

การศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหล  
ในช่องการไหลที่มีลักษณะผนังเป็นลอน

ปริญญานิพนธ์  
ของ  
กীরติ กรกำจายฤทธิ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
เมษายน 2551

การศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหล  
ในช่องการไหลที่มีลักษณะผนังเป็นลอน

ปริญญานิพนธ์  
ของ  
กীরติ กรกำจายฤทธิ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
เมษายน 2551  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหล  
ในช่องการไหลที่มีลักษณะผนังเป็นลอน

บทคัดย่อ  
ของ  
กิริติ กรกำจายฤทธิ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
เมษายน 2551

กิริติ กรกำจายฤทธิ์. (2551). การศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลในช่อง  
การไหลที่มีลักษณะผนังเป็นลอน. ปริญญาานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ :  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ดร.ไพศาล นาผล,  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ.

งานวิจัยนี้ได้เสนอการศึกษา เกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลในช่องการ  
ไหลที่มีลักษณะผนังเป็นลอน โดยศึกษาถึงผลของลักษณะของลอนและการวางตำแหน่งของลอนที่มี  
ผลต่อการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อม ซึ่งลักษณะของลอนที่ใช้ศึกษามีดังนี้คือ แผ่นเรียบ ลอน  
โค้งขนาด 6 มม. ลอนโค้งขนาด 12 มม. ลอนสี่เหลี่ยมคางหมู และลอนสามเหลี่ยม การวางตำแหน่ง  
ลอนมี 2 ลักษณะ คือวางตำแหน่งลอนตรงกัน และวางตำแหน่งลอนเยื้องกัน ตัวเลขเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์  
ของอากาศอยู่ในช่วง 1400-2400 ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  
 $k - \epsilon$  มาตรฐาน ในการหาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตร  
สี่เหลี่ยมของจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ที่มีรูปแบบการวางกริดแบบเป็นโครงสร้าง (structured uniform  
grids) ในรูปแบบ 2 มิติ

จากผลที่ได้จากการคำนวณนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้อง  
กันดี พบว่าค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของแผ่นทดสอบที่มีลักษณะผนังเป็นลอนสามเหลี่ยมจะมีค่าสูงสุด  
รองลงมาคือ ลอนสี่เหลี่ยมคางหมู ลอนโค้งขนาด 6 มม. ลอนโค้งขนาด 12 มม. และแผ่นเรียบตามลำดับ  
การวางตำแหน่งลอนตรงกันจะให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูงกว่าการวางตำแหน่งลอนเยื้องกันทั้งนี้ทำให้เกิด  
การไหลแบบหมุนวน มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นแต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้ความดันตก  
คร่อมเพิ่มขึ้นด้วย

คำสำคัญ : ลักษณะการถ่ายเทความร้อน คุณลักษณะการไหล ช่องการไหลที่มีลักษณะผนัง  
เป็นลอน ความดันตกคร่อม

STUDY ON THE HEAT TRANSFER AND FLOW CHARACTERISTICS  
IN THE WAVY-WALL CHANNELS

AN ABSTRACT

BY

KEERATI KORNKUMJAIRIT

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

April 2008

Keerati kornkumjairit. (2008). *Study on the Heat Transfer and Flow Characteristics in the Wavy wall Channels*. Master thesis, M.Eng.(Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Dr.Paisarn Naphon, Asst. Prof. Dr. Jutarat Kurujareon,

In the present study the heat transfer and flow characteristics in the Wavy-wall Channels. Effect of wavy-wall channels characteristics and position ribs on the heat transfer and pressure drop are considered. The wavy plate with the characteristics of flat plate, arc 6 mm., arc 12 mm., trapezoidal and triangular. In addition, the array of ribs is placed in in-Line and staggered arrangements. Experiments were performed at various air Reynolds number varying of 1400-2400. The  $k-\varepsilon$  standard turbulence model is employed to simulate the flow and heat transfer development. A finite volume method with an structured uniform grid system is employed for solving the two-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. Nusselt number obtained from triangular wavy are the highest, trapezoidal, arc 6 mm., arc 12 mm., and flat plate respectively. The In-Line arrangements provide higher Nusselt number than the staggered arrangement. However the pressure drops obtained from the wavy-wall channels also increase.

**Keywords:** Heat transfer characteristics / Flow characteristics / Wavy-channels /

Pressure drop

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายทอดความร้อนและการไหลในช่องการไหลที่มีลักษณะผนังเป็นลอน

ของ

กীরติ กรกำจายฤทธิ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญสิริ จีระเดชากุล)

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. 2551

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน

(อาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล)

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

..... กรรมการ

(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมมมมงคล)

## ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล ประธานกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ที่ให้โอกาสในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ แนะนำพร้อมให้ความรู้จนสำเร็จและ ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ครูเจริญ ที่กรุณาให้คำปรึกษาให้แนวคิดในการวิเคราะห์ และช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น ในการทำปริญญานิพนธ์จนสมบูรณ์

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

ขอขอบพระคุณ พท.ผศ.ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง และ ผศ.ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร ที่เอื้อเฟื้อโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ พี่ ที่ได้อบรมสั่งสอนรวมทั้งครอบครัวผู้วิจัย ที่ให้กำลังใจที่ดี และขอขอบคุณ เพื่อนๆ ที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

กิริติ กรกำจายฤทธิ์

## สารบัญ

| บทที่                                                        | หน้า |
|--------------------------------------------------------------|------|
| 1 บทนำ.....                                                  | 1    |
| ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                          | 1    |
| วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....                             | 1    |
| ขอบเขตของโครงการวิจัย.....                                   | 1    |
| การทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                     | 2    |
| 2 สมการพื้นฐานและการคำนวณทางพลศาสตร์.....                    | 6    |
| สมการพื้นฐาน .....                                           | 6    |
| แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน.....                               | 8    |
| ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method).....                | 9    |
| การดิสครีตไทเซชัน (Discretisation).....                      | 10   |
| การประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว.....                         | 12   |
| กระบวนการหาคำตอบ (Solution algorithm).....                   | 16   |
| เงื่อนไขขอบ (Boundary condition).....                        | 18   |
| การหาจำนวนกริดที่เหมาะสม.....                                | 20   |
| ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการจำลอง .....                       | 23   |
| 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....                                | 24   |
| ส่วนประกอบของชุดทดลอง.....                                   | 24   |
| วิธีการทดลอง.....                                            | 33   |
| ตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....                             | 34   |
| 4 ผลและการวิเคราะห์.....                                     | 35   |
| การเปรียบเทียบผลจากการทดลอง.....                             | 36   |
| การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการคำนวณ..... | 43   |
| ผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขของแผ่นทดสอบที่ตัวแปรต่างๆ..... | 51   |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่                                | หน้า    |
|--------------------------------------|---------|
| 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....             | 61      |
| สรุป.....                            | 61      |
| ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต..... | 62      |
| <br>บรรณานุกรม.....                  | <br>63  |
| <br>ภาคผนวก.....                     | <br>66  |
| ภาคผนวก ก.....                       | 67      |
| ภาคผนวก ข.....                       | 95      |
| อภิธานศัพท์.....                     | 104     |
| <br>ประวัติย่อผู้วิจัย.....          | <br>107 |

## บัญชีตาราง

| ตาราง                                                                                                                               | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 ข้อมูลของแผ่นทดสอบ.....                                                                                                           | 26   |
| 2 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเรียบ แรงดันไฟฟ้าของ<br>heater 20 volt.....                                                     | 68   |
| 3 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเรียบ แรงดันไฟฟ้าของ<br>heater 25 volt.....                                                     | 69   |
| 4 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเรียบ แรงดันไฟฟ้าของ<br>heater 30 volt.....                                                     | 70   |
| 5 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มิลลิเมตร<br>โดยวาง ตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt.....       | 71   |
| 6 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มิลลิเมตร<br>โดยวาง ตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 25 volt.....       | 72   |
| 7 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มิลลิเมตร<br>โดยวาง ตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 30 volt .....      | 73   |
| 8 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มิลลิเมตร<br>โดยวาง ตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt.....    | 74   |
| 9 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มิลลิเมตร<br>โดยวาง ตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 25 volt.....    | 75   |
| 10 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มิลลิเมตร<br>โดยวาง ตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 30 volt.....   | 76   |
| 11 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มิลลิเมตร<br>โดยวาง ตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt.....     | 77   |
| 12 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มิลลิเมตร<br>โดยวาง ตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 25 volt .....    | 78   |
| 13 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มิลลิเมตร<br>โดยวาง ตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 30 volt.....     | 79   |
| 14 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มิลลิเมตร<br>โดยวาง ตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt ..... | 80   |

### บัญชีตาราง (ต่อ)

[illegible]

## บัญชีภาพประกอบ

| ภาพประกอบ                                                                                                                                                                                                      | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 แสดงส่วนประกอบของความเร็วที่ขึ้นอยู่กับเวลา.....                                                                                                                                                             | 7    |
| 2 แสดงปริมาตรควบคุม 3 มิติ.....                                                                                                                                                                                | 10   |
| 3 แสดงการประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง.....                                                                                                                                                 | 13   |
| 4 แสดงการประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง.....                                                                                                                                                   | 13   |
| 5 แสดงการประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก.....                                                                                                                                                             | 14   |
| 6 แสดงการคำนวณของโปรแกรม.....                                                                                                                                                                                  | 22   |
| 7 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง.....                                                                                                                                                                          | 25   |
| 8 แสดงอุปกรณ์ในขณะที่ทำการทดลอง.....                                                                                                                                                                           | 26   |
| 9 แสดงลักษณะการวางตำแหน่งของแผ่นทดลอง.....                                                                                                                                                                     | 26   |
| 10 แสดงลักษณะของแผ่นทดลอง.....                                                                                                                                                                                 | 27   |
| 11 แสดงชุดการทดลอง.....                                                                                                                                                                                        | 27   |
| 12 แสดงช่องการไหลของอากาศเข้า.....                                                                                                                                                                             | 28   |
| 13 แสดงลักษณะของ Straightener.....                                                                                                                                                                             | 28   |
| 14 แสดงชุดควบคุมความเร็วของพัดลมและกระแสไฟของฮีตเตอร์.....                                                                                                                                                     | 29   |
| 15 แสดงอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ (Data Logger).....                                                                                                                                                            | 29   |
| 16 แสดงอุปกรณ์วัดความดัน.....                                                                                                                                                                                  | 30   |
| 17 แสดงอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า.....                                                                                                                                                                               | 30   |
| 18 แสดงแผ่นทดสอบชนิดผิวเรียบ.....                                                                                                                                                                              | 31   |
| 19 แสดงแผ่นทดสอบชนิดผิวเป็นลอนโค้งขนาด 6 มิลลิเมตร.....                                                                                                                                                        | 31   |
| 20 แสดงแผ่นทดสอบชนิดผิวเป็นลอนโค้งขนาด 12 มิลลิเมตร.....                                                                                                                                                       | 32   |
| 21 แสดงแผ่นทดสอบชนิดผิวเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู.....                                                                                                                                                            | 32   |
| 22 แสดงแผ่นทดสอบชนิดผิวเป็นลอนสามเหลี่ยม.....                                                                                                                                                                  | 33   |
| 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นทดสอบกับ<br>เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 12 มม.<br>โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอน ตรงกันและเยื้องกันที่ $q = 1.11 \text{ kW/m}$ .... | 36   |

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ                                                                                                                                                                                                                                         | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นทดสอบกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์<br>ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู โดยลักษณะการวางตำแหน่ง<br>เยื้องกันที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ.....                                                     | 37   |
| 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของอากาศทดสอบกับ<br>เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. โดยลักษณะ<br>การวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกัน $q = 1.11 \text{ kW/m}^2$ .....                              | 38   |
| 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์<br>ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมูและแผ่นทดสอบ<br>ผิวเรียบ โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนเยื้องกันที่ $q = 1.11 \text{ kW/m}^2$ .....            | 39   |
| 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพา ความร้อนกับเรย์โนลด์ส์นัม<br>เบอร์ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. ลอนโค้งขนาด 12 มม.<br>และแผ่นทดสอบผิวเรียบ. โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนเยื้องกันที่<br>$q = 1.11 \text{ kW/m}^2$ ..... | 39   |
| 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซลล์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์<br>ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. ลอนโค้งขนาด 12 มม.<br>และแผ่นทดสอบผิวเรียบโดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกัน<br>ที่ $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$ .....            | 40   |
| 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซลล์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์<br>ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมู และแผ่นเรียบ<br>โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนเยื้องกัน ที่ $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$ .....                         | 41   |
| 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของความดันกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์<br>ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. โดยลักษณะการวางตำแหน่ง<br>ตรงกันและลอนเยื้องกัน ที่ $q = 0.52 \text{ kW/m}^2$ .....                                            | 42   |
| 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของความดันกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์<br>ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกัน<br>และลอนเยื้องกัน ที่ $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$ .....                                                | 42   |

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ                                                                                                                                                                                                                                        | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นทดสอบกับ<br>เรย์โนลด์์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม<br>โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกันและลอนเอียงกัน ที่ $q = 1.11 \text{ kW/m}^2$ .....                                       | 43   |
| 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นทดสอบกับ<br>เรย์โนลด์์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม.<br>โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนเอียงกัน ที่ ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ .....                                                  | 44   |
| 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของอากาศกับ<br>เรย์โนลด์์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม.<br>โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกันและลอนเอียงกัน ที่ $q = 0.52 \text{ kW/m}^2$ .....                                 | 45   |
| 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของอากาศกับ<br>เรย์โนลด์์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยลักษณะ<br>การวางตำแหน่งตรงกันและลอนเอียงกัน ที่ $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$ .....                                    | 45   |
| 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกับเรย์โนลด์์นัมเบอร์<br>ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม สีเหลี่ยมคางหมู และแผ่นทดสอบ<br>ผิวเรียบ โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกัน ที่ $q = 1.11 \text{ kW/m}^2$ .....                 | 46   |
| 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกับเรย์โนลด์์นัมเบอร์<br>ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม สีเหลี่ยมคางหมู และแผ่นทดสอบ<br>ผิวเรียบ โดยลักษณะการวางตำแหน่งเอียงกัน ที่ $q = 1.11 \text{ kW/m}^2$ .....               | 47   |
| 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลล์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์์นัมเบอร์<br>ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. โดยลักษณะการวาง<br>ตำแหน่งตรงกันและเอียงกัน ที่ $q = 0.52 \text{ kW/m}^2$ .....                                               | 48   |
| 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลล์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์์นัมเบอร์<br>ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. ลอนโค้งขนาด 12 มม.<br>และแผ่นทดสอบผิวเรียบเรียบโดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกันและเอียงกัน<br>ที่ $q = 0.52 \text{ kW/m}^2$ ..... | 49   |
| 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลล์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์์นัมเบอร์<br>ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม สีเหลี่ยมคางหมู. และแผ่นทดสอบ<br>ผิวเรียบโดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกันและเอียงกัน ที่ $q = 1.11 \text{ kW/m}^2$ ..                 | 49   |

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ                                                                                                                                                                                              | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของความดันกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์<br>ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกัน<br>และลอนเยื้องกัน ที่ $q = 0.52 \text{ kW/m}^2$ ..... | 50   |
| 42 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคอนทิวรัลความเร็วกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบ<br>ที่มีผนังเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มม. โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกันและ<br>ลอนเยื้องกัน ที่ $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$ .....        | 51   |
| 43 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคอนทิวรัลความเร็วกับการไหลของแผ่นทดสอบ<br>ที่มีผนังเป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มม. โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกันและ<br>ลอนเยื้องกัน ที่ $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$ .....            | 52   |
| 44 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคอนทิวรัลความเร็วกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบ<br>ที่มีผนังเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกันและ<br>ลอนเยื้องกัน ที่ $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$ .....       | 53   |
| 45 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคอนทิวรัลความเร็วกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบ<br>ที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกันและลอนเยื้องกัน<br>ที่ $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$ .....              | 54   |
| 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบ ที่มีผนัง<br>เป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มม. โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกันและลอนเยื้องกัน<br>ที่ $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$ .....                    | 56   |
| 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบ ที่มีผนัง<br>เป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มม. โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกันและลอนเยื้องกัน<br>ที่ $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$ .....                   | 57   |
| 48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบ ที่มีผนัง<br>เป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกันและลอนเยื้องกัน<br>ที่ $q = 1.11 \text{ kW/m}^2$ .....                   | 58   |
| 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบ ที่มีผนัง<br>เป็นลอนสามเหลี่ยม โดยลักษณะการวางตำแหน่งตรงกันและลอนเยื้องกัน<br>ที่ $q = 0.52 \text{ kW/m}^2$ .....                         | 59   |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การอนุรักษ์พลังงานมีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบอุตสาหกรรม เนื่องจากวิกฤตการณ์ราคาของพลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ การออกแบบหรือการวางแผนการเลือกใช้พลังงานในงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีความคุ้มค่าในการลงทุน กระบวนการที่นำมาใช้ต้องเกิดประโยชน์สูงสุด พลังงานความร้อนเป็นอีกพลังงานหนึ่งที่สำคัญต่อระบบอุตสาหกรรม จึงมีการพัฒนากระบวนการที่เกี่ยวข้องกับความร้อน ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญเป็นลำดับต้นๆ เป็นเครื่องมือที่อาศัยการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานตั้งแต่สองตัวขึ้นไป ดังนั้น การเพิ่มขีดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะเป็นการลดต้นทุนทางด้านพลังงาน การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ฉะนั้นการศึกษาด้านพารามิเตอร์ต่างๆ จึงมีความสำคัญทำให้ทราบถึงผลกระทบของลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลในช่องการไหลแบบลอน

ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ จะศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลที่มีลักษณะผนังเป็นลอนโดยวิธีการที่ทำให้พื้นผิวมีลักษณะต่างๆ ที่ทำให้เกิดผลกระทบการไหลของสารทำงาน (Passive techniques) เช่น ความกว้างของลอน ความสูงของลอน ที่มีผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนและนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

#### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการไหลในช่องการไหลที่มีผนังเป็นลอน
2. เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน เช่น ลักษณะของลอน ฟลักซ์ความร้อนและความกว้างของลอน

#### ขอบเขตของการวิจัย

1. เป็นการศึกษาทั้งการคำนวณเชิงตัวเลขและการทดลอง
2. ทำการศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลในช่องการไหลที่มีลักษณะผนังเป็นลอนโค้ง ลอนสามเหลี่ยม และลักษณะผนังเป็นลอนรูปสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งมีขนาดต่างๆ ดังแสดงในตาราง 1
3. ใช้อากาศเป็นสารทำงาน (Working Fluid) โดยที่ไหลในช่องการไหลที่มีลักษณะผนังเป็นลอน
4. เป็นการศึกษาภายใต้สภาวะฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat Flux)

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ได้ทราบถึงพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นรวมทั้งหลักการการถ่ายเทความร้อน และการไหลในช่องการไหล ที่ผนังมีลักษณะเป็นลอนที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน เช่น รูปร่างของลอน ความเข้มของความร้อน และความกว้างของลอน
2. ได้นำข้อมูลจากการวิจัยไปพัฒนาและปรับปรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อไป

## การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาและการวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะผนังเป็นรอยหยัก (Corrugate channel) นั้นได้มีการทำมาอย่างต่อเนื่องซึ่งจะศึกษาถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องการไหลลักษณะต่างๆ เพื่อนำค่าที่ได้นำไปปรับปรุงลักษณะช่องการไหลให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น

ยาลาแมนชิลี และคณะ (Yalamanchili; et al. 1995) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงลักษณะการไหลของสารละลาย โพลีเมอร์ที่ไหลผ่านช่องทางแบบคลื่น ในช่วง Reynolds number  $50 < Re < 1,000$  พบว่าที่ความยาวของคลื่น 10.16 ซม. ความสูงของคลื่น 0.22 ซม. จะมีแรงเสียดทานสูงในขณะที่ความยาวของคลื่น 2.54 ซม. สูง 0.05 ซม. จะมีการไหลราบเรียบกว่าโดยที่อัตราส่วนความสูงต่อความยาวของคลื่นเท่ากัน ( $a/\lambda = 0.02$ )

ซอร์เวย์อร์ และคณะ (Sawyers; et al. 2998) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบลอน สามมิติ ด้วยการใช้การไหลแบบ Lamina flow ในช่วง Reynolds number  $0 < Re < 250$  ซึ่งใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหล ซึ่งในลักษณะสองมิติการไหลในแนวตั้งฉากในแนวแกน x-y มีการถ่ายเทความร้อนที่สูงจากการสังเกต ส่วนในลักษณะสามมิติในแนวแกน x-y-z การไหลจะมีลักษณะทิศทางการไหลทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีเล็กน้อย ผลปรากฏว่าความสูงของช่องหรือพื้นที่มีผลกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

เบเรียเซียส และเดเวียนเน (Bereiziat; & Devienne. 1999) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติพิเศษของNewtonian และ non-Newtonian ของของไหลในช่องการไหลแบบเป็นคลื่นสองมิติมุมเอียง  $45^\circ$  ในช่วง Reynolds number 1360, 2728, 4080 และ 6380 โดยใช้สองวิธีในการทดลองวิธีที่หนึ่งใช้ electrochemical method สำหรับวัดแรงเฉือนที่การไหลกระทำกับผนัง (S) วิธีที่สองใช้เลเซอร์วัด velocimetry สำหรับพิจารณาความหนาแน่นของความเร็วในแนวแกน จากการสังเกตการไหลในช่องเป็นคลื่นสองมิติจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของอัตราการไหลของอากาศ (Re) ผลลัพธ์แสดงว่าลักษณะพิเศษของช่องการไหลมีอิทธิพลกับการไหลที่แตกต่างกันตามรูปทรง พื้นที่มีผลในการถ่ายเทความร้อน

แฟบ-บริค (Fabbri. 2000) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมที่สุดในช่องการไหลแบบผนังรอยหยักในช่วง Reynolds number 100 ถึง 500 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์ทางไฟในอีลิเมนต์ โดยพิจารณาภาวะความเร็วของการไหล และอุณหภูมิที่มีผลกระทบกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูง ในช่องการไหลแบบรอยหยักที่มีปริมาตร และความดันที่เหมาะสมในการใช้งานต่อไป

