครีบบ้างไม่อยู่ในแนวศูนย์กลางต้องทำการวัดความร้อนที่ผิวครีบบ้างทั้งด้านบน-ด้านล่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย และนำมาหาค่าเฉลี่ยโดยรวม แสดงในภาพประกอบ 41-43



ภาพประกอบ 39 แสดงจุดและระดับที่วัดอุณหภูมิครีบบ้างแบบเรียงแถว(In-line layout)



ภาพประกอบ 40 แสดงจุดและระดับที่วัดอุณหภูมิครีบบแบบสลับแถว(Staggered layout)



ภาพประกอบ 41 แสดงลักษณะและระยะของครีบบแบบสลับแถว(Staggered layout)

4.1 อุณหภูมิอากาศทางออกเฉลี่ย

$$\begin{aligned}\bar{T}_{out} &= (T_1 + T_2 + T_3) / 3 \\ &= (31 + 29.2 + 27.8) / 3 \\ \bar{T}_{out} &= 29.3^\circ\text{C}\end{aligned}$$

4.2 อุณหภูมิผิวฐานครีบบเฉลี่ย

4.2.1 ครีบบแบบเรียงแถว(In-line)

ที่ความเร็วอากาศ 0.278 m/s ค่าอัตราความร้อน 10 W

$$\begin{aligned}
 \overline{T_b} &= (T_{bA} + T_{bB} + T_{bC} + T_{bD} + T_{bE}) \\
 &= (35.8 + 39.2 + 34.9 + 36.5 + 32.3) / 5 \\
 \overline{T_b} &= 35.74 \text{ }^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}$$

4.2.2 ครีบบนแบบสลับแถว (Stagger)

$$\begin{aligned}
 \overline{T_b} &= (T_{bA} + T_{bB} + T_{bD}) \\
 &= (36.6 + 38.6 + 38.5) \\
 \overline{T_b} &= 37.9 \text{ }^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}$$

4.3 อุณหภูมิผิวครีบนเฉลี่ย

4.3.1 ครีบบนแบบเรียงแถว (In-line)

$$\begin{aligned}
 T_{1B} &= (B_1 + B_2) / 2 \Rightarrow (42.7 + 39.3) / 2 = 41 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_{1D} &= (D_1 + D_2) / 2 \Rightarrow (41.2 + 39.2) / 2 = 40.2 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_{2B} &= (B_1 + B_2) / 2 \Rightarrow (41.3 + 38.7) / 2 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_{2D} &= (D_1 + D_2) / 2 \Rightarrow (39.1 + 38.4) / 2 = 38.8 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_{3B} &= (B_1 + B_2) / 2 \Rightarrow (37.2 + 35.4) / 2 = 36.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_{3D} &= (D_1 + D_2) / 2 \Rightarrow (36.4 + 35.6) / 2 = 36 \text{ }^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \overline{T_f} &= (T_{1B} + T_{1D} + T_{2B} + T_{2D} + T_{3B} + T_{3D}) / 6 \\
 &= (41 + 40.2 + 40 + 38.8 + 36.3 + 36) / 6 \\
 \overline{T_f} &= 38.72 \text{ }^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}$$

4.3.2 ครีบบนแบบสลับแถว (Stagger)

$$\begin{aligned}
 T_{1B} &= (B_1 + B_2) / 2 \Rightarrow (31.4 + 33.4) / 2 = 32.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_C &= (T_{1C} + T_{2C} + T_{3C}) / 3 \Rightarrow (34 + 35.4 + 32.7) / 3 = 34 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_{1D} &= (D_1 + D_2) / 2 \Rightarrow (32.4 + 33.3) / 2 = 32.9 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_E &= (T_{1E} + T_{2E} + T_{3E}) / 3 \Rightarrow (32.8 + 31.2 + 30) / 3 = 31.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_{2B} &= (B_1 + B_2) / 2 \Rightarrow (31.1 + 32.4) / 2 = 31.8 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_{2D} &= (D_1 + D_2) / 2 \Rightarrow (31 + 32.4) / 2 = 31.7 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_{3B} &= (B_1 + B_2) / 2 \Rightarrow (30.5 + 31.4) / 2 = 31 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_{3D} &= (D_1 + D_2) / 2 \Rightarrow (30.9 + 31.1) / 2 = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \overline{T_f} &= (T_{1B} + T_C + T_{1D} + T_E + T_{2B} + T_{2D} + T_{3B} + T_{3D}) / 8 \\
 &= (32.4 + 32 + 32.9 + 31.3 + 31.8 + 31.7 + 31 + 31) / 8 \\
 &= 31.76 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