แกรเดกร และเลบัวเช (Gradeck; & Lebouche. 2000) ได้ทำการทดลองใช้แก๊สกับของเหลวรวมกัน ไหลผ่านในแนวราบเข้าช่องการไหลช่องแบบรอยหยักแบบสองมิติ  $\alpha = 90^\circ$  และแบบสามมิติ  $\alpha = 60^\circ$  เพื่อตรวจสอบลักษณะการไหลผ่านช่องการไหลแบบรอยหยัก โดยวัดค่าการไหลด้วยวิธี electrochemical มาทำการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของแก๊สกับของเหลว ผลปรากฏว่าลักษณะการไหลของแก๊สกับของเหลวมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด อันเนื่องมาจากลักษณะของช่องการไหลแบบรอยหยัก ทำให้มีผลโดยตรงกับการไหล และความดันที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

เซนเดน และสโคลเฮเดน (Senden; & Skolheden. 2000) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบผนังหยักเปรียบเทียบกับผนังเรียบในช่วง Reynolds number  $800 < Re < 5000$  พบว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนในผนังหยักสูงกว่าผนังเรียบแต่มีแรงดันตกคร่อมมากกว่าแต่สามารถเพิ่มความสูงและความยาวของรอยหยักเพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างการถ่ายเทความร้อนและแรงดันที่ตกคร่อม

ซิมเมอร์ และคณะ (Zimmerer; et al. 2001) ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบความร้อนกับมวลที่การเคลื่อนที่ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นลักษณะช่องการไหลแบบผนังรอยหยักมุมเอียง  $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  และ  $72^\circ$  ในช่วง Reynolds number 200, 1000, 2000, และ 10000 ซึ่งมีลักษณะรูปทรงแตกต่างกันโดยที่เป็นช่องรูปทรงกระบอกตัดตามขวางวางเป็นชั้นๆ มีมุมเอียง (inclination angle  $\varphi$ ) ความยาวของรอยหยัก ( $\lambda$ ) และรูปร่างของรอยหยัก (a) ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ จะทำให้การถ่ายเทความร้อนภายในมีความเปลี่ยนแปลงตามลักษณะโครงสร้าง ความเร็วของการไหล และความกดดันมีอิทธิพลกับความร้อนและมวลที่เกิดการถ่ายเท สรุปว่าจากการวิเคราะห์การเปรียบเทียบได้ว่าความสูงของช่องผนังแบบรอยหยัก ความกว้างของช่องมีผลโดยตรงกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่ถ่ายเทความร้อน

หวัง และเฉิน (Wang; & Chen. 2002) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนในช่องแบบผนังคลื่นโดยใช้การไหลผ่านพื้นที่คดเคี้ยวที่รวมกันในช่วง Reynolds number 100, 300, และ 500 ซึ่งมีผลกระทบกับรูปทรงของคลื่น ตัวเลข Reynolds number และ Prandtl number บนแรงเสียดสีที่ผิวและ Nusselt number ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานทำให้ตัวเลข Reynolds number เพิ่มขึ้นและ Nusselt number เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากช่วงความยาวของคลื่นของช่องการไหลจึงมีผลกับการถ่ายเทความร้อนโดยเฉพาะสำหรับตัวเลข Reynolds number สูงๆ

เอลิและฮานากะ (Ali; & Hanaoka. 2002) ได้ทำการทดลองศึกษาผลกระทบจากการไหลแบบราบเรียบโดยบังคับการถ่ายความร้อนในช่องการไหลแบบรอยหยักร่องตัววี ซึ่งให้ความร้อนโดยการแผ่รังสีและฉนวนกันความร้อน โดยพารามิเตอร์ของการไหลช่วง  $Re$  750-2050 การให้ความร้อน 400,700 และ 1000  $W/m^2$  อุณหภูมิของอากาศ 12.4-59.4 องศาเซลเซียส มุมของช่องเอียง  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ , และ  $60^\circ$  ผลปรากฏว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของการไหลของการไหล( $Re$ )และตัวเลขของ (Nusselt) ภายในเพิ่มขึ้น การแผ่รังสีมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 170%และ 250% ตัวเลขของ (Nusselt) ภายในเพิ่มขึ้น 26% และ 50% ตามลำดับ

อิสลามองลู และพาร์มากชีซอกลู (Islamoglu; & Parmaksizoglu. 2003) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความสูงของช่องในการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบช่องการไหลแบบรอยหยัก ซึ่งใช้ช่องความสูง 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร ช่องมุมเอียง  $20^\circ$  แบบเดี่ยว อัตราการไหลระหว่าง  $1200 < Re < 4000$  ใช้แผ่นทองแดง หนา 10 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 278 มิลลิเมตร ผลจากการทดลองปรากฏว่าความสูงของช่อง 5 มิลลิเมตร มีค่า Nusselt 15% ที่  $Re$  1200 และ 75% ที่  $Re$  4000 ความสูงของช่อง 10 มิลลิเมตร มีค่า Nusselt 160% ที่  $Re$  1200 และ 160% ที่  $Re$  4000 สรุปได้ว่า ช่องความสูงมีผลกระทบกับการถ่ายเทความร้อนเนื่องมาจากแรงเสียดทานการเปลี่ยนแปลงของความดัน ซึ่งทำให้ค่า Nusselt เพิ่มขึ้น

เม็ตวอลลี และแมนกลิก (Metwally; & Manglik. 2003) ได้ทำการศึกษาหาส่วนโค้งที่เหมาะสมในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ด้วยวิธีการทางตัวเลข(finite difference) เพื่อหาช่วงของรอยหยัก ในช่วง Reynolds Number  $10 < Re < 1000$  Prandtl Number เท่ากับ 5,13,150 ในช่วงของอัตราส่วนความสูงและความกว้าง ( $\gamma$ )  $0 < \gamma < 1.0$  พบว่าจะเกิดการหมุนวนมากขึ้นบริเวณรอยหยักเมื่อเพิ่มค่า  $\gamma$  และ Reynolds Number โดยค่า  $\gamma$  ที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ที่  $0.3 < \gamma < 0.6$

อิสลามองลู และครัท (Islamoglu; & Kurt. 2004) ได้ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้ ANNs Model สำหรับอากาศไหลผ่านช่องการไหลแบบรอยหยัก ซึ่งใช้ช่องมุมเอียง  $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$  และ  $50^\circ$  อัตราการไหลระหว่าง  $1200 < Re < 4000$  ใช้แผ่นทองแดง หนา 10 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 278 มิลลิเมตร นำผลจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับการใช้ ANNs Model โดยใช้โปรแกรม C++ ผลปรากฏว่าค่า  $Nu$ , ANNs มีค่าผิดพลาด 4% ไปจากค่าของ  $Nu$ , Experiment อันเนื่องมาจากการใช้ ANNs Model เป็นลักษณะการประมาณค่า Nusselt numbers ของอากาศที่ไหลผ่านช่องการไหลแบบรอยหยัก

อิสลามองลู และพาร์มากชีซอกลู (Islamoglu; & Parmaksizoglu. 2004) ได้ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบช่องการไหลแบบรอยหยัก  $50^\circ$  อัตราการไหลระหว่าง  $1200 < Re < 4000$  เป็นวิเคราะห์ โดยใช้การ

ไฟโนอีลิเมนต์ มุมเอียงของช่อง  $20^\circ$  ความสูงของช่องเท่ากันกับความสูงของยอดรอยหยัก ผลปรากฏว่าความสูงของช่องมีผลโดยตรงกับการไหลของอากาศที่ช่วยในการถ่ายเทความร้อน จากค่าช่วงตัวเลข Nusselt numbers และ ความดันตกคร่อม 6.3% และ 9% ที่เกิดความผิดพลาดจากการทดลอง

แฟบน์ และรอสซี (Fabbn; & Rossi. 2005) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบรอยหยักโดยวิธีไฟโนอีลิเมนต์และนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับช่องการไหลแบบผนังเรียบ ในช่วง Reynolds number 100 250 และ 500 ผลที่ได้คือค่า Reynolds number ที่ต่ำจะไม่เกิดการไหลแบบหมุนวนแต่ถ้าค่า Reynolds number สูงขึ้นจะทำให้เกิดการหมุนวน

แกรเดก และคณะ (Gradeck; et al. 2005) ได้ทำการทดลองหาตำแหน่งการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบลอนด้วยการไหลแบบ Lamina-Turbulent Flow ในช่วง Reynolds Number  $0 < Re < 7500$  ผลที่ได้คือที่อัตราการไหลต่ำความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของช่องการไหลของที่ประมาณ  $20^\circ\text{C}$  แต่ถ้าอัตราการไหลที่สูงขึ้นความแตกต่างของอุณหภูมิจะอยู่ที่  $10^\circ\text{C}$  โดยเฉลี่ยอุณหภูมิจะต่างกันที่  $15^\circ\text{C}$

นาผล (Naphon. 2006) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและแรงดันตกคร่อมในช่องการไหลแบบรอยหยักภายใต้สภาวะพลังความร้อนคงที่ เท่ากับ  $1.2\text{ kW/m}^2$  ในช่วง Reynolds number 500-1400 การทดลองใช้มุมมุมของรอยหยักที่ 20 40 และ 60 องศา ความสูงของช่องการไหล 12.5 มิลลิเมตร ผลที่ได้คือที่มุมหยัก 20 องศา จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นทดลองสูงสุด ค่านัสเซลท์นัมเบอร์มีค่าสูงสุดที่มุมหยัก 60 องศา ค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุดที่ มุมหยัก 60 องศา

นาผล (Naphon. 2006) ได้ทำการศึกษาถึงผลของมุมของรอยหยักที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและแรงดันตกคร่อมในช่องการไหลแบบรอยหยักที่ลักษณะเป็นแบบ V การทดลองใช้มุมมุมของรอยหยักที่ 20 40 และ 60 องศา ในช่วง Reynolds number 2000-9000 อัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง  $0.001-0.015\text{ m}^3/\text{s}$  ผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับแผ่นเรียบ จากการทดลองพบว่าค่านัสเซลท์นัมเบอร์มีค่าสูงสุดที่ มุมหยัก 60 องศา และแรงดันตกคร่อมก็มีค่าสูงสุดด้วย

โดยส่วนใหญ่ว่าลักษณะของรอยหยักที่ทำการศึกษามีอยู่ 2 แบบ คือ Sine-Corrugate และ V- Corrugate แต่ยังมีลักษณะรอยหยักอื่น ๆ ที่มีผู้ทำการศึกษาและวิจัยน้อย จึงมีความสนใจที่จะศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่มีผลต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อน

## บทที่ 2

### สมการพื้นฐานและการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

#### สมการพื้นฐาน

สมการพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) และสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) ที่ให้ค่าเปลี่ยนไปแบบชั่วขณะ โดยในการคำนวณเราสมมติให้ของไหลเป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ มีความหนืด มีอุณหภูมิคงที่และการไหลเป็นแบบการไหลสภาวะคงตัว มีรูปแบบสมการดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.1)$$

สมการนาเวียร์-สโตกส์

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.2)$$

ให้ความเร็วและปริมาณต่างๆ ซึ่งค่าที่เปลี่ยนไปแบบชั่วขณะ (Instantaneous) มีค่าเท่ากับผลรวมของค่าเฉลี่ย (Mean) ซึ่งไม่ขึ้นกับเวลากับส่วนแสดงการกระเพื่อม (Fluctuations) ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1 ดังนี้

$$u_i = \overline{u_i} + u_i' \quad (2.3)$$

โดยที่  $\overline{u_i}$  และ  $u_i'$  คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งและส่วนของการกระเพื่อมของวนประกอบความเร็ว

( $i = 1, 2, 3$ ) ซึ่งค่าของ  $\overline{u_i}$  ได้มาจาก

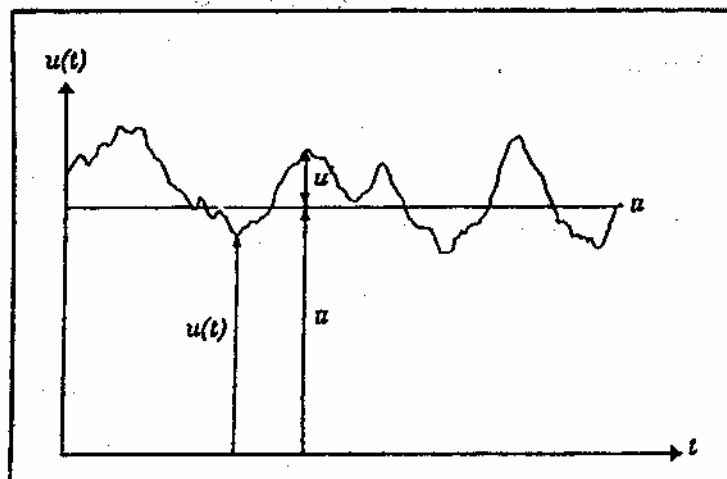
$$\overline{u_i} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u_i dt \quad (2.4)$$

โดยที่  $\Delta t$  เป็นขนาดของช่วงเวลาซึ่งมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับการกระเพื่อมของความปั่นป่วน ดังนั้น

$$\overline{u_i} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} (\overline{u_i} + u_i') dt = \overline{\overline{u_i}} + \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u_i' dt = \overline{u_i} + \overline{u_i'} \quad (2.5)$$

เนื่องจาก  $\overline{u_i} = 0$  ดังนั้น

$$\overline{u_i} = \overline{\overline{u_i}} \quad (2.6)$$



ภาพประกอบ 1 ส่วนประกอบของความเร็วที่ขึ้นอยู่กัเวลา

จะเห็นได้ว่าส่วนของเทอมเฉลี่ยช่วงเวลาหนึ่งของการกระเพื่อมของความปั่นป่วนมีค่าเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ตามค่า  $\overline{u_i u_j}$  ไม่จำเป็นต้องมีค่าเป็นศูนย์ไปด้วยเช่นเดียวกับปริมาณอื่นๆ สามารถเขียนได้ให้รูปเดียวกัน

$$p = \overline{p} + p' \quad (2.7)$$

จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ ที่ให้ค่าเปลี่ยนไปแบบชั่วขณะแทนค่าปริมาณต่างๆ ด้วยผลรวมของปริมาณเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งกับส่วนของการกระเพื่อมเนื่องจากความปั่นป่วนแล้ว ทำการเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาหนึ่ง สมการที่ได้สามารถเขียนให้อยู่ในแกนคาร์ทีเซียน (Cartesian Axis) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{p u_i}) = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{p u_i u_j}) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 3.8 และ 3.9 เรียกว่า สมการค่าเฉลี่ยเรโนลด์นาเวียร์-สโตกส์ (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation, RANS) ซึ่งสมการที่ได้มีรูปแบบคล้ายคลึงกับสมการนาเวียร์-สโตกส์ ที่ให้ค่าเปลี่ยนแปลงไปแบบชั่วขณะ จะเห็นได้ว่าสมการที่แสดงการไหลแบบปั่นป่วนเป็นสมการอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้นอันดับที่สองและยังมีสมการอื่น ๆ อีกเชื่อมโยงกันอยู่ในระบบซึ่งยากต่อการหาผลเฉลยโดยวิธีแม่นยำตรงในทางคณิตศาสตร์ (Analytical Method) ในทุกวันนี้ยังไม่มีผลเฉลยแบบปิด (Close form Solution) สำหรับสมการนาเวียร์-สโตกส์ ดังนั้นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจึงเป็นที่ยอมรับในการหาผลเฉลยในปัจจุบัน และเพื่อให้เป็นปัญหาแบบปิด (Closure Problem) ในสมการ ที่ 3.9 เทอมความเค้นเรโนลด์ (Reynolds Stresses)  $-\overline{\rho u'_i u'_j}$  จำเป็นต้องใช้แบบจำลองความปั่นป่วน

### แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ แต่ที่นำมาใช้ในการจำลองปัญหาสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ คือ แบบจำลองมาตรฐาน  $k-\varepsilon$  (Standard  $k-\varepsilon$ )

#### แบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$

แบบจำลอง Standard  $k-\varepsilon$  เทอมความเค้นเรโนลด์ จะถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราความเค้นเฉลี่ย (Mean strain rate) (Versteeg & Malalasekera. 1995) โดย Eddy-viscosity ที่ซึ่งค่า Eddy-viscosity จะกำหนดให้สัมพันธ์กับพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy,  $k$ ) และอัตราการสูญเสีย (Dissipation rate,  $\varepsilon$ ) โดยใช้ข้อสมมติฐานของ Boussinesq คือ

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.10)$$

โดยที่  $\mu_t$  คือความหนืดของความปั่นป่วน (Eddy-viscosity) ซึ่งหาได้จาก

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.11)$$

โดยที่ค่า  $C_\mu$  เป็นค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 0.09 และ  $k$  คือ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน  $\left( k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \right)$  ส่วน  $\varepsilon$  คือ อัตราการสูญเสียของความปั่นป่วน (Turbulent dissipation rate) สำหรับรูปของสมการที่ใช้ในการหาค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  เป็นดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) \quad (2.13)$$

โดยที่ค่า  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$  ค่า  $G_k$  แทน อัตราการเกิดของพลังงานจลน์ความปั่นป่วน (Turbulent production rate) ขณะที่  $\rho \varepsilon$  เป็นอัตราการสูญสลาย (Destruction rate) โดย  $G_k$  มีค่าเป็น

$$G_k = \mu_{eff} \left[ \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] \quad (2.14)$$

โดยทั่วไปแล้วค่า  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$  และ  $\sigma_\varepsilon = 1.3$

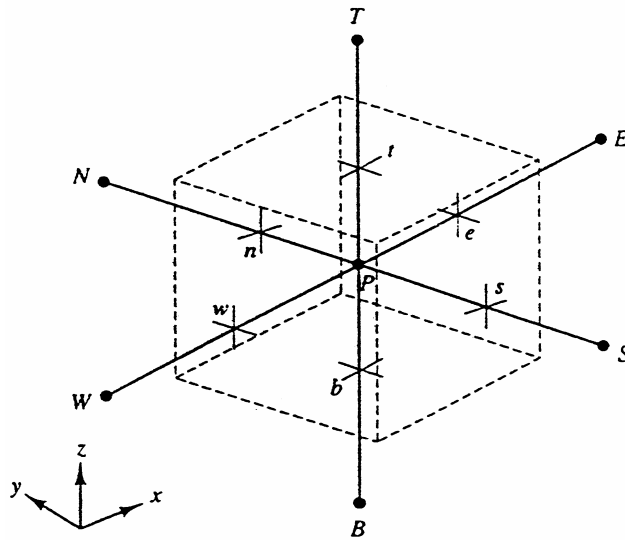
### ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

ในการหาผลเฉลยของสมการควบคุม (Governing equation) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งคู่ควบกันอยู่ ได้ใช้หลักวิธีพื้นฐานของปริมาตรควบคุม ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยแบ่งขอบเขตการคำนวณออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ ทำการอินทิเกรตสมการควบคุมในแต่ละปริมาตรควบคุม พร้อมทั้งจัดให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิต ทำการดีสครีตสมการควบคุม ซึ่งอยู่ในรูปอินทิกรัล และทำการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของปริมาตรต่างๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยหนึ่ง ๆ กับปริมาตรต่างๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยข้างเคียงให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น จากนั้นจึงทำการแก้สมการ เพื่อหาผลเฉลยต่อไป ซึ่งระเบียบวิธีดังกล่าวเรียกว่าวิธีการคำนวณแบบปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) และจะได้อธิบายต่อไป

รูปทั่วไปของสมการการส่งถ่ายปริมาณสเกลลาร์ ( $\phi$ ) ในปริมาตรควบคุมใดๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอินทิกรัลได้ดังนี้

$$\int_A \rho \phi \vec{u} \cdot \vec{n} dA = \int_A \Gamma \phi \nabla \phi \cdot \vec{n} dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.15)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ความหนาแน่น  $\vec{u}$  คือ เวกเตอร์ความเร็ว  $A$  คือ พื้นที่ผิวของปริมาตร  $\Gamma_\phi$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของ  $\phi$   $\nabla \phi$  คือ ค่าความชันของ  $\phi$   $S_\phi$  คือ แหล่งกำเนิด (Source) ของ  $\phi$  ต่อหน่วยปริมาตร เทอมต่างๆ ในสมการที่ (2-32) มีความหมายดังนี้ เทอมแรกทางด้านซ้ายของสมการ เป็นเทอมที่ขึ้นอยู่กับเวลา เทอมแรกทางด้านขวาของสมการ เป็นเทอมของการพา ส่วนเทอมที่สอง ด้านขวาของสมการเป็นเทอมการแพร่ การหาค่าอินทิเกรตสมการข้างต้นเป็นขั้นตอนต่อไปของการคำนวณแบบปริมาตรสืบเนื่อง ในการวิเคราะห์การไหลแบบ 3 มิติ จะกำหนดให้ค่า  $\phi$  มีค่าเป็น  $u$ ,  $v$  และ  $w$  ต่อไปเราจะพิจารณาปริมาตรควบคุมใดๆ ในภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 ปริมาตรควบคุม 3 มิติ

ภาพประกอบ 2 จุด  $P$  ตัวแทนของปริมาตรจะอยู่ตำแหน่งกลางของปริมาตร พื้นที่ผิวแต่ละด้านของปริมาตรเขียนแทนด้วย  $e, w, n, s, t$  และ  $b$  ซึ่งหมายถึง พื้นที่ผิวด้านทิศตะวันออก ทิศตะวันตก ทิศเหนือ ทิศใต้ ด้านบนและด้านล่างของจุด  $P$  ตามลำดับ ต่อไปเป็นการดิสครีตสมการ (2-32)

### การดิสครีตไทเซชัน (Discretisation)

สมการอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้นที่ใช้อธิบายการไหลของของไหลนั้น เมื่อทำการดิสครีตในแต่ละเทอมจะได้ดังนี้

#### เทอมการพา (Convection term)

ทำการดิสครีตเทอมการพาจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\int_A (\rho \phi u) \cdot \vec{n} dA &= [(\rho \phi Au)_e - (\rho \phi Au)_w] \\
&+ [(\rho \phi Av)_n - (\rho \phi Av)_s] \\
&+ [(\rho \phi Aw)_t - (\rho \phi Aw)_b]
\end{aligned} \tag{2.16}$$

สามารถเขียนสมการของการพาที่ทำการดิสครีตแล้วให้ง่ายขึ้นโดยการแทนด้วย  $F = \rho uA$  โดยที่ค่า  $F$  คือ ฟลักซ์ของการพา (Convective flux) เขียนสมการ (2-33) ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\int_A (\rho \phi u) \cdot \vec{n} dA &= [(F\phi)_e - (F\phi)_w] \\
&+ [(F\phi)_n - (F\phi)_s] \\
&+ [(F\phi)_t - (F\phi)_b]
\end{aligned} \tag{2.17}$$

**เทอมการแพร่ (Diffusion term)**

ทำการดิสครีตเทอมการแพร่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
&\left[ \left( A\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left( A\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] \\
&+ \left[ \left( A\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left( A\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \\
&+ \left[ \left( A\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_t - \left( A\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_b \right] + \bar{S} \Delta V = 0
\end{aligned} \tag{2.18}$$

เมื่อ  $\Gamma$  คือค่าของสัมประสิทธิ์ของการแพร่ เพื่อความสะดวกเราจะใช้ตัวแปร  $D = \frac{\Gamma A}{\delta x}$  แสดงแทนฟลักซ์ของการแพร่ (Diffusive flux) และสามารถเขียนสมการของการแพร่ที่ทำการดิสครีตแล้วได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned}
& \left[ D_e(\phi_e - \phi_p) - D_w(\phi_p - \phi_w) \right] \\
& + \left[ D_n(\phi_n - \phi_p) - D_s(\phi_p - \phi_s) \right] \\
& + \left[ D_t(\phi_t - \phi_p) - D_b(\phi_p - \phi_b) \right] \\
& + (S_u + S_p \phi_p) = 0
\end{aligned} \tag{2.19}$$

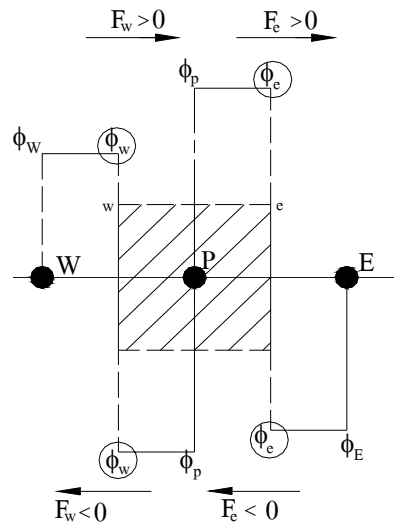
ค่า  $\phi_e$ ,  $\phi_n$ ,  $\phi_s$ ,  $\phi_t$  และ  $\phi_b$  เป็นค่าของ  $\phi$  ที่พื้นผิวผนังของปริมาตร ซึ่งหาได้โดยการประมาณค่า  $\phi$  และการประมาณค่า  $\phi$  ที่บริเวณผิวของปริมาตรนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้ คือระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง (First order upwind scheme) วิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง (Second order upwind scheme) และระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK)

### การประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว

ในการประมาณค่าเทอมที่เกิดการพา นั้น งานวิจัยในครั้งนี้ได้นำเสนอระเบียบวิธีแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้ ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง วิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง และระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก ซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่อไป ซึ่งในงานวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกใช้ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง มาใช้ในการประมาณค่าเทอมที่เกิดการพา

#### ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง

สำหรับการประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่งนั้น ค่าที่ต้องการหาคือค่า  $\phi$  ในกรณี  $F_e$  เป็นค่าบวก ค่าของ  $\phi_e$  จะถูกกำหนดให้เท่ากับค่า  $\phi_p$  สังเกตว่าจะให้เท่ากับค่าที่อยู่ทางด้านปลายลูกศร กรณีที่  $F_e$  เป็นค่าลบ ค่า  $\phi_e$  จะถูกกำหนดให้เท่ากับ  $\phi_E$  ดังแสดงในภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง

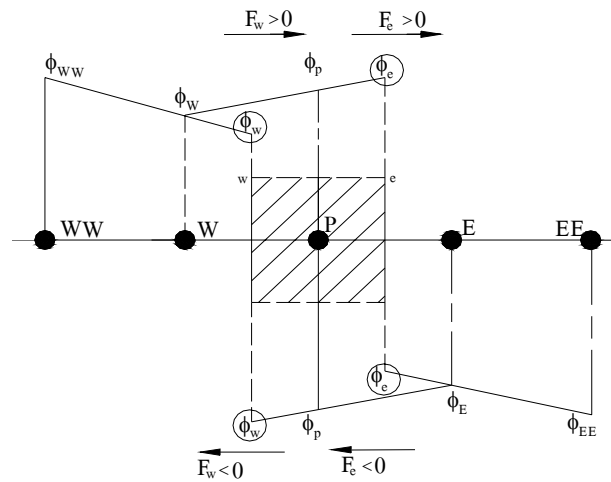
$$\begin{aligned} \phi_e &= \phi_p & : F_e > 0, & \quad \phi_e = \phi_E & : F_e < 0 \\ \phi_w &= \phi_W & : F_w > 0, & \quad \phi_w = \phi_p & : F_w < 0 \end{aligned}$$

ดังนั้นสมการเขียนได้ดังนี้

$$F_e \phi_e = \phi_p [F_e] + \phi_e [-F_e] \quad (2.20)$$

### ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง

ค่า  $\phi$  จะประมาณค่าภายในที่พื้นผิวของปริมาตรโดยใช้ตำแหน่งริข้างเคียงอยู่ที่ท้ายลม ดังแสดงในภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง

$$\phi_e = \frac{3}{2}\phi_p - \frac{1}{2}\phi_w \quad : \quad F_e > 0$$

$$\phi_w = \frac{3}{2}\phi_w - \frac{1}{2}\phi_{ww} \quad : \quad F_w > 0$$

$$\phi_e = \frac{3}{2}\phi_E - \frac{1}{2}\phi_{EE} \quad : \quad F_e < 0$$

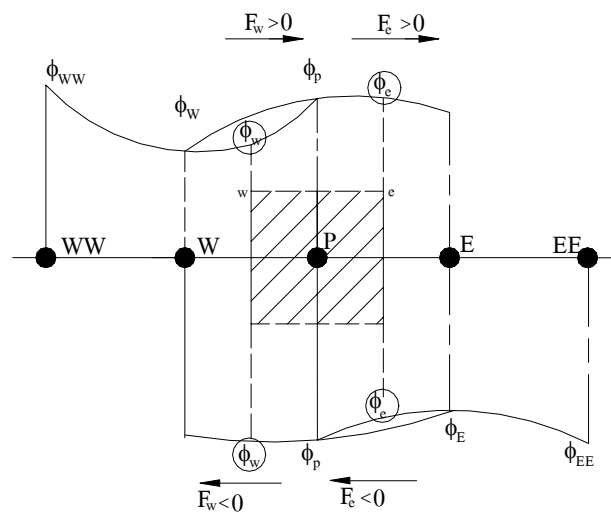
$$\phi_w = \frac{3}{2}\phi_p - \frac{1}{2}\phi_E \quad : \quad F_w < 0$$

ดังนั้นสมการเขียนได้ดังนี้

$$F_e \phi_e = \left( \frac{2}{3}\phi_p - \frac{1}{2}\phi_w \right) [F_e] - \left( \frac{2}{3}\phi_E - \frac{1}{2}\phi_{EE} \right) [-F_e] \quad (2.21)$$

#### ระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก

การประมาณค่า  $\phi$  ด้วยระเบียบวิธีนี้ ตั้งสมมติฐานอยู่บนค่าเฉลี่ยของระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง (Versteeg & Malalasekera. 1995) การหาค่าพื้นผิวนั้นหาได้จาก 2 กริดข้างเคียงอยู่ที่ปลายลม (Downstream) และอีก 1 กริดที่อยู่ต้นลม (Upstream)



ภาพประกอบ 5 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก

$$\phi_e = \frac{3}{8}\phi_E + \frac{3}{4}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_W \quad : F_e > 0$$

$$\phi_W = \frac{3}{8}\phi_P + \frac{3}{4}\phi_W - \frac{1}{8}\phi_{WW} \quad : F_w > 0$$

$$\phi_e = \frac{3}{8}\phi_P + \frac{3}{4}\phi_E - \frac{1}{8}\phi_{EE} \quad : F_e < 0$$

$$\phi_W = \frac{3}{8}\phi_W + \frac{3}{4}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_E \quad : F_w < 0$$

ดังนั้นสมการเขียนได้ดังนี้

$$F_e \phi_e = \left( \frac{3}{8}\phi_E - \frac{3}{4}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_W \right) [F_e] - \left( \frac{3}{4}\phi_E - \frac{3}{8}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_{EE} \right) [-F_e] \quad (2.22)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\phi$  ของปริมาตรหนึ่งๆ กับตัวแปร  $\phi_{nb}$  ของปริมาตรข้างเคียงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังนี้

$$a_P \phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (2.23)$$

โดยที่ตัวห้อย  $nb$  หมายถึง ปริมาตรข้างเคียง ส่วน  $a_P$  และ  $a_{nb}$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการทำให้อยู่ในรูปเชิงเส้นสำหรับตัวแปร  $\phi_P$  และ  $\phi_{nb}$  ตามลำดับ ซึ่งจำนวนของปริมาตรข้างเคียงมีค่าเท่ากับด้านที่ล้อมรอบปริมาตรที่พิจารณา ส่วน  $b$  เป็นเทอมที่เพิ่มมาจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ

การหาผลเฉลยโดยวิธีการแยกพิจารณา (Segregated method) เป็นการแยกส่วนในการคำนวณระหว่างสมการโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามค่าต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณต้องสอดคล้องกัน สมการที่ (2-41) เป็นสมการโมเมนตัมที่ discretized แล้วในแนวแกน  $x$  โดยได้พิจารณาผลของแรงที่เกิดจากความดัน ( $pA_f$ ) และกำหนดให้  $\phi = u$

$$a_P u_P = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum pA_f + B \quad (2.24)$$

โดยที่  $A_f$  แทนพื้นผิวที่พิจารณา  $B$  แทนแหล่งกำเนิดอื่นๆ ที่ปราศจากการกระจายความดันสำหรับสมการโมเมนตัม ในแนวแกน  $y$  และแนวแกน  $z$  ก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ส่วนสมการความต่อเนื่องที่ดีสคริตแล้วแสดงได้ดังนี้

$$\sum_f^{N_{face}} \rho u_n A_f = 0 \quad (2.25)$$

โดยที่  $N_{face}$  เป็นจำนวนผนังล้อมรอบปริมาตร  $u_n$  คือ ความเร็วที่ผนังปริมาตรการประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว

### กระบวนการหาคำตอบ (Solution algorithm)

เพื่อให้ค่าความดันและความเร็วในสมการโมเมนตัมสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ดังนั้นกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE (Semi - Implicit Method for Pressure - Linked Equations), SIMPLER (Semi - Implicit Method for Pressure - Linked Equations Consistent) และ PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) จึงถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบค่าความดันและความเร็วให้มีความสอดคล้องกัน (Versteeg & Malalasekera. 1995; FLUENT version 6.0: 2001; Patankar & Spalding. 1972) จากสมการ (2-41) เราจะกำหนด  $p$  เพื่อให้ได้ค่าของ  $u$  และเพื่อปรับค่าที่ได้จากการคำนวณในรอบแรกเพื่อช่วยให้ลู่เข้าหาคำตอบเราจะเพิ่ม  $p'$  ขึ้นมา ดังนั้นสมการสามารถเขียนได้เป็น

$$a_P u_P^* = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}^* + \sum (p_w^* - p_e^*) A_f + B \quad (2.26)$$

โดยที่  $p_w^*$  และ  $p_e^*$  เป็นค่าความดันของแต่ละปริมาตรที่ติดกัน ในการแก้สมการจะเริ่มต้นด้วยการสมมติค่าความดัน  $p^*$  เพื่อให้ได้ค่า  $u^*$ ,  $v^*$  และ  $w^*$  และค่าที่ได้จะต้องที่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้เพิ่มเติม  $p'$  เข้ามาเพื่อปรับค่า  $p^*$  ในการคำนวณรอบต่อไป ซึ่งมีดังนี้

$$p = p^* + p', u = u^* + u', v = v^* + v' \quad (2.27)$$

โดยที่  $p'$  เรียกว่า การตรวจสอบค่าความดัน (Pressure correction) ดังนั้นสมการ (2-44) สามารถเขียนได้เป็น

$$a_p u'_p = \sum_{nb} a_{nb} u'_{nb} + \sum (p'_w - p'_e) A_f + B \quad (2.28)$$

ในกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE จะไม่พิจารณาเทอม  $\sum_{nb} a_{nb} u'_{nb}$  ดังนั้นจะได้สมการที่ดัดแปลงของการตรวจสอบค่าความดันในปริมาตรเป็นดังนี้

$$u'_p = d_f (p'_w - p'_e) \quad (2.29)$$

โดยที่เทอม  $d_f$  มีค่าเท่ากับ  $d_f = \frac{A_f}{a_p}$  ในสมการโมเมนตัมที่ดัดแปลงแล้ว การปรับค่าความดันและอัตราการไหลผ่านผนังปริมาตรในแต่ละครั้งนั้น จะเป็นไปตามสมการนี้

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \quad (2.30)$$

โดยที่  $\alpha_p$  เป็นค่าแฟคเตอร์ของการปรับค่า สำหรับกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLEC นั้น เริ่มต้นจะเหมือนกับกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE ที่กล่าวมาข้างต้น แต่ต่างกันที่ได้นำเทอม  $\sum_{nb} a_{nb} u'_{nb}$  มาพิจารณาดู ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ของ  $d_f$  เป็นฟังก์ชันของ  $1 - \sum_{nb} a_{nb} / a_p$  ดังนั้น สมการ

$$\text{ที่ดัดแปลงของการตรวจสอบค่าความดันในปริมาตรที่พิจารณาจะเป็น } u'_p = \frac{d_f}{1 - \sum_{nb} a_{nb} / a_p} (p'_w - p'_e)$$

ส่วนกระบวนการหาคำตอบแบบ PISO นั้น ได้ปรับปรุงประสิทธิภาพของการคำนวณจาก SIMPLE โดยการเพิ่ม Neighbor correction และ Skewness correction ซึ่งได้เพิ่มวงจร (Loop) ในการคำนวณเพื่อให้ค่าความดันและความเร็วของสมการโมเมนตัมสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องเร็วขึ้น กระบวนการทำซ้ำนี้เรียกว่า การปรับค่าโมเมนตัม (Momentum correction) หรือ Neighbor correction กระบวนการหาคำตอบแบบ PISO นั้น ทำให้การใช้เวลาในการประมวลผลต่อรอบการคำนวณมากขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่จะทำให้จำนวนรอบในการทำซ้ำเพื่อเข้าสู่หาคำตอบลดลง สำหรับ Skewness correction นั้น เป็นตัวปรับค่าพลักซ์ของมวลที่ผนังของปริมาตรและค่าความแตกต่างของการตรวจสอบค่าความดัน

### เงื่อนไขขอบ (Boundary condition)

ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสิ่งสำคัญที่ขาดเสียไม่ได้คือเงื่อนไขขอบ ดังนั้น เงื่อนไขขอบเป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะของความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในบริเวณขอบเขตของการคำนวณ ในการกำหนดเงื่อนไขขอบจำเป็นต้องคำนึงถึงความเป็นจริงที่เกิดขึ้น เพื่อให้การจำลองปัญหาเหมือนจริงมากที่สุด ซึ่งจะส่งผลถึงความถูกต้องของผลที่ได้จากการคำนวณ สำหรับการจำลองการไหลในงานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบตัวเลขเรย์โนลด์สอยู่ในช่วง  $1400 \leq Re \leq 2400$  ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นแบบจำลอง Standard  $k-\varepsilon$  จึงถูกนำมาใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้โดยที่ตำแหน่งทางเข้ากำหนดให้เป็นค่าความเร็วเฉลี่ย พร้อมทั้งค่าของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและอัตราการสลายของความปั่นป่วน สำหรับบริเวณภายในของผนังที่กำหนดให้ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์และอุณหภูมิทางเข้าใช้ค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียส และตำแหน่งทางออกกำหนดเป็นแบบ Pressure outlet ซึ่งสมมุติให้ค่าความดันเท่ากับความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับศูนย์

### เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (Inlet boundary condition)

ความเร็วของของไหลที่ไหลเข้าสู่ชุดท่อทดสอบแบบขดเป็นวงนั้น กำหนดเป็นค่าความเร็วเฉลี่ย และค่าของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $k$ ) และอัตราการสลายของความปั่นป่วน ( $\varepsilon$ ) สามารถคำนวณหาค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  ได้จากสมการ

$$k = \frac{3}{2}(\overline{uI})^2 \quad (2.31)$$

$$\varepsilon = C_\mu \frac{3}{4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (2.32)$$

เมื่อ  $C_\mu$  คือค่าคงที่ โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.09 และ  $l = 0.07r_{tu}$  โดยที่  $l$  คือค่าคุณลักษณะความยาว (Turbulence characteristic length) และ  $r_{tu}$  คือรัศมีของเฉลี่ยของท่อชุดทดสอบ สำหรับค่าความเข้มของการปั่นป่วน (Turbulence intensity,  $I$ ) (FLUENT version 6.0: 2001) ซึ่งสามารถหาค่าได้จาก

$$I = 0.16(Re)^{-1/8} \quad (2.33)$$

### เงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall boundary condition)

สำหรับเงื่อนไขขอบที่บริเวณผนัง กำหนดให้ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ (No slip condition) และบริเวณใกล้ๆ ผนังกำหนดให้ใช้ฟังก์ชันผนังมาตรฐาน (Standard wall function) (Yakhot & Orzag. 1986) โดยกำหนดให้ค่าความเร็วเฉลี่ย สมการฟังก์ชันผนังมาตรฐานเขียนได้เป็น

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (2.34)$$

โดยที่

$$u^+ \equiv \frac{\bar{u}_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\tau_w / \rho} \quad (2.35)$$

$$y^+ \equiv \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu} \quad (2.36)$$

โดยที่  $\kappa$  คือค่าคงที่ของวอนการ์มันน์ (Von karman constant) มีค่าเท่ากับ 0.42 ส่วน  $E$  คือค่าคงที่จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 9.81  $\bar{u}_P$  คือค่าความเร็วเฉลี่ยที่จุด  $P$   $k_P$  คือค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่จุด  $P$   $y_P$  คือระยะทางจากจุด  $P$  กับผนังและ  $\mu$  คือค่าความหนืดของของไหล โดยทั่วไปแล้ว เมื่อ  $y^+ > 11.25$  ค่าความเร็วเฉลี่ยที่ได้จะเป็นไปตามสมการ (2-53) (Patankar & Spalding. 1972) แต่ที่  $y^+ < 11.25$  ค่าของความเร็วเฉลี่ยจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดแบบราบเรียบ (Laminar stress-strain relationship) ดังนี้

$$u^+ = y^+ \quad (2.37)$$

### เงื่อนไขขอบที่ทางออก (Outlet boundary condition)

สำหรับเงื่อนไขขอบที่ทางออก กำหนดเป็นแบบ Pressure outlet ซึ่งสมมุติให้ค่าความดันเท่ากับความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยไม่คิดผลจากความดันที่ทางออกย้อนกลับ (Back pressure) และการไหลอยู่ในช่วงพัฒนาเต็มที่แล้ว (Fully developed)

## การหาจำนวนกริดที่เหมาะสม

ในส่วนของการคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้น ได้ใช้ระเบียบปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และใช้การประมาณค่าภายในด้วยวิธี Second-order upwind เพื่อดีสครีตระบบสมการที่เกี่ยวข้อง สำหรับพจน์ของความดันและความเร็วซึ่งคู่ควบกันอยู่ได้ใช้กระบวนการหาคำตอบใช้วิธี SIMPLEX รูปแบบการจัดวางกริดแบบไม่เป็นโครงสร้าง (Unstructured grids) ซึ่งมีลักษณะกริดเป็นแบบสามเหลี่ยม