4.4 อุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยรวม

$$\begin{aligned}
 \overline{T_s} &= (\overline{T_b} + \overline{T_f}) / 2 \\
 &= (35.74 + 38.72) / 2 \\
 &= 37.2 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

4.5 อุณหภูมิอากาศบริเวณผิวครีปเฉลี่ย

$$\begin{aligned}
 \overline{T_a} &= (T_{1A} + T_{1c} + T_{1E} + T_{2A} + T_{2C} + T_{2E} + T_{3A} + T_{3C} + T_{3E}) / 9 \\
 &= (29.3 + 31.2 + 32.7 + 27.1 + 29.5 + 29.7 + 26.9 + 27.2 + 27.8) / 9 \\
 &= 29 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

4.6 การคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศ

$$m = \rho A_c u_\infty \quad (6)$$

$$= 1.1682 \times 0.0084 \times 0.278$$

$$= 0.00273 \text{ kg/s}$$

m คืออัตราการไหลของอากาศ, kg/s

ρ คือความหนาแน่นของอากาศขาเข้า, kg/m³

A_c คือพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม, m²

5. การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน

$$Q = m C_p (\overline{T_{out}} - T_{in}) \quad (7)$$

$$= 0.00276 \times 1006 \times (29.3 - 25.7)$$

$$= 9.99 \text{ W}$$

- Q คืออัตราการถ่ายเทความร้อน, W
 C_p คือความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, J/kg °C
 $\bar{T}_{out}$ คืออุณหภูมิเฉลี่ยอากาศขาออก, °C
 T_{in} คืออุณหภูมิขาเข้า, °C

6. การคำนวณหาอัตราความร้อน(Heat flux) ในการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 Q_{conv} &= \frac{Q_{elec} + Q_{out}}{2} & (7) \\
 &= (10 + 9.99)/2 \\
 &= 9.99 \text{ W}
 \end{aligned}$$

7. การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน

$$\begin{aligned}
 Q_{Aver} &= hA_s(\bar{T}_s - T_{in}) & (8) \\
 h &= \frac{Q_{Aver}}{A_s(\bar{T}_s - T_{in})} \\
 &= \frac{10.09}{0.04365 \times (37.2 - 25.7)} \\
 &= 20.1 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

- h คือสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน, W/m² °C
 A_s คือพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน, m²
 $\bar{T}_s$ คืออุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย, °C

8. การคำนวณหานัสเซลท์ (Nusselt number)

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (9)$$

$$= \frac{19.90 \times 0.0884211}{0.029759}$$

$$Nu = 59.13$$

Nu คือค่านัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)

k คือค่าการนำความร้อน,

ตาราง 39 แสดงการเปรียบเทียบค่าต่างๆจากผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณของครีป
ลักษณะแบบเรียงแถว(In-line) ที่ค่าฟลักซ์ความร้อน และความเร็วต่างๆ