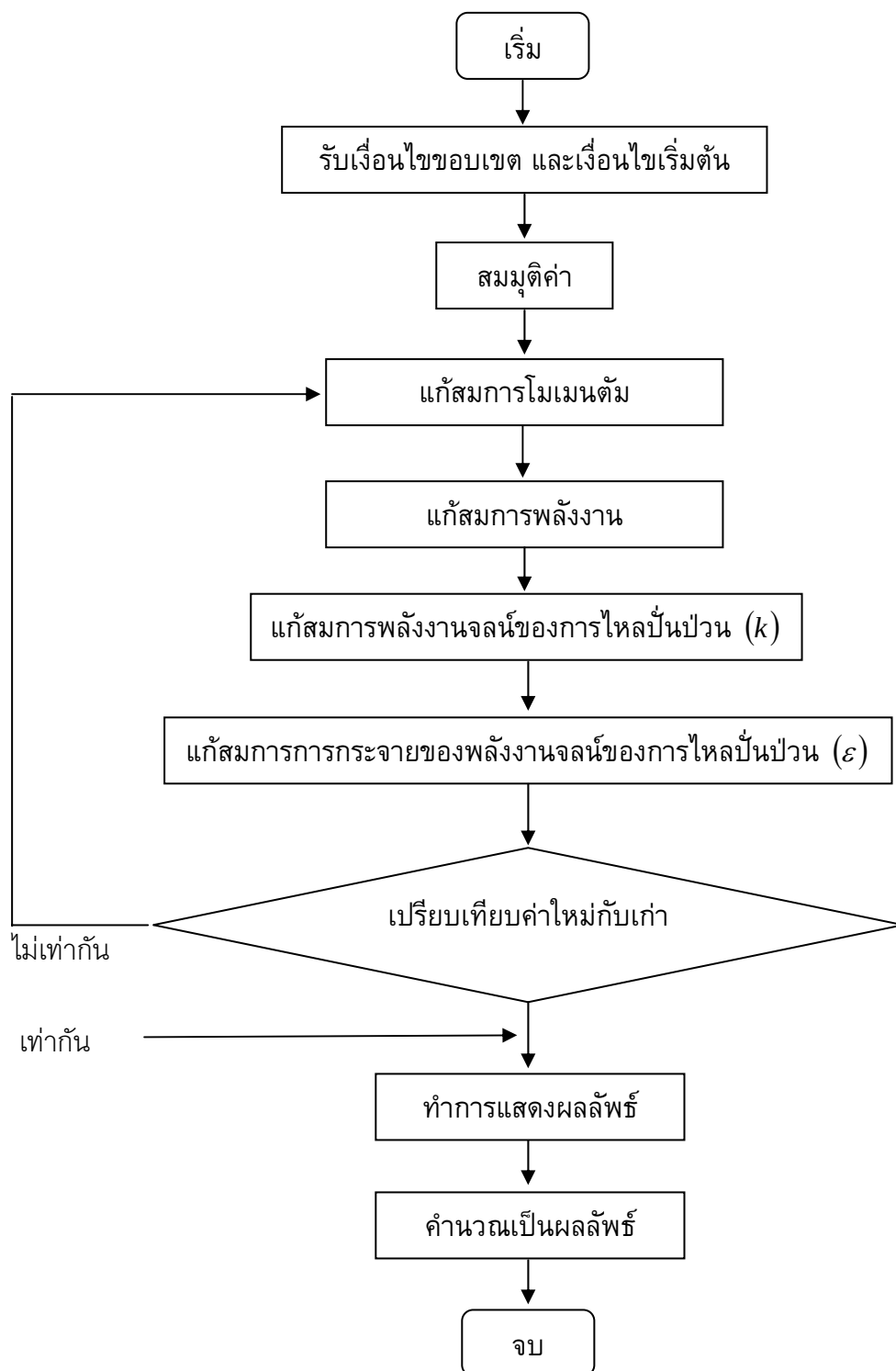
### เงื่อนไขขอบเขตสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- ทางเข้า ความเร็วของอากาศสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดทางเข้า ที่  $u_\infty$  กำหนดตามผลการทดลอง  
อุณหภูมิอากาศทางเข้า ( $T_{in}$ ) = อุณหภูมิห้อง ( $T_R = 25.^\circ\text{C}$ )
- ทางออก ความดันของอากาศที่ทางออก ( $P_{out}$ ) = ความดันบรรยากาศ ( $P_{amb}$ )
- ผนัง ไม่มีความร้อนเข้าและออกจากระบบ (Adiabatic surface)  
ไม่มีการลื่นไถลระหว่างอากาศกับผนัง (No slip condition) ในส่วนของลอน  
ไม่มีการสูญเสียความร้อนในส่วนของการนำความร้อนเข้าระบบ  
กำหนดฟลักซ์ความร้อนคงที่ ที่  $q$  กำหนดตามผลการทดลอง  
ไม่มีการลื่นไถลระหว่างอากาศกับลอน (No slip condition)

ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมหาดังแสดงในภาพประกอบ 6 โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนในการหาคำตอบดังต่อไปนี้

1. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้น และทำการสมมุติค่าเริ่มต้นในการคำนวณ
2. กำหนดเงื่อนไขในการคำนวณ เป็นการไหลในช่องการไหลที่มีลักษณะผนังเป็นลอน โดยให้มีการไหลแบบปั่นป่วนแบบสองมิติ รวมทั้งมีการถ่ายเทความร้อน
3. คำนวณสมการโมเมนตัมเพื่อทำการหาความเร็ว
4. คำนวณสมการพลังงานเพื่อหาพลังงานรวมจำเพาะ
5. คำนวณค่าพลังงานจลน์ของการปั่นป่วน และอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของการปั่นป่วนโดยใช้แบบจำลอง  $k - \epsilon$  model
6. กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 3-5 ใหม่จนกระทั่งค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่าเดิม จะได้ผลการคำนวณที่ลู่เข้าหาคำตอบโดยใช้ Criterion convergence  $10^{-5}$

การหาผลเฉลยของสมการควบคุม (Governing equation) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งคู่ควบกันอยู่ ได้ใช้หลักวิธีพื้นฐานของปริมาตรควบคุม ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยแบ่งขอบเขตการคำนวณออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ ทำการอินทิเกรตสมการควบคุมในแต่ละปริมาตรควบคุม พร้อมทั้งจัดให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิต ทำการดิสครีตสมการควบคุม ซึ่งอยู่ในรูปอินทิกรัล และทำการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของปริมาตรต่างๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยหนึ่งๆ กับปริมาณต่างๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยข้างเคียงให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น จากนั้นจึงทำการแก้สมการ เพื่อหาผลเฉลยต่อไป ซึ่งระเบียบวิธีดังกล่าวเรียกว่าวิธีการคำนวณแบบปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) เป็นการประยุกต์กระบวนการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics) การจำลองการไหลของอากาศภายในอุโมงค์ลม ด้วยโปรแกรม FLUENT 6.0 โดยการใช้วิเคราะห์ผลเพื่อหาคำตอบจากสมการ  $k-\epsilon$  model ด้วยการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้น ในส่วนของ การวิเคราะห์เป็นการวิเคราะห์ของไหลที่ไหลภายในช่องการไหล ซึ่งถูกกำหนดให้วางในแนวนอน กำหนดให้อุณหภูมิที่ผนังด้านนอกของแผ่นทดสอบ ( $T_{pl}$ ) มีค่าอีพฟลักซ์คงที่ตลอดช่วงการทดสอบ ส่วนอากาศที่ทางเข้า ( $T_{in}$ ) และอัตราการไหลของอากาศให้มีการแปรเปลี่ยนตามการทดลอง



ภาพประกอบ 6 การคำนวณของโปรแกรม

## ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการจำลอง

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการคำนวณด้วยวิธีการเชิงตัวเลขนั้น หลีกเลียงไม่ได้เนื่องจากเป็นการประมาณค่า และใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ ความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองเอง ความผิดพลาดที่เกิดจากดิสครีตและค่าความผิดพลาดที่เกิดจากกระบวนการทำซ้ำ (Iteration) รายละเอียดของค่าความผิดพลาดมี ดังต่อไปนี้ ความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลอง คือ ค่าความแตกต่างระหว่างจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับการไหลจริง และการไหลจริงกับการไหลในการจำลองที่เราตั้งสมมติฐานขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของการไหลไม่สามารถที่จะกำหนดให้ถูกต้องกับของไหลที่เป็นจริงได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นที่แปรตามอุณหภูมิในของไหลจริง เงื่อนไขขอบเขตที่เรากำหนดไว้เป็นเพียงคาดคะเน ซึ่งไม่สามารถจะกำหนดให้ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุดได้ ความผิดพลาดที่เกิดจากการดิสครีตนั้นคือ ความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าของสมการอนุพันธ์ย่อย ซึ่งเราจำเป็นที่จะต้องตัดเทอมปลายของสมการอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series) ออกไป เพื่อที่จะทำให้เราได้มีการประมาณค่าได้ และเทคนิคการประมาณค่าแต่ละชนิดก็จะมีค่าความผิดพลาดแตกต่างกันไป สุดท้ายเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากกระบวนการทำซ้ำซึ่งในกระบวนการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่ได้ทำการดิสครีตแล้วนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้กระบวนการทำซ้ำ โดยที่กระบวนการทำซ้ำนี้จะมีการล้นสุดที่เป็นไปได้ยากมาก ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องกำหนดจุดให้กระบวนการทำซ้ำนั้นหยุด จุดนั้น เรียกว่า Criteria ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นสามารถที่จะลดให้น้อยลงได้โดยการกำหนดค่านี้ให้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเราจะต้องใช้เวลาในการจำลองมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังมีค่าความผิดพลาดที่เกิดจากจำนวน กริดไม่ละเอียดพอ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองการไหลไม่ดีพอ

## บทที่ 3

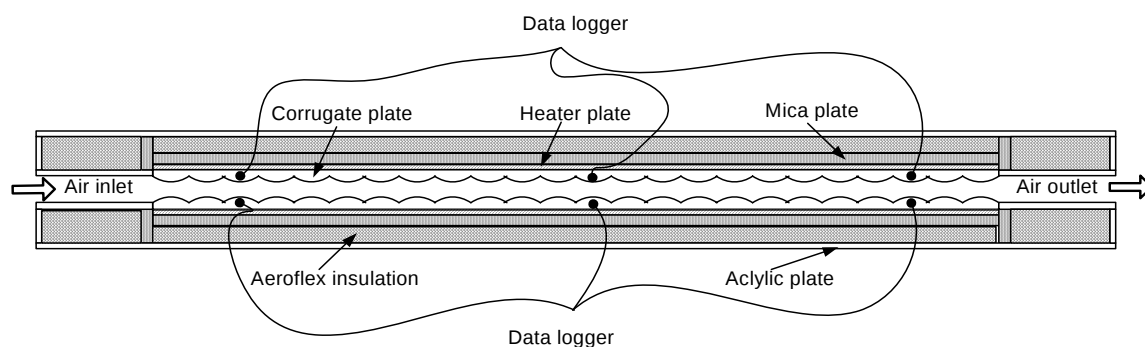
### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการทดลองจะใช้แผ่นทดสอบ 5 ชุด ซึ่งมีลักษณะเป็นลอนชนิดต่างๆ คือ แผ่นเรียบ ลอนโค้งขนาด 6 มม. ลอนโค้งขนาด 12 มม. ลอนสี่เหลี่ยมคางหมู และลอนสามเหลี่ยม การวางตำแหน่งของลอนมี 2 แบบ คือการตำแหน่งลอนตรงกัน (In-line) และการวางแบบลอนเยื้องกัน (Staggered) วางอยู่ในช่องอุโมงค์ลมในแนวนอน ซึ่งจะใช้อากาศเป็นสารทำงาน (Working air) โดยที่สามารถเปลี่ยนความเร็วของอากาศในช่องอุโมงค์ลม ในการควบคุมอัตราความร้อนของแผ่นทดสอบจะใช้ฮีตเตอร์ที่ประกอบอยู่ด้านหลังของแผ่นทดสอบเป็นตัวควบคุมให้ได้อัตราความร้อนตามต้องการ

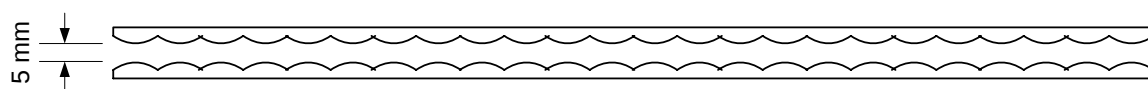
#### ส่วนประกอบของชุดทดลอง

จากภาพประกอบ 7 ชุดทดลองประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

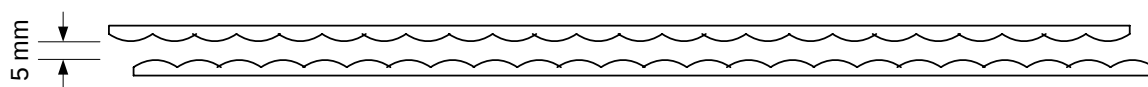
1. พัดลม
2. mixing devices
3. straightener
4. settling means
5. ชุดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (Data Logger)
6. ตัวทำความร้อนชนิดแผ่น
7. ฉนวนกันความร้อน (แผ่นไมก้า)
8. ชุดช่องการไหลที่มีรอยหยัก
9. ตำแหน่งวัดความดันทางเข้า
10. ตำแหน่งวัดความดันทางออก
11. Orifice วัดความเร็ว
12. Data logger



ภาพประกอบ 8 แสดงอุปกรณ์ในขณะทำการทดลอง



(ก) แบบตำแหน่งลอนตรงกัน

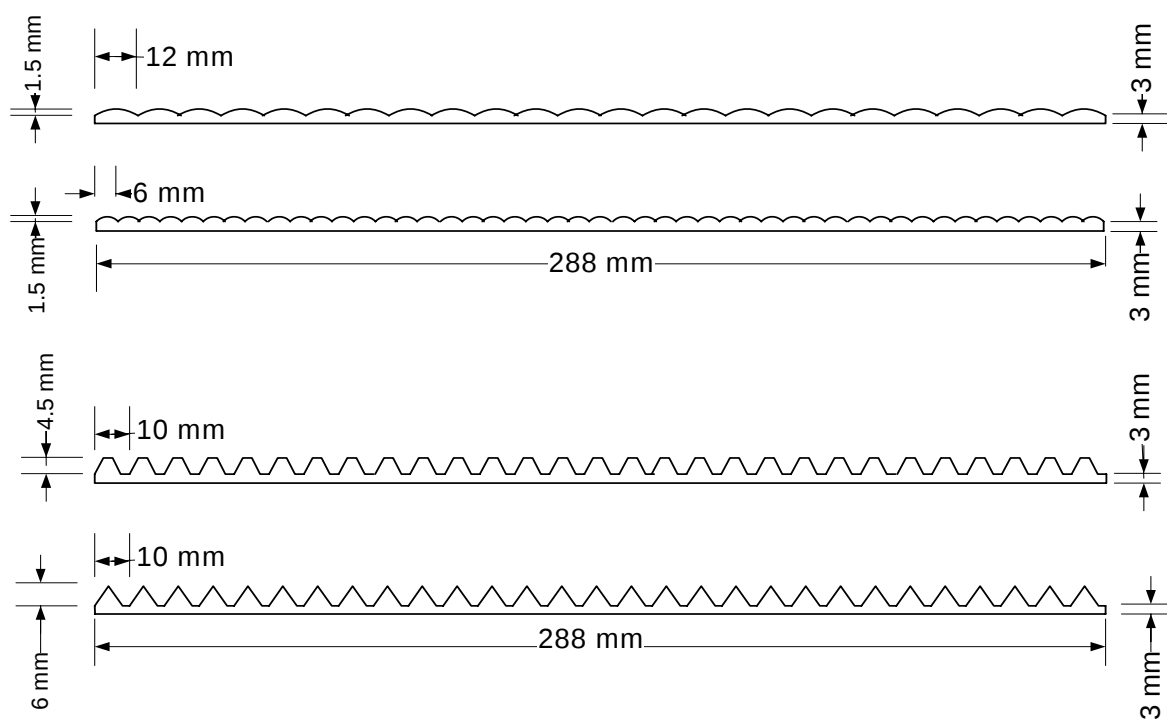


(ข) แบบตำแหน่งลอนเยื้องกัน

ภาพประกอบ 9 ลักษณะการวางตำแหน่งของแผ่นทดลอง

ตาราง 1 ข้อมูลของแผ่นทดสอบ

| ลักษณะของลอน     | ความกว้าง<br>ของลอน<br>(mm) | ความสูง<br>ของลอน<br>(mm) | ความ<br>กว้างแผ่น<br>(mm) | ความยาว<br>แผ่น<br>(mm) | ความยาว<br>ผิวรอยหยัก<br>(m) | พื้นที่ผิว<br>รอยหยัก<br>(m <sup>2</sup> ) |
|------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|
| เรียบ            | 0                           | 0                         | 130                       | 288                     | 0.288                        | 0.03744                                    |
| โค้ง             | 6                           | 1.5                       | 130                       | 288                     | 0.3334                       | 0.0434                                     |
| โค้ง             | 12                          | 1.5                       | 130                       | 288                     | 0.2998                       | 0.03898                                    |
| สี่เหลี่ยมคางหมู | 10                          | 4.5                       | 130                       | 288                     | 0.4277                       | 0.0556                                     |
| สามเหลี่ยม       | 10                          | 6                         | 130                       | 288                     | 0.4748                       | 0.06165                                    |



ภาพประกอบ 10 ลักษณะของแผ่นทดลอง



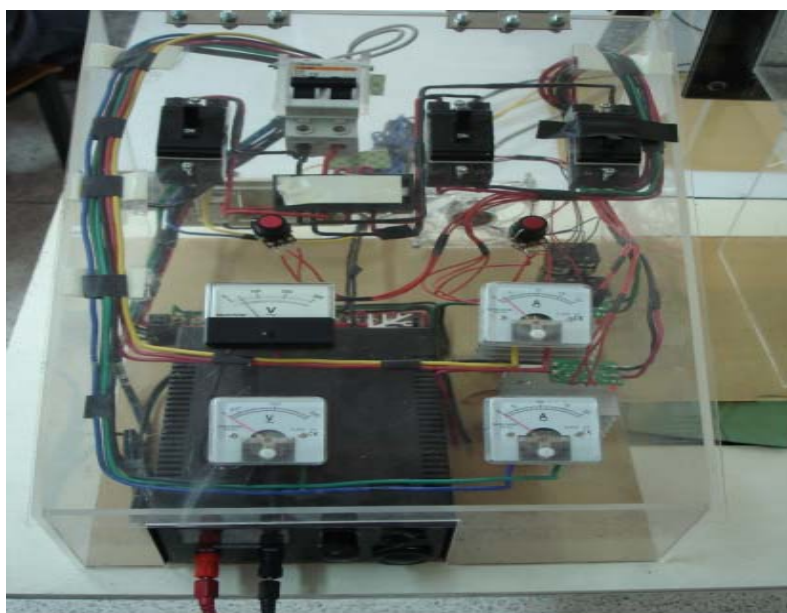
ภาพประกอบ 11 แสดงชุดการทดลอง



ภาพประกอบ 12 แสดงช่องกรงไหลของอากาศเข้า



ภาพประกอบ 13 แสดงลักษณะของ STRAIGHTENER



ภาพประกอบ 14 แสดงชุดควบคุมความเร็วของพัดลมและกระแสไฟของฮีตเตอร์



ภาพประกอบ 15 แสดงอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ (Data Logger)



ภาพประกอบ 16 แสดงอุปกรณ์วัดความดัน



ภาพประกอบ 17 แสดงอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า



ภาพประกอบ 18 แผ่นทดสอบชนิดผิวเรียบ



ภาพประกอบ 19 แผ่นทดสอบชนิดผิวเป็นลอนโค้งขนาด 6 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 20 แผ่นทดสอบชนิดผิวเป็นลอนโค้งขนาด 12 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 21 แผ่นทดสอบชนิดผิวเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู



ภาพประกอบ 22 แผ่นทดสอบชนิดผิวเป็นลอนสามเหลี่ยม

## วิธีการทดลอง

การทดลองที่ 1 : ใช้แผ่นทดสอบชนิดแผ่นเรียบ โดยการปรับอัตราการไหลของอากาศและค่า Heat flux

1. เปิดสวิตช์ main breaker สวิตช์พัดลม สวิตช์แผ่นทำความร้อน และชุดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (Data Logger)
2. ตั้งระยะห่างระหว่างแผ่นทดลองโดยที่ 0.5 cm ปรับความเร็วของอากาศที่ 0.61 m/s และค่าแรงดันไฟฟ้าของ heater ที่ 20 volt
3. รอให้อุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ อยู่ในสภาวะคงที่ประมาณ 30 นาทีโดยสังเกตจากกราฟของชุดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (Data Logger) อยู่ในสภาวะ steady state
4. เมื่ออุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ อยู่ในสภาวะ steady state บันทึกผลของอุณหภูมิ ความดันตกคร่อม ความดันทางเข้าและทางออกของ Orifice
5. เปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศเป็น 0.0020 , 0.0023, 0.0025, 0.0027 , 0.0029 kg/s และเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าของ heater เป็น 25 , 30 volt ตามลำดับ แล้วทำตามการทดลองข้อ 3 , 4 ซ้ำ

การทดลองที่ 2 : ใช้แผ่นทดสอบชนิดลอนโค้งขนาด 6 มม ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 และเปลี่ยนตำแหน่งของลอนให้มีลักษณะเอียงกันแล้วทำการทดลองข้อ 2 , 3 , 4 , 5 ซ้ำ จากนั้นเริ่มการทดลองที่ 3

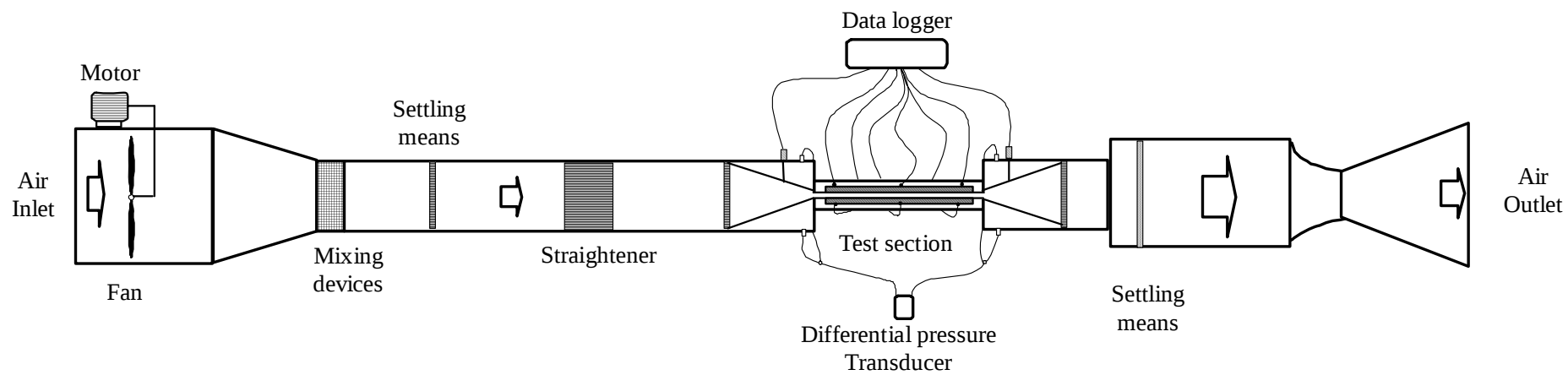
การทดลองที่ 3 : ใช้แผ่นทดสอบชนิดลอนโค้งขนาด 12 มม ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 และเปลี่ยนตำแหน่งของลอนให้มีลักษณะเอียงกันแล้วทำการทดลองข้อ 2 , 3 , 4 , 5 ซ้ำ จากนั้นเริ่มการทดลองที่ 4

การทดลองที่ 4 : ใช้แผ่นทดสอบชนิดลอนสี่เหลี่ยมคางหมู ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 และเปลี่ยนตำแหน่งของลอนให้มีลักษณะเอียงกันแล้วทำการทดลองข้อ 2 , 3 , 4 , 5 ซ้ำ จากนั้นเริ่มการทดลองที่ 5

การทดลองที่ 5 : ใช้แผ่นทดสอบชนิดลอนสามเหลี่ยม ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 และเปลี่ยนตำแหน่งของลอนให้มีลักษณะเอียงกันแล้วทำการทดลองข้อ 2 , 3 , 4 , 5 ซ้ำ

### ตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| - อุณหภูมิอากาศทางเข้า ณ ตำแหน่งที่ 1   | $T_{ai,1}$ |
| - อุณหภูมิอากาศทางเข้า ณ ตำแหน่งที่ 2   | $T_{ai,2}$ |
| - อุณหภูมิแผ่นทดสอบด้านล่างตำแหน่งที่ 1 | $T_{lp,1}$ |
| - อุณหภูมิแผ่นทดสอบด้านล่างตำแหน่งที่ 2 | $T_{lp,2}$ |
| - อุณหภูมิแผ่นทดสอบด้านล่างตำแหน่งที่ 3 | $T_{lp,3}$ |
| - อุณหภูมิแผ่นทดสอบด้านล่างตำแหน่งที่ 1 | $T_{up,1}$ |
| - อุณหภูมิแผ่นทดสอบด้านล่างตำแหน่งที่ 2 | $T_{up,2}$ |
| - อุณหภูมิแผ่นทดสอบด้านล่างตำแหน่งที่ 3 | $T_{up,3}$ |
| - อุณหภูมิอากาศทางออก ณ ตำแหน่งที่ 1    | $T_{ao,1}$ |
| - อุณหภูมิอากาศทางออก ณ ตำแหน่งที่ 2    | $T_{ao,2}$ |
| - อุณหภูมิอากาศทางออก ณ ตำแหน่งที่ 3    | $T_{ao,3}$ |
| - อุณหภูมิอากาศทางออก ณ ตำแหน่งที่ 4    | $T_{ao,4}$ |
| - แรงดันตกคร่อมระหว่างแผ่นทดสอบ         | $\Delta p$ |



ภาพประกอบ 7 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง

## บทที่ 4

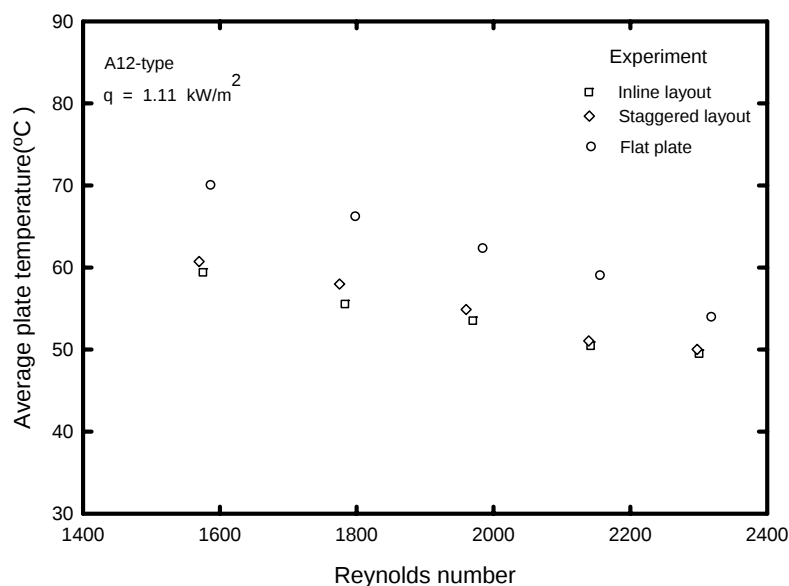
### ผลและการวิเคราะห์

#### การเปรียบเทียบผล

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ทางด้านการทดลอง ซึ่งได้มีการสร้างแผ่นทดสอบที่มีลักษณะผิวเป็นลอนลักษณะต่างๆคือ ผิวเรียบ ผิวเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. ผิวเป็นลอนโค้งขนาด 12 มม. ผิวเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู และผิวเป็นลอนสามเหลี่ยม ลักษณะการวางแผ่นทดสอบมี 2 แบบคือ แบบลอนตรงกัน (In-line layout) และแบบลอนเยื้องกัน (Staggered layout) สำหรับใช้ในการทดลองเก็บข้อมูล แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการต่างๆ และส่วนทางด้านการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้โปรแกรมฟลูเอนท์ (FLUENT 6.0) ในการคำนวณ สำหรับผลที่ได้จากทั้งสองส่วนจะถูกบันทึกในรูปแบบของตาราง และนำผลมาแสดงในลักษณะของกราฟแสดงการเปรียบเทียบของตัวแปรต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงอยู่ในรูปตัวแปรต่างๆ ดังนี้

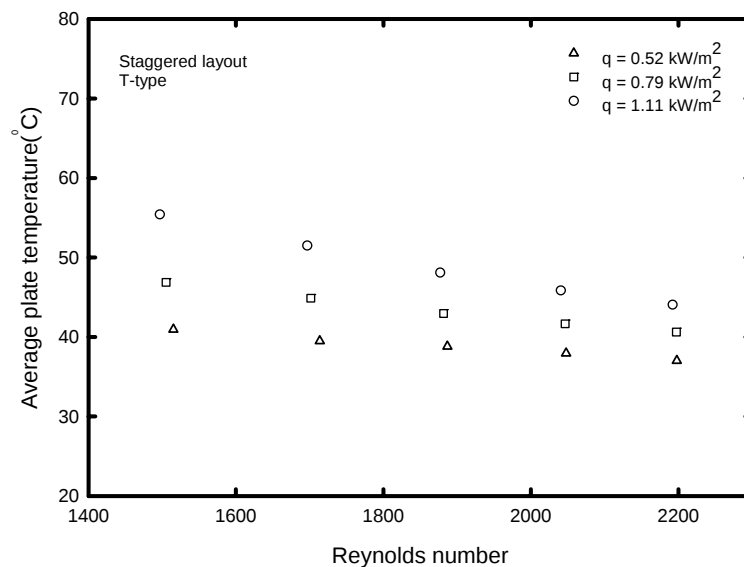
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number,  $Re$ ) และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นทดสอบ
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number,  $Re$ ) และค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยของอากาศ
- แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number,  $Re$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครีป
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number,  $Re$ ) และผลต่างของความดัน
- แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number,  $Re$ ) และค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์ (Nusselt number,  $Nu$ )
- แสดงรูปแบบการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นทดสอบ

## การเปรียบเทียบผลจากการทดลอง



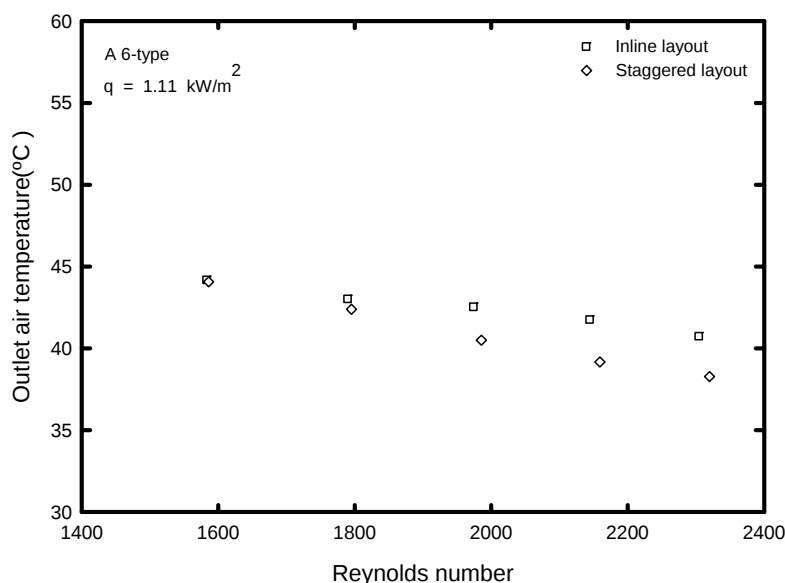
ภาพประกอบ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นทดสอบกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 12 มม. โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกันที่  $q = 1.11 \text{ kW/m}^2$

จากภาพประกอบ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแผ่นทดสอบกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่สภาวะต่างๆ พบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น (เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูงขึ้น) อุณหภูมิของแผ่นทดสอบก็จะลดลง และพบว่าแผ่นทดสอบที่วางลักษณะลอนตรงกันจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าลักษณะการวางลอนเยื้องกัน และแผ่นเรียบ เนื่องมาจากลักษณะการวางตำแหน่งของลอนตรงกันจะกีดขวางช่องทางไหลของอากาศเกิดเป็นลักษณะคอคอดทำให้อากาศไหลเร็วขึ้น เมื่ออากาศไหลเร็วขึ้นจะมีมวลของอากาศมากขึ้นมากกว่าการวางลอนเยื้องกันทำให้พาความร้อนความร้อนระหว่างแผ่นทดสอบกับอากาศมีมากกว่า



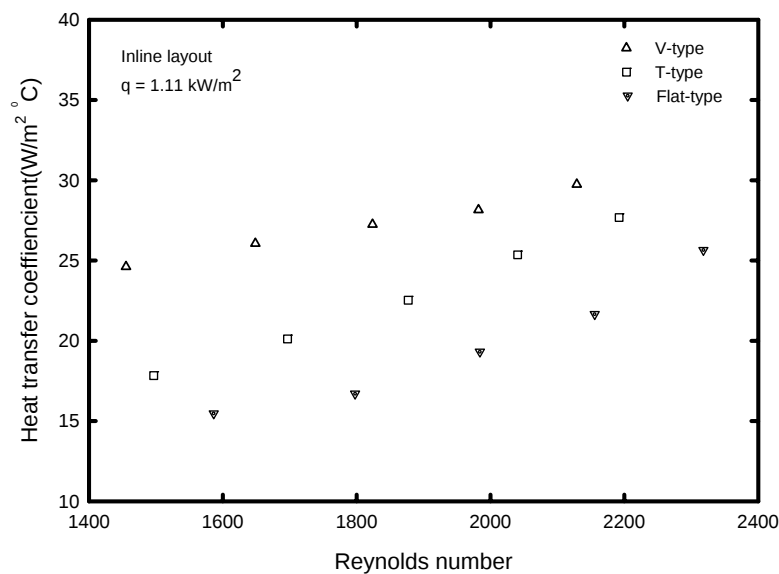
ภาพประกอบ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผ่นทดสอบกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนเยื้องกัน ที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ

จากภาพประกอบ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแผ่นทดสอบกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่สภาวะต่างๆ พบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น (เรย์โนลด์นัมเบอร์สูงขึ้น) อุณหภูมิของแผ่นทดสอบก็จะลดลง เนื่องจากค่าการพาความร้อนของอากาศเกี่ยวข้องโดยตรงกับมวลของอากาศคือถ้ามวลของอากาศที่ใช้พาความร้อนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดการพาความร้อนได้มาก ซึ่งมวลของอากาศที่มีความเร็วสูง (เรย์โนลด์นัมเบอร์สูง) จะมีความเร็วกว่ามวลของอากาศที่มีความเร็วต่ำ (เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ) ทำให้อุณหภูมิของแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วสูงมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วต่ำ ค่าฟลักซ์ความร้อนที่มากกว่าจะทำให้อุณหภูมิของแผ่นทดสอบสูงกว่าแผ่นทดสอบที่มีค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ที่อัตราการไหลเท่ากัน

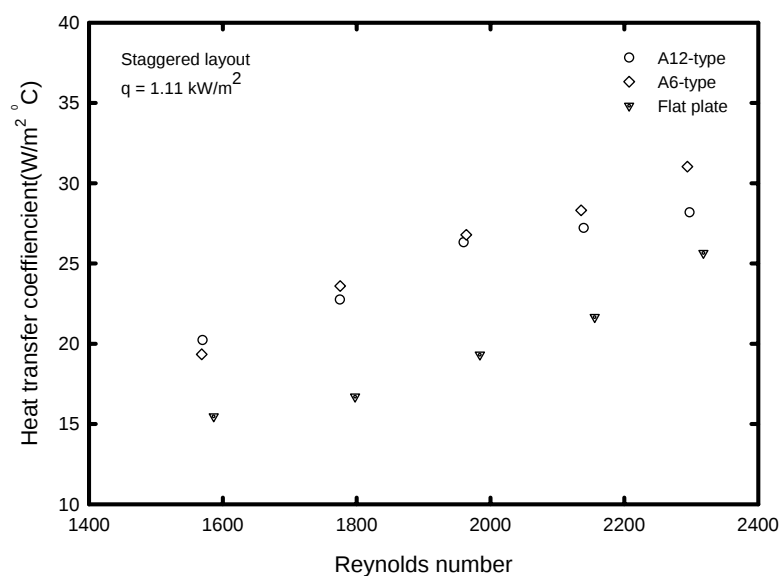


ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศทางออกกับ เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. โดยลักษณะการ วางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกันที่  $q = 1.11 \text{ kW/m}^2$

จากภาพประกอบ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทางออกของอากาศกับเรย์โนลด์์ นัมเบอร์โดยเปรียบเทียบระหว่างการวางตำแหน่งลอนตรงกัน(Inline layout)และการตำแหน่งลอนเยื้อง กัน (Staggered layout) พบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น (เรย์โนลด์์นัมเบอร์สูงขึ้น) อุณหภูมิ ของอากาศทางออกก็จะลดลง เนื่องจากค่าการพาความร้อนของอากาศเกี่ยวข้องโดยตรงกับมวลของ อากาศคือถ้ามวลของอากาศที่ใช้พาความร้อนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดการพาความร้อนได้มาก ซึ่งมวล ของอากาศที่มีความเร็วสูง (เรย์โนลด์์นัมเบอร์สูง) จะมีความเร็วกว่ามวลของอากาศที่มีความเร็วต่ำ (เรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่ำ) ทำให้อุณหภูมิของอากาศทางออกของแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วย ความเร็วสูงมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิทางออกของแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วต่ำ ซึ่งการวางตำแหน่งลอนตรงกันทำให้เกิดไหลวนของอากาศทำให้การพาความร้อนได้ดีมีผลให้อุณหภูมิ ของอากาศทางออกสูงกว่าการวางตำแหน่งลอนเยื้องกัน

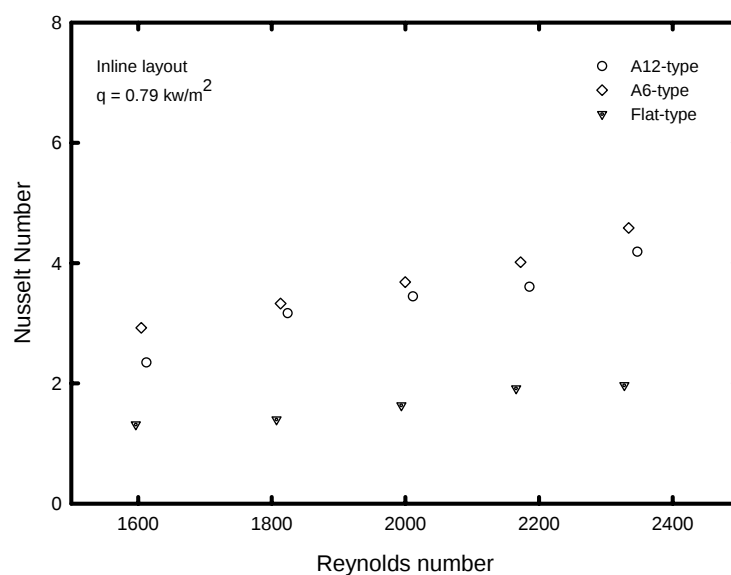


ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อน กับเรย์โนลด์ส์ นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมูและแผ่นทดสอบผิวเรียบ โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกัน ที่  $q=1.11\text{ kW/m}^2$

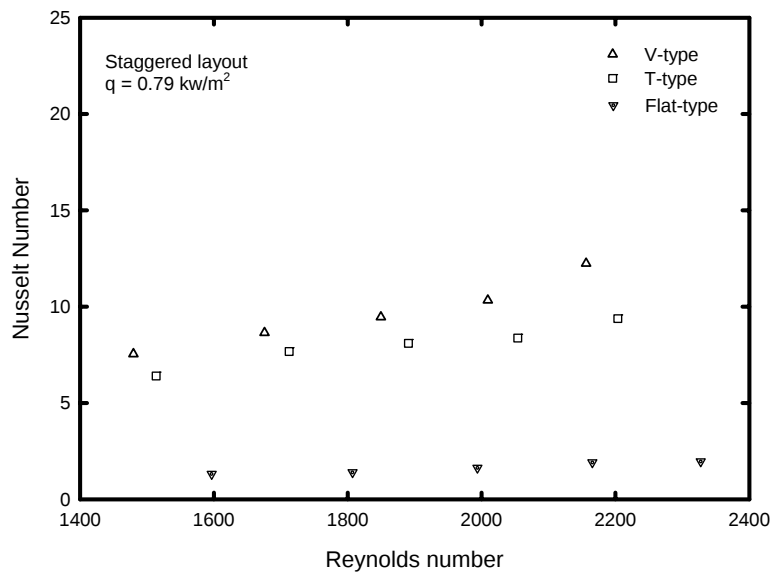


ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อน กับเรย์โนลด์ส์ นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม ลอนโค้งขนาด 12 มม. และแผ่นทดสอบผิวเรียบ. โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนเยื้องกัน ที่  $q=1.11\text{ kW/m}^2$

จากภาพประกอบ 26 ถึง 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผ่นทดสอบกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่สภาวะต่างๆ พบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น (เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูงขึ้น) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผ่นทดสอบก็จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าการพาความร้อนของอากาศเกี่ยวข้องโดยตรงกับมวลของอากาศคือถ้ามวลของอากาศที่ใช้พาความร้อนมีปริมาณมาก ก็จะเกิดการพาความร้อนได้มาก ซึ่งมวลของอากาศที่มีความเร็วสูง (เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูง) จะมีความเร็วมากกว่ามวลของอากาศที่มีความเร็วต่ำ (เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ) ทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วสูงมีค่ามากกว่าแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วต่ำ โดยที่แผ่นทดสอบที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศมากกว่าจะทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าแผ่นทดสอบที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า ที่อัตราการไหลเท่ากัน คือ แผ่นทดสอบที่ลักษณะเป็นลอนสามเหลี่ยม > ลอนสี่เหลี่ยมคางหมู > ลอนโค้งขนาด 6 มม. > ลอนโค้งขนาด 12 มม. > แผ่นเรียบตามลำดับ เนื่องจากแผ่นทดสอบที่เป็นลอนสามเหลี่ยมมีพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศมากที่สุดจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุด และแผ่นเรียบมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำที่สุด

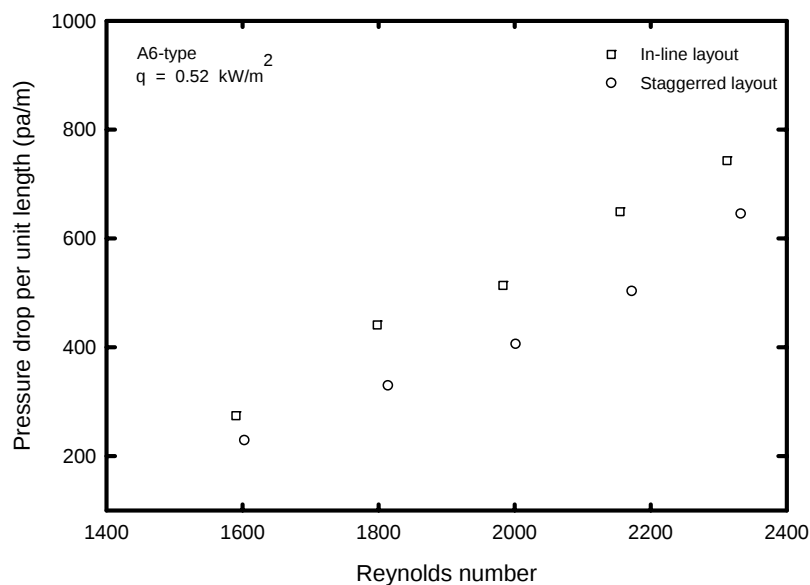


ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. ลอนโค้งขนาด 12 มม. และแผ่นทดสอบผิวเรียบโดยวางตำแหน่งลอนตรงกันที่  $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$

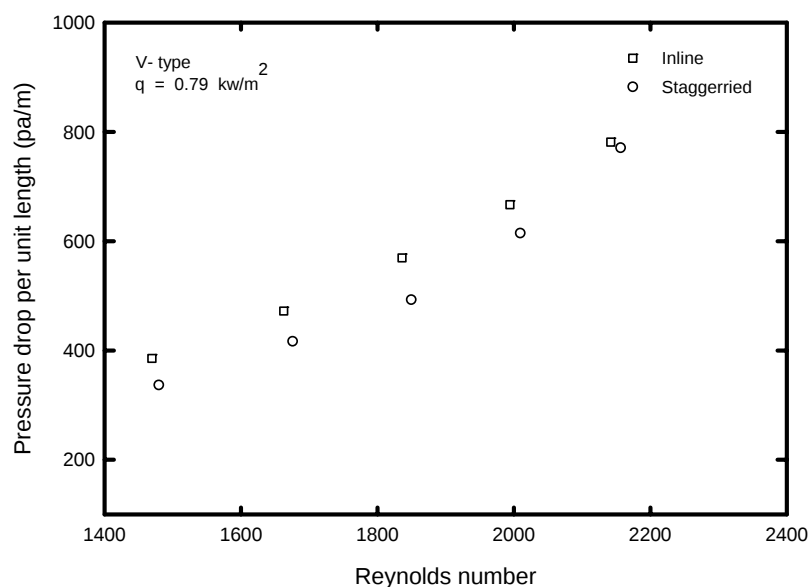


ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขไน้มเบอร์กับเรย์โนลด์ไน้มเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม คือเหลี่ยมคางหมูและแผ่นทดสอบผิวเรียบ โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันที่  $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$