$\bar{Q}$ (kW)	u_∞ (m/s)	Re	T_{in} °C	$\bar{T}_{out}$ °C		$\bar{T}_s$ °C		h (W/m ² °C)		Nu	
-	-	-	-	Exp.	Math.	Exp.	Math.	Exp.	Math.	Exp.	Math.
10.09	0.28	1527	25.7	29.3	29.3	37.2	37.3	20.1	19.9	67.0	66.2
	0.56	3056	25.6	27.6	27.4	33.0	32.7	31.2	32.7	104.7	109.6
	0.83	4530	25.5	26.8	26.7	30.3	30.6	48.4	45.6	162.7	153.4
	1.11	6064	25.2	26.2	26.1	29.2	29.2	57.6	57.9	194.3	195.4
	1.39	7596	25.1	25.9	25.8	28.6	28.5	66.3	67.7	223.9	228.5
	1.67	9127	25.1	25.7	25.7	28.2	28.2	75.7	75.8	255.6	256.0
20.08	0.28	1531	24.9	31.4	31.8	44.7	46.6	23.2	21.2	76.7	69.8
	0.56	3060	25.1	28.7	28.8	38.8	37.9	33.6	36.0	111.7	120.0
	0.83	4537	25	27.5	27.5	34.0	34.3	51.1	49.7	171.2	166.5
	1.11	6072	24.8	26.7	26.7	32.2	32.3	62.4	61.1	209.7	205.2
	1.39	7604	24.8	26.3	26.3	31.3	31.2	71.3	71.9	239.9	242.0
	1.67	9135	24.8	26	26	30.5	30.6	80.7	79.9	271.8	268.9
30.10	0.28	1526	26	35.8	36.5	54.7	54.3	23.2	23.6	75.4	76.7
	0.56	3060	25.1	31	30.5	45.0	43.4	33.5	36.5	110.4	120.7
	0.83	4529	25.6	29.4	29.2	38.1	38.3	53.3	52.4	177.3	174.1
	1.11	6057	25.6	28.1	28.3	35.7	35.8	66.3	65.3	221.2	218.1
	1.39	7584	25.6	27.8	27.8	34.4	34.3	75.7	76.7	253.3	256.5
	1.67	9129	25	26.8	26.9	32.8	32.7	85.4	86.6	286.6	290.4
40.12	0.28	1531	24.9	38.9	38.6	61.5	60.6	25.1	25.7	80.9	83.1
	0.56	3061	25	32.3	32.3	51.3	47.7	35.0	40.6	114.2	133.3
	0.83	4537	25	30.1	30	41.5	41.7	55.7	55.2	184.6	182.9
	1.11	6068	25	28.8	28.8	38.0	38.2	70.7	69.7	235.5	232.0
	1.39	7599	25	28	28	36.3	36.1	81.3	83.2	271.5	277.8
	1.67	9132	24.9	27.3	27.3	34.9	34.6	91.9	95.1	307.5	318.1

ตาราง 40 แสดงการเปรียบเทียบค่าต่างๆจากผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณของครีบลักษณะ
แบบสลับแถว(Staggered) ที่ค่าฟลักซ์ความร้อน และความเร็วต่างๆ

$\bar{Q}$ (kW)	u_∞ (m/s)	Re	T_{in} °C	$\bar{T}_{out}$ °C		$\bar{T}_s$ °C		h (W/m ² °C)		Nu	
				Exp.	Math.	Exp.	Math.	Exp.	Math.	Exp.	Math.
10.16	0.28	1546	25.7	29.1	28.9	33.5	34.3	28.6	25.7	95.9	86.1
	0.56	3094	25.6	27.2	27.2	30.5	30.5	45.4	45.6	152.7	153.3
	0.83	4587	25.5	26.4	26.4	29.1	29.0	62.3	63.6	210.0	214.3
	1.11	6140	25.2	26.1	26	28.0	28.0	80.9	80.0	273.2	270.3
	1.39	7691	25.1	25.8	25.7	27.4	27.4	95.9	95.1	324.2	321.4
	1.67	9240	25.1	25.6	25.6	27.0	27.1	115.3	110.1	389.9	372.5
20.13	0.28	1550	24.9	33	32.3	39.6	41.5	30.0	26.6	99.7	88.0
	0.56	3099	25.1	29.6	29.2	33.8	34.3	50.7	47.9	169.7	160.4
	0.83	4594	25	27.9	27.6	31.5	31.5	67.6	67.8	227.3	228.0
	1.11	6148	24.8	27.1	27.1	30.0	30.1	85.3	84.0	287.3	282.9
	1.39	7698	24.8	26.4	26.4	29.0	29.2	105.2	100.2	355.1	338.0
	1.67	9249	24.8	25.8	25.8	28.4	28.6	121.5	115.4	410.2	389.7
30.28	0.28	1545	26	36.4	35.4	47.5	49.8	30.8	27.8	101.1	91.1
	0.56	3099	25.1	31.1	30.8	37.5	38.6	53.5	49.1	178.1	163.3
	0.83	4585	25.6	29	29	34.4	35.0	75.3	70.5	251.9	235.6
	1.11	6132	25.6	28.2	27.9	32.9	33.1	90.8	88.4	304.3	296.1
	1.39	7679	25.6	27.4	27.3	31.6	31.8	110.5	106.9	370.9	358.9
	1.67	9243	25	26.8	26.8	30.2	30.4	127.5	122.7	429.2	413.2
40.24	0.28	1550	24.9	39.9	39.9	52.8	56.1	31.6	28.2	102.9	91.6
	0.56	3100	25	32.7	32.6	40.6	41.6	56.6	53.1	187.8	175.8
	0.83	4594	25	30	30	36.0	36.7	80.4	75.3	268.6	251.1
	1.11	6144	25	28.9	28.9	33.9	34.2	99.5	95.7	333.3	320.5
	1.39	7693	25	28.1	28.1	32.2	32.6	122.3	115.9	410.7	388.9
	1.67	9246	24.9	27.8	27.7	31.2	31.5	139.8	133.4	470.1	448.6