จากภาพประกอบ 28 ถึง 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขไน้มเบอร์ กับเรย์โนลด์ไน้มเบอร์ที่สภาวะต่างๆ พบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น (เรย์โนลด์ไน้มเบอร์สูงขึ้น) จะทำให้ผลต่างอุณหภูมิทางเข้าและทางออกลดลง ซึ่งเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) เพิ่มขึ้น และที่สภาวะเรย์โนลด์ไน้มเบอร์เดียวกันค่าความร้อนต่อพื้นที่ ( $q$ ) เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั้งสองกรณีส่งผลให้ค่าตัวเลขไน้มเบอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และในสภาวะที่เรย์โนลด์ไน้มเบอร์ที่เท่ากันแผ่นทดสอบที่มีลอนเป็นสามเหลี่ยมจะมีค่าตัวเลขไน้มเบอร์มากที่สุด เนื่องมาจากมีความยาวพื้นผิวรอบหยัก ( $\bar{\sigma}$ ) มากที่สุดซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าตัวเลขไน้มเบอร์ รองลงมาคือ ลอนสี่เหลี่ยมคางหมู > ลอนโค้งขนาด 6 มม. > ลอนโค้งขนาด 12 มม. โดยที่แผ่นเรียบจะมีค่าตัวเลขไน้มเบอร์ต่ำที่สุด



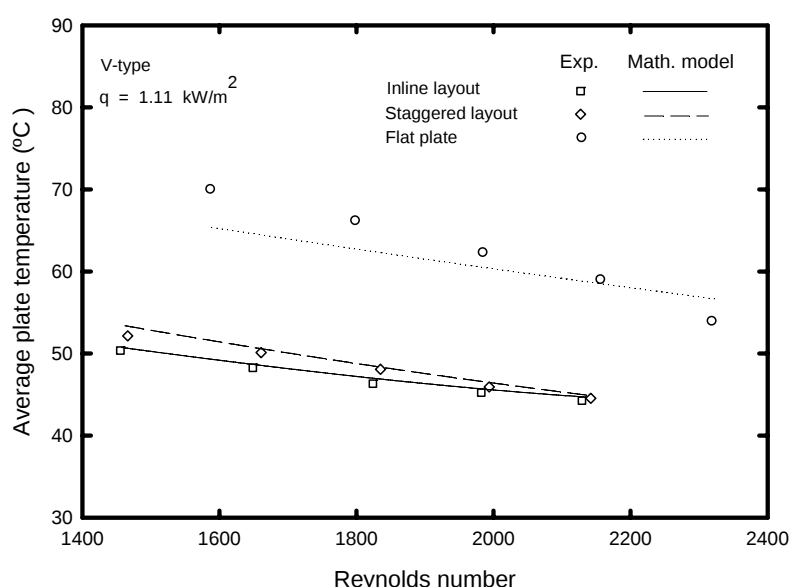
ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของความดัน กับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนเยื้องกันและตรงกัน ที่  $q=0.52 \text{ kW/m}^2$



ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของความดัน กับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนเยื้องกันและตรงกัน ที่  $q=0.79 \text{ kW/m}^2$

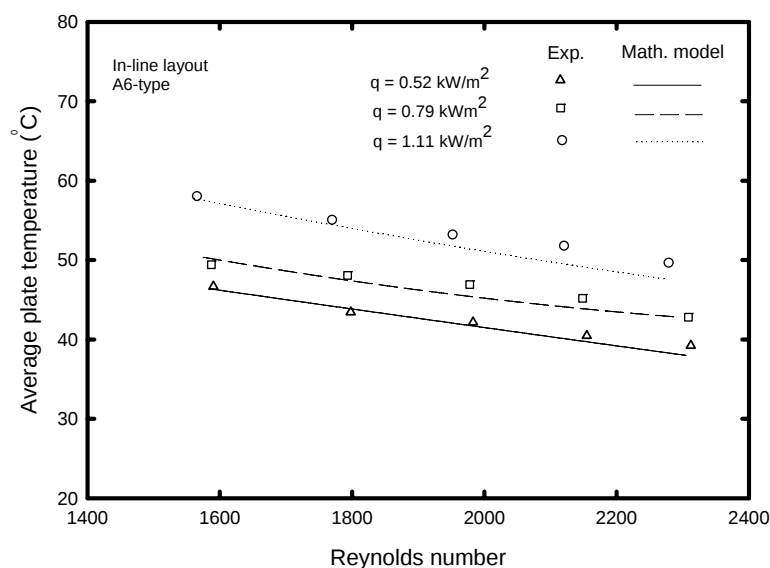
จากภาพประกอบ 30 ถึง 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความดัน กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของแผ่นทดสอบที่ โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกัน เพื่อเปรียบเทียบผลต่างของความดัน พบว่าเมื่อวางตำแหน่งลอนตรงกัน(Inline) ผลต่างความดันสูงกว่า การวางตำแหน่งลอนเยื้องกัน (Staggered) เนื่องการวางตำแหน่งลอนตรงกันทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนมากกว่าการวางตำแหน่งลอนแบบเยื้องกันจึงมีผลให้ ค่าผลต่างความดันสูงกว่าตามไปด้วย

### การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการคำนวณ



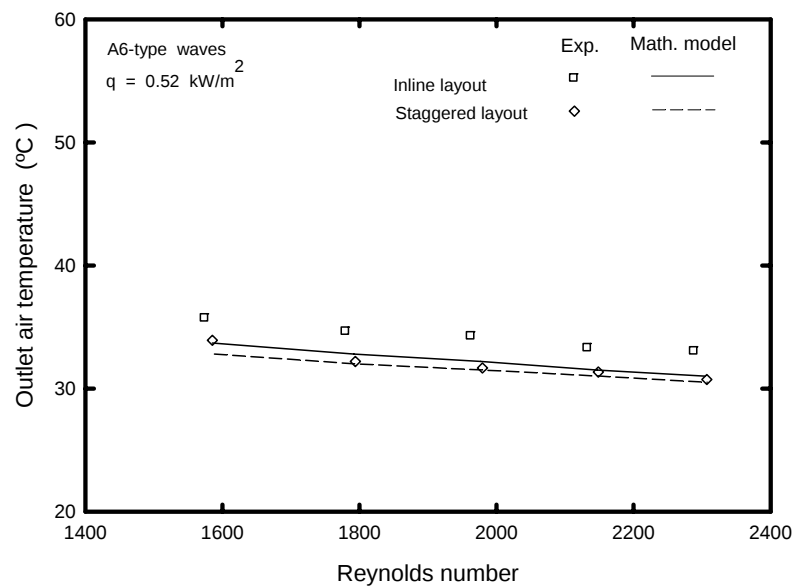
ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นทดสอบกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกันที่  $q = 1.11 \text{ kW/m}^2$

จากภาพประกอบ 32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแผ่นทดสอบกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่สภาวะต่างๆ พบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น (เรย์โนลด์นัมเบอร์สูงขึ้น) อุณหภูมิของแผ่นทดสอบก็จะลดลง และพบว่าแผ่นทดสอบที่วางลักษณะลอนตรงกันจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าลักษณะการวางลอนเยื้องกัน และแผ่นเรียบ เนื่องมาจากลักษณะการวางตำแหน่งของลอนตรงกันจะกีดขวางช่องทางไหลของอากาศเกิดเป็นลักษณะคอคอดทำให้อากาศไหลหมุนวนขึ้น เมื่ออากาศไหลหมุนวนมากกว่าการวางลอนเยื้องกันทำให้หาความร้อนความร้อนระหว่างแผ่นทดสอบกับอากาศมีมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์จะพบว่าการจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีอุณหภูมิสูงกว่าการทดลองเล็กน้อยโดยค่าความคลื่อนเฉลี่ย 0.355 เปอร์เซ็นต์

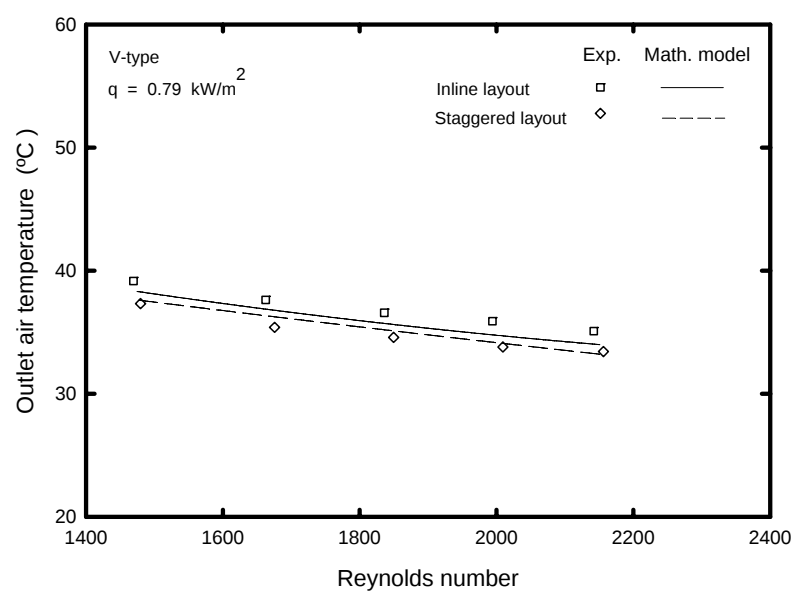


ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผ่นทดสอบกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนเยื้องกัน ที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ

จากภาพประกอบ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแผ่นทดสอบกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่สภาวะต่างๆ พบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น (เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูงขึ้น) อุณหภูมิของแผ่นทดสอบก็จะลดลง เนื่องจากค่าการพาความร้อนของอากาศเกี่ยวข้องโดยตรงกับมวลของอากาศ คือถ้ามวลของอากาศที่ใช้พาความร้อนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้การพาความร้อนได้มาก ซึ่งมวลของอากาศที่มีความเร็วสูง (เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูง) จะมีความเร็วกว่ามวลของอากาศที่มีความเร็วต่ำ (เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ) ทำให้อุณหภูมิของแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วสูงมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วต่ำ ค่าฟลักซ์ความร้อนที่มากกว่าจะทำให้อุณหภูมิของแผ่นทดสอบสูงกว่าแผ่นทดสอบที่มีค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ที่อัตราการไหลเท่ากันเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์จะพบว่าการจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันดีโดยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.546 เปอร์เซ็นต์

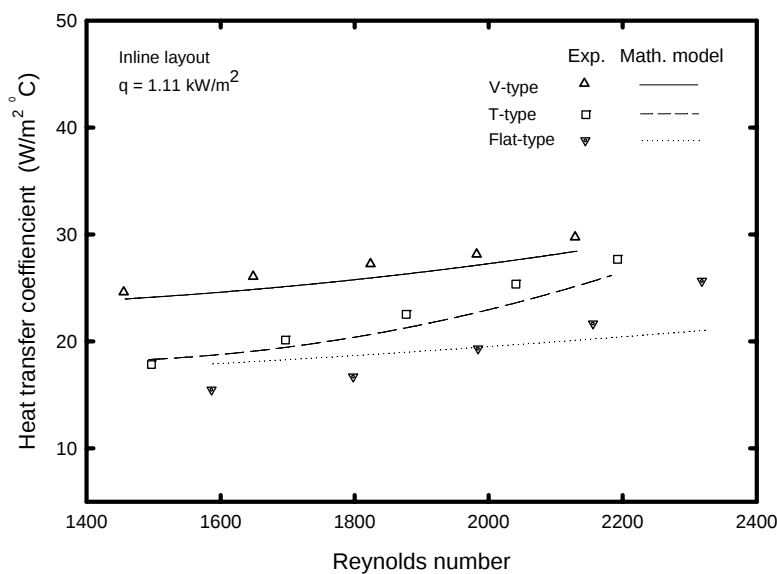


ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศทางออกกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกันที่  $q = 0.52 \text{ kW/m}^2$

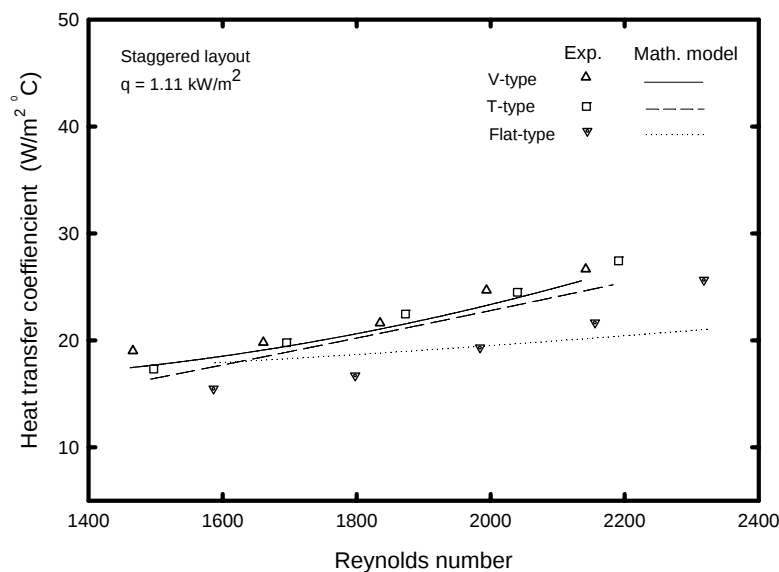


ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศทางออกกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยมโดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกันที่  $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$

จากภาพประกอบ 34 ถึง 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทางออกของอากาศกับเรย์โนลด์นัมเบอร์โดยเปรียบเทียบระหว่างการวางตำแหน่งลอนตรงกัน (Inline layout) และการตำแหน่งลอนเยื้องกัน (Staggered layout) พบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น (เรย์โนลด์นัมเบอร์สูงขึ้น) อุณหภูมิของอากาศทางออกก็จะลดลง เนื่องจากค่าการพาความร้อนของอากาศเกี่ยวข้องโดยตรงกับมวลของอากาศคือถ้ามวลของอากาศที่ใช้พาความร้อนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้การพาความร้อนได้มาก ซึ่งมวลของอากาศที่มีความเร็วสูง (เรย์โนลด์นัมเบอร์สูง) จะมีความเร็วมากกว่ามวลของอากาศที่มีความเร็วต่ำ (เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ) ทำให้อุณหภูมิของอากาศทางออกของแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วสูงมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิทางออกของแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วต่ำ ซึ่งการวางตำแหน่งลอนตรงกันทำให้เกิดไหลวนของอากาศทำให้การพาความร้อนได้ดีมีผลให้อุณหภูมิของอากาศทางออกสูงกว่าการวางตำแหน่งลอนเยื้องกันเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์จะพบว่าการจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันดีโดยค่าความคลื่อนเฉลี่ย 13.832 และ 0.847 เปอร์เซนต์ตามลำดับ

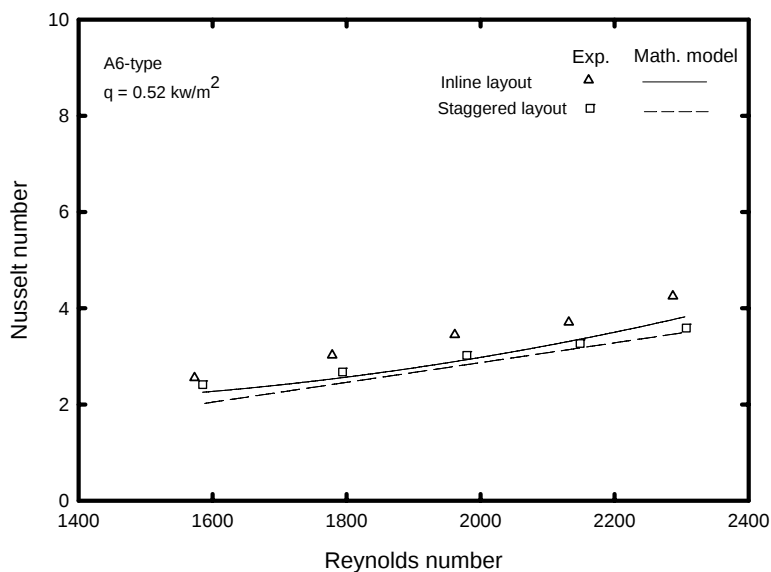


ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อน กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมูและแผ่นทดสอบผิวเรียบ โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกัน ที่  $q=1.11\text{ kW/m}^2$



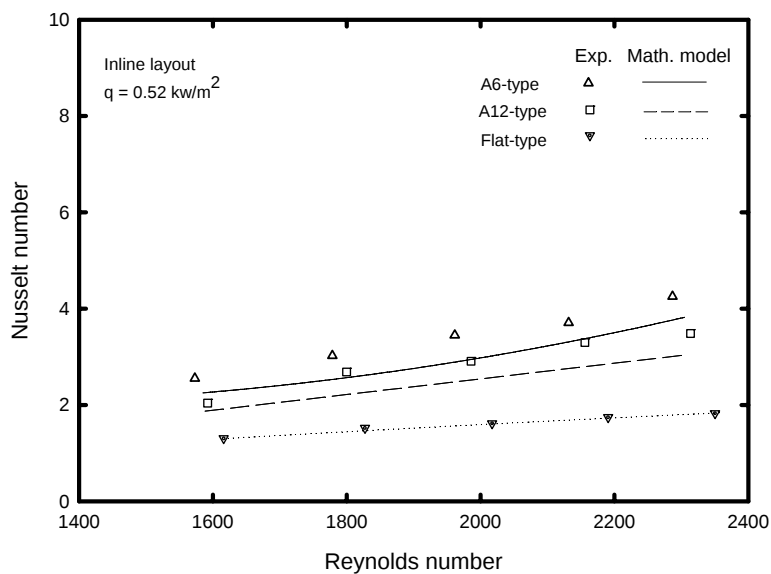
ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อน กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมูและแผ่นทดสอบผิวเรียบ โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนเยื้องกัน ที่  $q = 1.11 \text{ kW/m}^2$

จากภาพประกอบ 36 ถึง 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผ่นทดสอบกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่สภาวะต่างๆ พบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น (เรย์โนลด์นัมเบอร์สูงขึ้น) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผ่นทดสอบก็จะเพิ่มขึ้นลดลง เนื่องจากค่าการพาความร้อนของอากาศเกี่ยวข้องโดยตรงกับมวลของอากาศคือถ้ามวลของอากาศที่ใช้พาความร้อนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดการพาความร้อนได้มาก ซึ่งมวลของอากาศที่มีความเร็วสูง (เรย์โนลด์นัมเบอร์สูง) จะมีความเร็วมมากกว่ามวลของอากาศที่มีความเร็วต่ำ (เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ) ทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วสูงมีค่ามากกว่าแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วต่ำ โดยที่แผ่นทดสอบที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศมากกว่าจะทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าแผ่นทดสอบที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า ที่อัตราการไหลเท่ากัน คือ แผ่นทดสอบที่ลักษณะเป็นลอนสามเหลี่ยม > ลอนสี่เหลี่ยมคางหมู > ลอนโค้งขนาด 6 มม. > ลอนโค้งขนาด 12 มม. > แผ่นเรียบตามลำดับ เนื่องจากแผ่นทดสอบที่เป็นลอนสามเหลี่ยมมีพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศมากที่สุดจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุด และแผ่นเรียบมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์จะพบว่าการจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันดีโดยค่าความคลื่อนเฉลี่ย 3.412 และ 4.32 เปอร์เซ็นต์

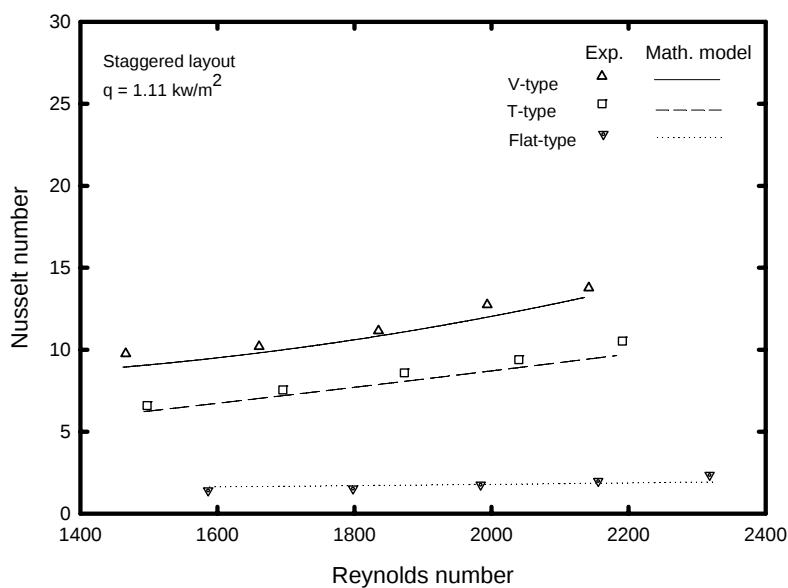


ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขไนล์มเบอร์กับเรย์โนลด์์ไนล์มเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกันที่  $q = 0.52 \text{ kW/m}^2$

จากภาพประกอบ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขไนล์มเบอร์ กับเรย์โนลด์์ไนล์มเบอร์ที่สภาวะต่างๆ พบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น (เรย์โนลด์์ไนล์มเบอร์สูงขึ้น)จะทำให้ผลต่างอุณหภูมิทางเข้าและทางออกลดลง ซึ่งเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) เพิ่มขึ้นและที่สภาวะเรย์โนลด์์ไนล์มเบอร์เดียวกันค่าความร้อนต่อพื้นที่ ( $q$ ) เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั้งสองกรณีส่งผลให้ค่าตัวเลขไนล์มเบอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการวางตำแหน่งลอนตรงกันทำให้เกิดไหลดวนของอากาศมากขึ้นทำให้การพาความร้อนได้ดีมีผลให้ค่าตัวเลขไนล์มเบอร์สูงกว่าการวางตำแหน่งลอนเยื้องกัน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์จะพบว่าการจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันดี โดยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 9.549 เปอร์เซ็นต์

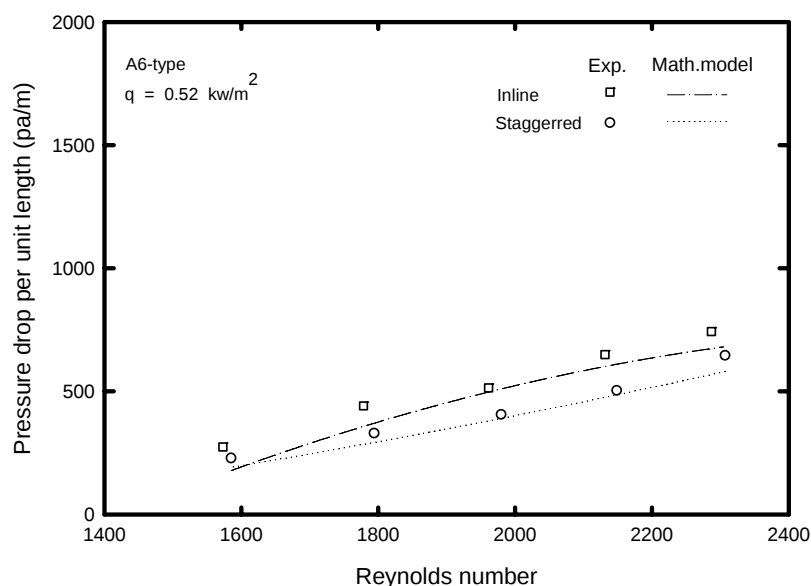


ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัมเบอร์กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. ลอนโค้งขนาด 12 มม. และแผ่นทดสอบผิวเรียบ โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันที่  $q = 0.52 \text{ kW/m}^2$



ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัมเบอร์กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมูและแผ่นทดสอบผิวเรียบ โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันที่  $q = 1.11 \text{ kW/m}^2$

จากภาพประกอบ 39 ถึง 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขไรต์นัมเบอร์ กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่สภาวะต่างๆ พบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น (เรย์โนลด์นัมเบอร์สูงขึ้น) จะทำให้ผลต่างอุณหภูมิทางเข้าและทางออกลดลง ซึ่งเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) เพิ่มขึ้น และที่สภาวะเรย์โนลด์นัมเบอร์เดียวกันค่าความร้อนต่อพื้นที่ ( $q$ ) เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั้งสองกรณีส่งผลให้ค่าตัวเลขไรต์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และในสภาวะที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ที่เท่ากันแผ่นทดสอบที่มีลอนเป็นสามเหลี่ยมจะมีค่าตัวเลขไรต์นัมเบอร์มากที่สุด เนื่องจากมีความยาวพื้นผิวรอยหยัก ( $\bar{\sigma}$ ) มากที่สุดซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าตัวเลขไรต์นัมเบอร์ โดยแผ่นเรียบจะมีค่าตัวเลขไรต์นัมเบอร์ต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์จะพบว่าการจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันดีโดยค่าความคลื่อนเฉลี่ย 10.470 และ 5.296 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

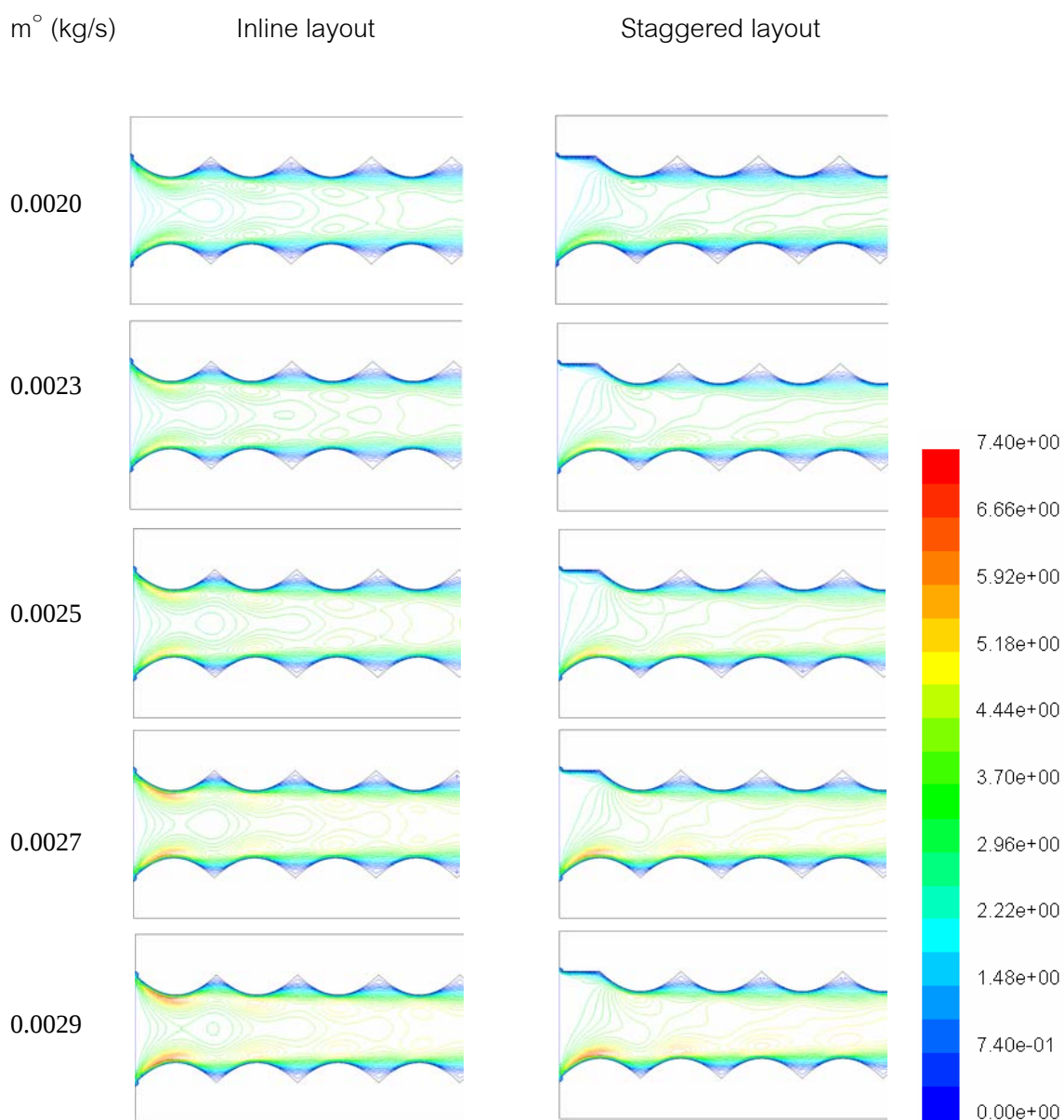


ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของความดัน กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนเยื้องกันและตรงกันที่  $q = 0.52 \text{ kW/m}^2$

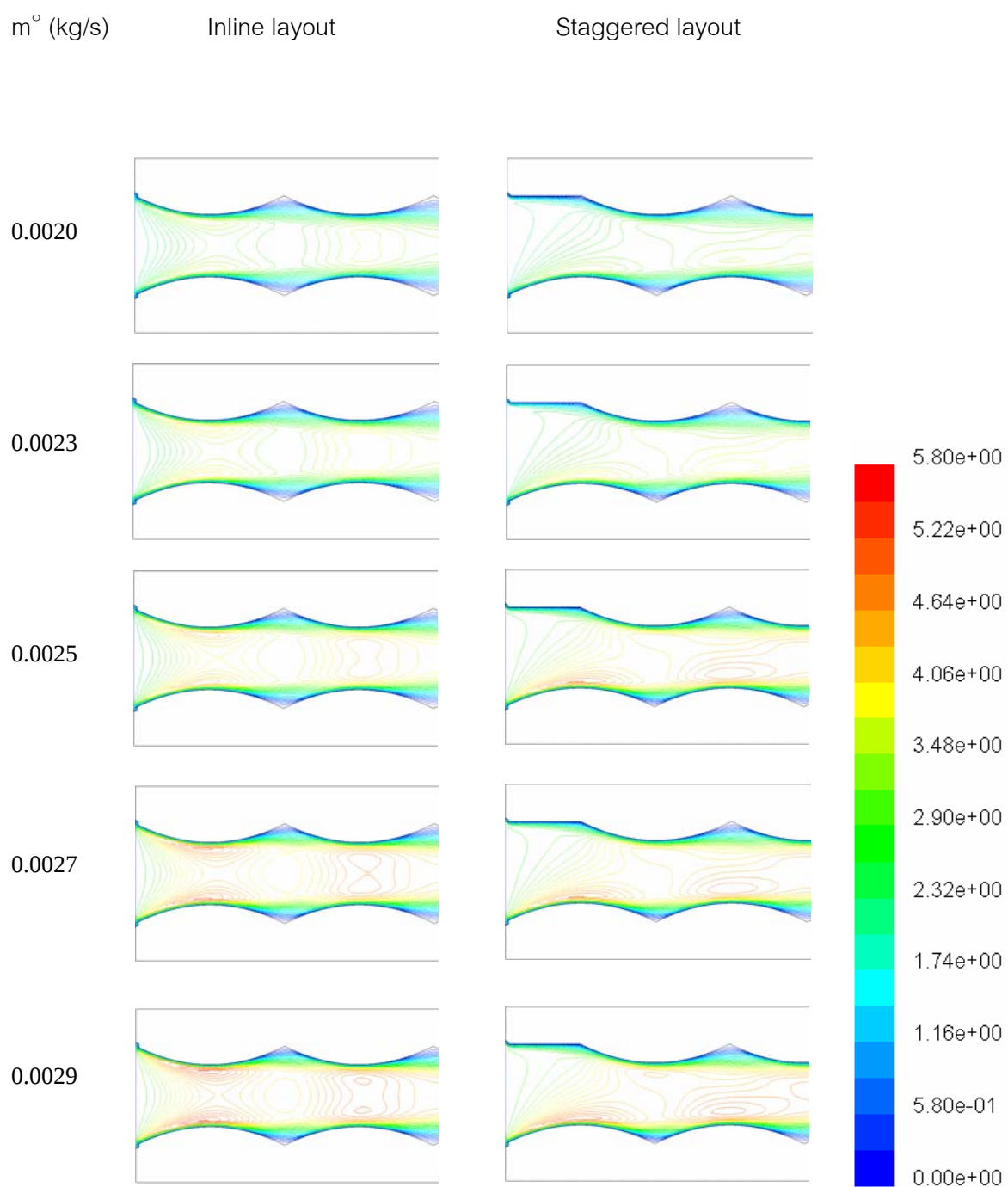
จากภาพประกอบ 41 แสดงสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความดัน กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของแผ่นทดสอบที่ โดยลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกัน เพื่อเปรียบเทียบผลต่างของความดัน พบว่าเมื่อวางตำแหน่งลอนตรงกัน(Inline) ผลต่างความดันสูงกว่า การวางตำแหน่งลอนเยื้องกัน (Staggered) เนื่องการวางตำแหน่งลอนตรงกันทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนมากกว่าการวางตำแหน่งลอนแบบเยื้องกันจึงมีผลให้ ค่าผลต่างความดันสูงกว่าตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบผลการ

ทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์จะพบว่าการจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันดี โดยค่าความเคลื่อนเฉลี่ย 9.523 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

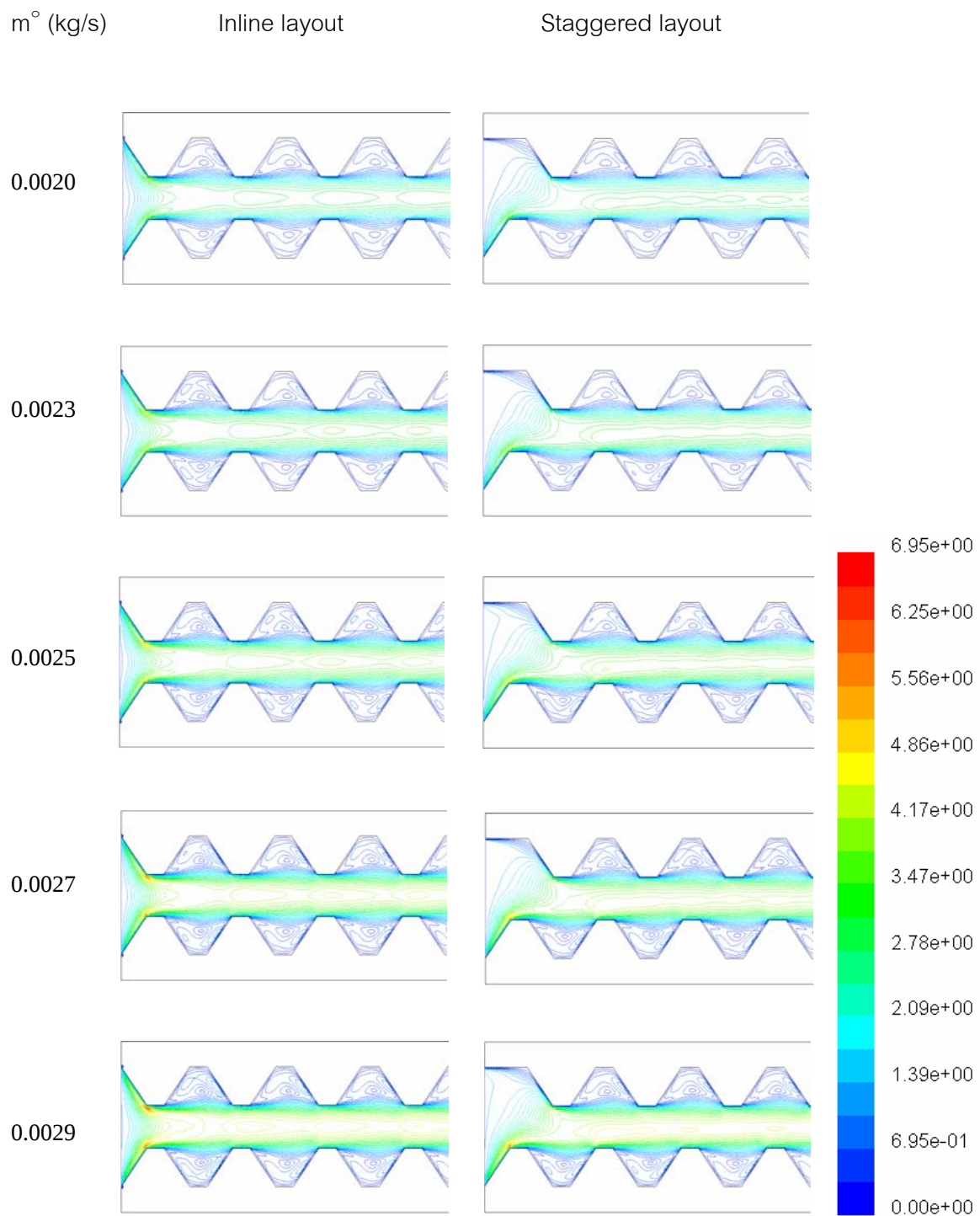
### ผลที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขของแผ่นทดสอบที่ตัวแปรต่างๆ



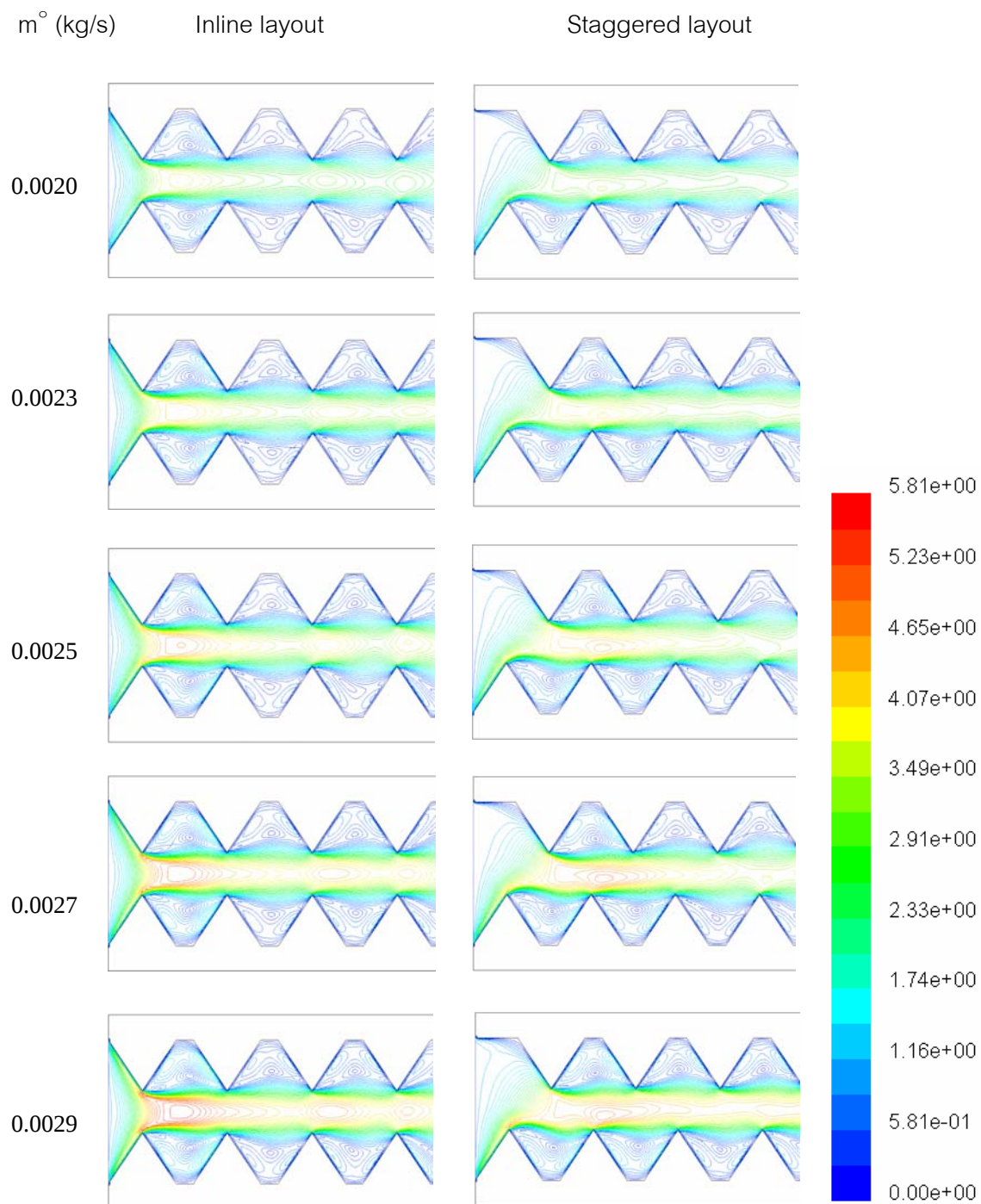
ภาพประกอบ 42 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคอนทัวร์ความเร็วกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบ ที่มีผนังเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มม. โดยการลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกันที่  $q=0.52 \text{ kW/m}^2$



ภาพประกอบ 43 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคอนทิวรัลความเร็วกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบ ที่มีผนังเป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มม. โดยการลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกันที่  $q=0.79 \text{ kW/m}^2$

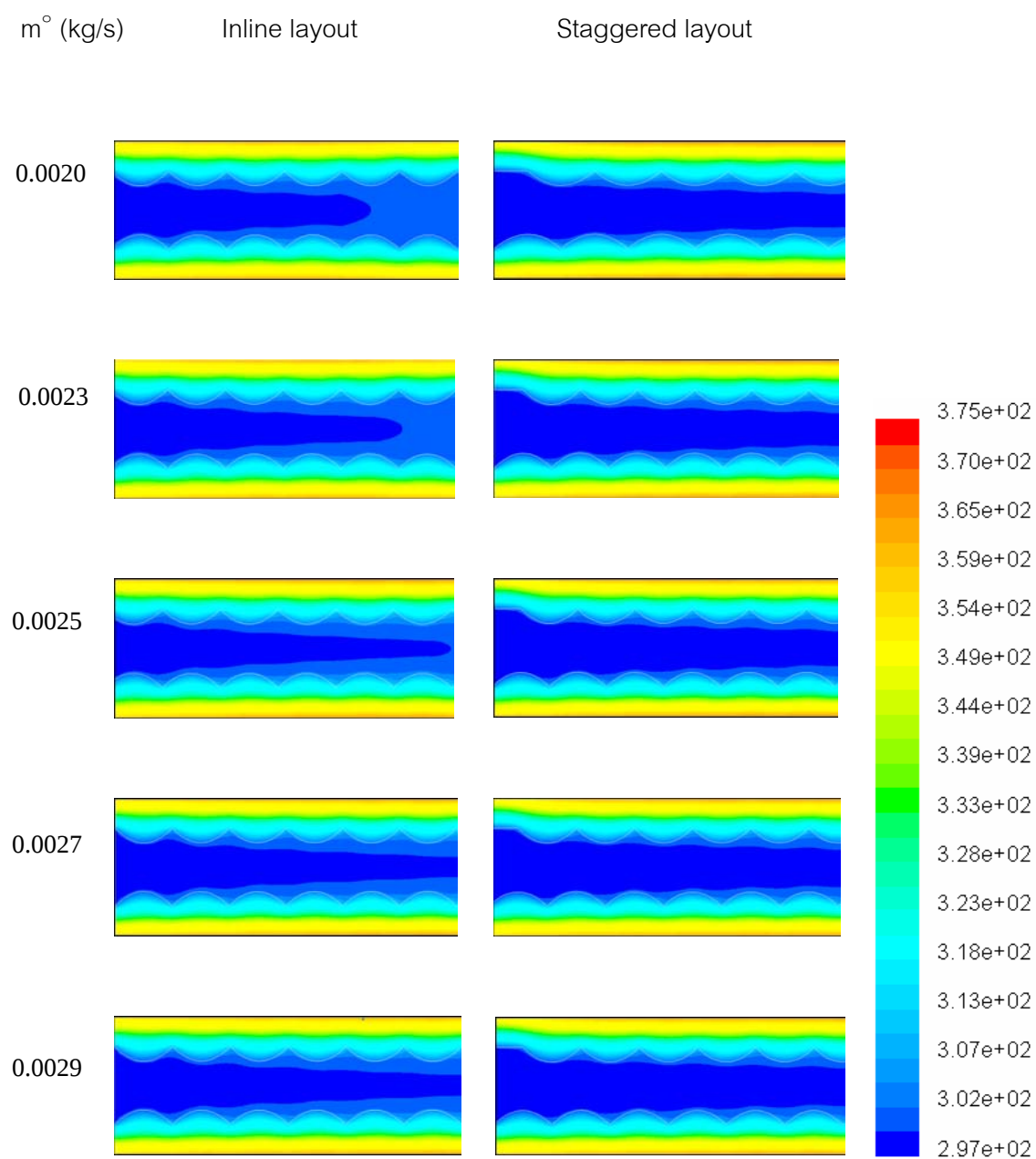


ภาพประกอบ 44 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคอนทิวรัลความเร็วกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบ ที่มีผนังเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู โดยการลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกันที่  $q=1.11 \text{ kW/m}^2$