อภิธานศัพท์

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	=	พื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน, $m.m.^2$
C_p	=	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, $J/kg.K$
D_h	=	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของไหลที่เกิดจากการไหลผ่าน, $m.m.$
$\bar{d}$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของครีป, $m.m.$
E	=	สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equation)
f	=	สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน
g	=	ความเร่งอันเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก, m/s^2
h	=	สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน, $W/m^2.^{\circ}C$
I	=	ค่าความเข้มของการปั่นป่วน (Turbulence intensity)
K	=	พลังงานที่เกิดจากการปั่นป่วนของการไหล
k	=	ค่าการนำความร้อน, $W/m.K$
L	=	ค่าคุณลักษณะความยาว (Characteristic length)
L_1	=	ความยาวครีป, $m.m.$
L_2	=	ความยาวผิวฐานครีปด้านที่อากาศไม่ไหลผ่าน, $m.m.$
L_3	=	ความยาวผิวฐานครีปด้านที่อากาศไหลผ่าน, $m.m.$
$\dot{m}$	=	อัตราการไหลของมวลของของไหล, kg/s
Nu	=	ค่านัสเซลต์นัมเบอร์ (Nusselt number)
N_t	=	จำนวนครีปทั้งหมด
Pr	=	ตัวเลขพรานด์เติล (Prandtl number)
Q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน, W
q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่, W/m^2
$\dot{q}$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยปริมาตร, W/m^3
R	=	รัศมีครีปด้านใหญ่, $m.m.$
r	=	รัศมีครีปด้านเล็ก, $m.m.$
Re	=	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Raynolds number)

T	=	อุณหภูมิ, °C
V	=	ปริมาตรการแลกเปลี่ยนความร้อน, m.m. ³
$\dot{V}$	=	ปริมาตรอัตราการไหลของอากาศ, m.m. ³ /s
X_r	=	ระยะห่างของครีปที่อากาศไหลผ่าน, m.m.

สัญลักษณ์ภาษากรีก

u_∞	=	ความเร็วฟรีสตรีม, m/s
ν	=	ความหนืดจลน์ศาสตร์, m ² /s
μ	=	ความหนืดพลศาสตร์, kg/ms
ρ	=	ความหนาแน่น, kg/m ³
ε	=	การกระจายของพลังงานที่เกิดขึ้น
Δ	=	ค่าการเปลี่ยนแปลง
η	=	ประสิทธิภาพ
∞	=	ตัวแปรการไหลของอากาศ
β	=	สัมประสิทธิ์การขยายตัว
α	=	ค่าการแผ่กระจายความร้อน, m ² /s
τ	=	ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress) N/m ²

ตัวกำกับล่าง

t	=	ค่าโดยรวม
p	=	ในส่วนบริเวณฐานครีป
f	=	ในส่วนผิวของครีป
i	=	ลักษณะครีปแบบเรียงแถว
s	=	ลักษณะครีปแบบสลับแถว
$cond$	=	การนำความร้อน
$conv$	=	การพาความร้อน
$elec$	=	ไฟฟ้า
w	=	ผิวครีป,ผนัง
out	=	ทางออก

in = ทางเข้า

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายอนุสรณ์ สุขเกษม
วันเดือนปีเกิด	8 ตุลาคม 2501
สถานที่เกิด	อุทัยธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	209/49 ซอย 1 โครงการ 5 หมู่บ้านไฟโรจน์กิจจา ถนน บางนา-ตราด เขตบางนา กรุงเทพฯ 10250
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	เจ้าหน้าที่บริหารงานช่าง 6
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ส่วนฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากร น้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2517	มัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนอุทัยวิทยเวท
พ.ศ. 2520	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ จากโรงเรียนการช่างอุทัยธานี
พ.ศ. 2522	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง จากวิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษาวิทยาเขตเทคนิคตาก
พ.ศ. 2545	อุดมศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ทุมธานี ประเทศไทย
พ.ศ. 2549	บัณฑิตศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