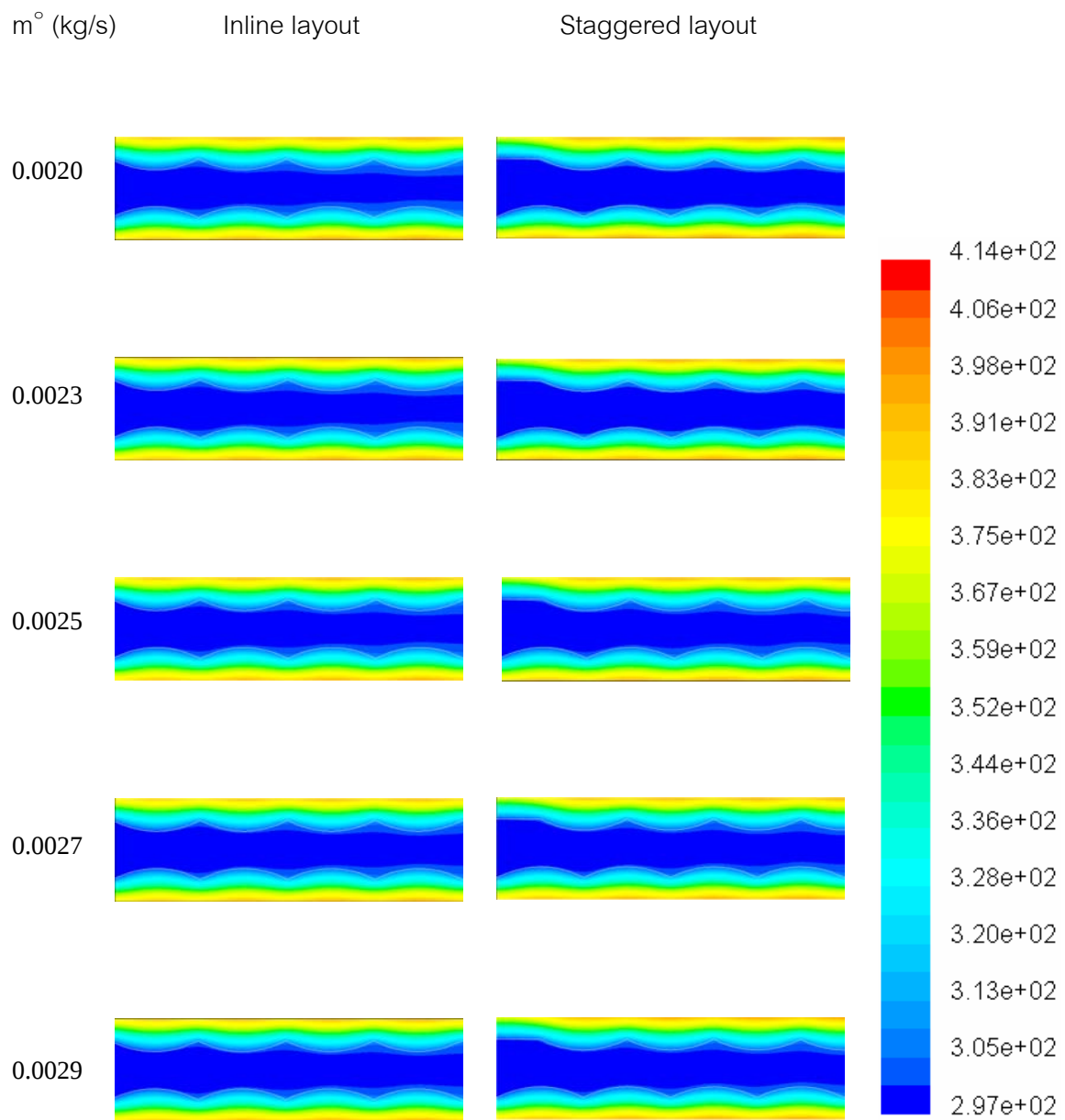


ภาพประกอบ 45 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ ความเร็วกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบ  
ที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยการลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเอียงกันที่  
 $q=0.79 \text{ kW/m}^2$

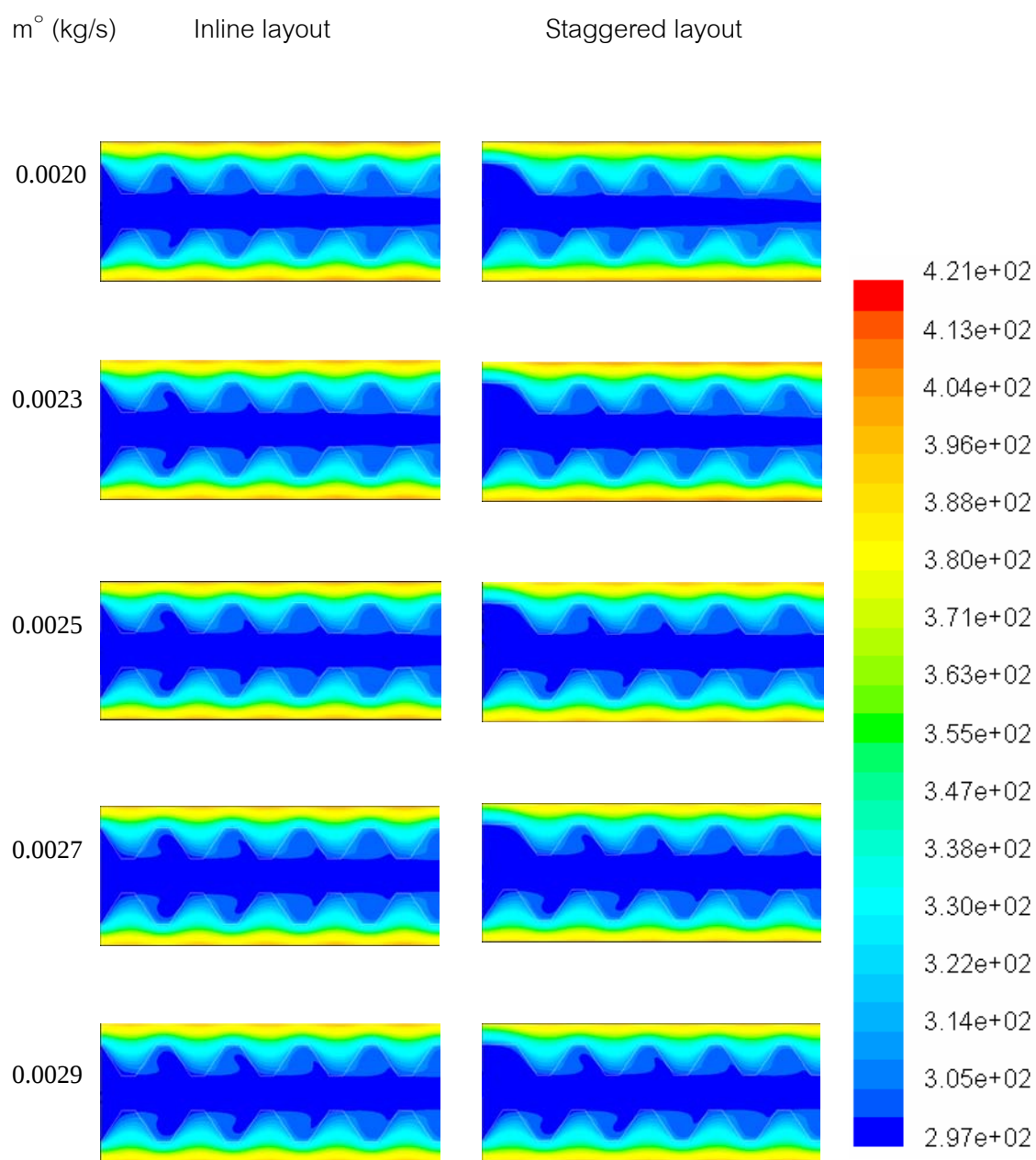
จากภาพประกอบ 42 ถึง 45 เป็นภาพแสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศบริเวณทางเข้า ช่อง การไหลของแผ่นทดสอบที่มีลักษณะผนังเป็นลอน ที่อัตราการไหลต่างๆโดยเปรียบเทียบระหว่างการ วางลอนแบบตรงกัน และการวางลอนแบบเอียงกัน พบว่าการวางลอนแบบตรงกันจะเกิดการหมุนวน ของอากาศสูงกว่าการวางลอนแบบเอียงกัน เมื่อพิจารณาจากเส้นคอนทัวร์ความเร็วของอากาศจะ สังเกตเห็นว่าการวางตำแหน่งลอนตรงกัน มากกว่าการวางตำแหน่งแบบลอนเอียงกัน โดยเปรียบเทียบ ที่แถบสีที่แสดงถึงความเร็วของอากาศ อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศการวางตำแหน่ง ลอนตรงกันยังมีมากกว่าการวางตำแหน่งแบบลอนเอียงกันอีกด้วย เมื่อเปรียบเทียบความเร็วและการ เปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศระหว่างลอนลักษณะต่างๆ จะพบว่าลอนสามเหลี่ยมจะมีมากที่สุด รองลงมาคือ ลอนสี่เหลี่ยมคางหมู ลอนโค้งขนาด 6 มิลลิเมตร และลอนโค้งขนาด 12 มิลลิเมตร โดยที่ ความเร็วและการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในช่องการไหลขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศด้วย ใน อัตราการไหลของอากาศที่สูงจะทำให้การหมุนวนของอากาศสูงขึ้นตาม ซึ่งมีผลต่อการพาความร้อน



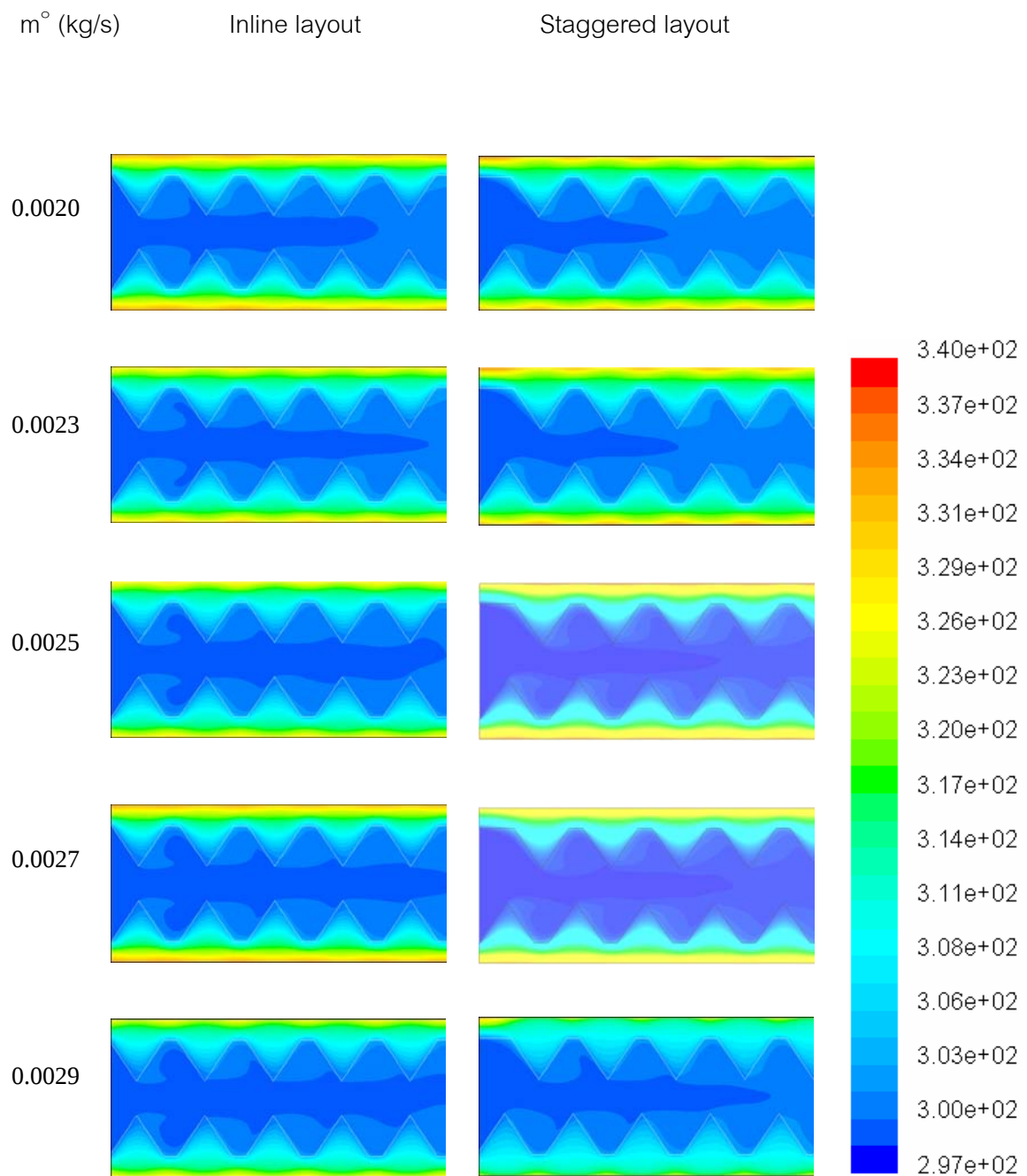
ภาพประกอบ 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 6 มม. โดยการลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเอียงกันที่  $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$



ภาพประกอบ 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนโค้งขนาด 12 มม. โดยการลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกันที่  $q = 0.79 \text{ kW/m}^2$



ภาพประกอบ 48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู โดยการลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกันที่  $q=1.11 \text{ kW/m}^2$



ภาพประกอบ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยการลักษณะการวางตำแหน่งลอนตรงกันและเยื้องกันที่  $q=0.52 \text{ kW/m}^2$

จากภาพประกอบ 45 ถึง 49 เป็นภาพแสดงอุณหภูมิของของอากาศและแผ่นทดสอบบริเวณทางเข้า ช่องการไหลของแผ่นทดสอบที่มีลักษณะผนังเป็นลอน ที่อัตราการไหลต่างๆโดยเปรียบเทียบระหว่างการวางลอนแบบตรงกันเมื่อพิจารณาจากแถบสี พบว่าการวางลอนแบบตรงกันจะอุณหภูมิต่ำกว่าการวางลอนแบบเอียงกัน และเมื่อค่าอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น(เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูงขึ้น) อุณหภูมิของแผ่นทดสอบก็จะลดลง เนื่องจากค่าการพาความร้อนของอากาศเกี่ยวข้องโดยตรงกับมวลของอากาศคือถ้ามวลของอากาศที่ใช้พาความร้อนมีปริมาณมาก ก็จะเกิดการพาความร้อนได้มาก ซึ่งมวลของอากาศที่มีความเร็วสูง(เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูง) จะมีความเร็วมากกว่ามวลของอากาศที่มีความเร็วต่ำ(เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ) ทำให้อุณหภูมิของแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วสูงมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของแผ่นทดสอบที่มีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็วต่ำ โดยที่แผ่นทดสอบที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศมากกว่าจะทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าแผ่นทดสอบที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า ที่อัตราการไหลเท่ากัน คือ แผ่นทดสอบที่มีลักษณะเป็นลอนสามเหลี่ยม> ลอนสี่เหลี่ยมคางหมู> ลอนโค้งขนาด 6 มม>. ลอนโค้งขนาด 12 มม>. แผ่นเรียบตามลำดับ เนื่องจากแผ่นทดสอบที่เป็นลอนสามเหลี่ยมมีพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศมากที่สุดจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุด และแผ่นเรียบมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำที่สุด

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาทั้งการทดลองแล้วนำผลมาคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการ และการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลที่ได้จากทั้งสองวิธีมาเสนอในลักษณะกราฟ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ภาพที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของอากาศ ดังที่เสนอในบทที่ 4 ผลที่สามารถสรุปได้ดังนี้

- อุณหภูมิทางออกเฉลี่ย มีค่าน้อยลงเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการทดลอง และจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันโดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 2.897 เปอร์เซ็นต์
- อุณหภูมิแผ่นทดสอบเฉลี่ย มีค่าน้อยลงเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการทดลอง และจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันโดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 0.427 เปอร์เซ็นต์
- ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีค่าสูงขึ้นโดยแปรตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 10.27 เปอร์เซ็นต์
- เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่แผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนชนิดต่างๆ กับแผ่นเรียบ เพิ่มขึ้น 5.51 เปอร์เซ็นต์สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขและ 16.90 เปอร์เซ็นต์สำหรับ การทดลอง
- เมื่อเปรียบเทียบค่านัสเซลล์น์ัมเบอร์ของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนชนิดต่างๆ กับแผ่นเรียบ เพิ่มขึ้น 253.71 เปอร์เซ็นต์สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขและ 281.50 เปอร์เซ็นต์สำหรับ การทดลอง
- เมื่อเปรียบเทียบค่านัสเซลล์น์ัมเบอร์ที่แผ่นทดสอบที่มีตำแหน่งลอนตรงกันกับการวางตำแหน่งลอนเอียงกันพบว่า การวางตำแหน่งลอนตรงกันมีค่าเพิ่มขึ้นดังนี้ แผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอน โค้งขนาด 6 มม. เพิ่มขึ้น 5.66 เปอร์เซ็นต์ แผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอน โค้งขนาด 12 มม. เพิ่มขึ้น 0.89 เปอร์เซ็นต์ แผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอน สี่เหลี่ยมคางหมู เพิ่มขึ้น 7.70 เปอร์เซ็นต์ แผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอนสามเหลี่ยม เพิ่มขึ้น 16.41 เปอร์เซ็นต์

## ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของแผ่นทดสอบที่มีผนังเป็นลอน เป็นการวิจัยที่มีขอบเขตที่กว้างและมีรายละเอียดมาก ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาได้บางส่วนเท่านั้น เพราะว่ามีขีดจำกัดในด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในการเก็บข้อมูล ทำให้ไม่สามารถศึกษาการถ่ายเทความร้อนครอบคลุมได้ทั้งหมด ในอนาคตอาจมีการเพิ่มเติมเงื่อนไขหรืออุปกรณ์อย่างเช่น

- อาจทำการเพิ่มความเร็วลมให้สูงขึ้น
- อาจทำการเพิ่มกริดให้ละเอียดมากขึ้นในส่วนของโมเดลเพื่อทำการศึกษาการไหลวนของ

อากาศด้านหลังครีป

- ควรเปลี่ยนลักษณะลอนของแผ่นทดสอบ อัตราการไหล ความสูงของช่องการไหล อีทฟลักค์ เพื่อเป็นการศึกษาค่านัสเซิลส์นัมเบอร์ที่สภาวะอื่นๆ

- ควรปล่อยควันให้ไหลไปในช่องทดสอบ เพื่อที่จะได้ทราบลักษณะการไหลของอากาศ
- อาจออกแบบสร้างชุดอุโมงค์ลม ให้มีขนาดต่างๆ และเปลี่ยนจากท่อสี่เหลี่ยมเป็นท่อกกลม เพื่อเป็นการศึกษาค่านัสเซิลส์นัมเบอร์ที่สภาวะอื่นๆ

บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

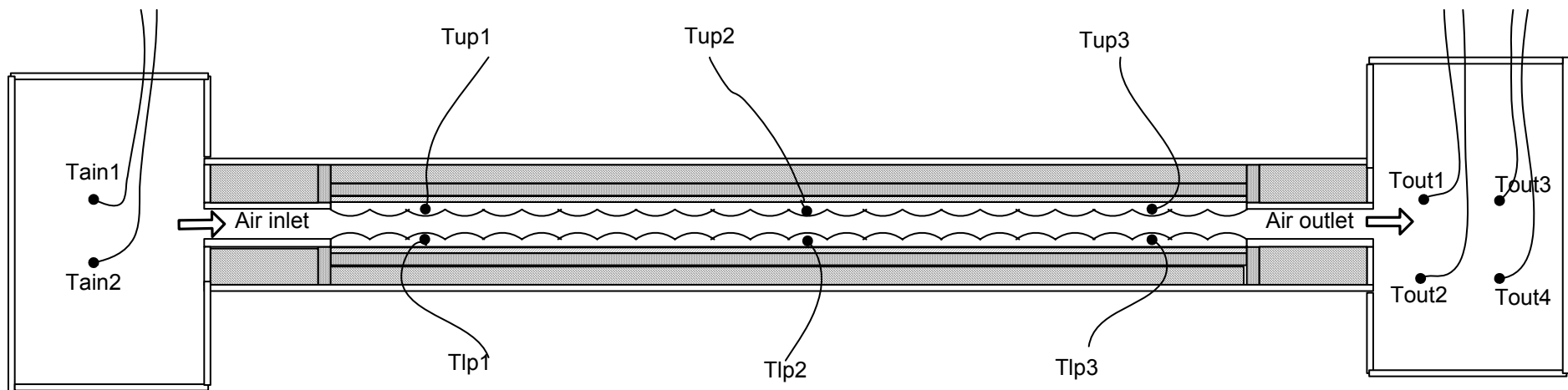
1. นักสิทธิ์ คุ้มพัฒนาชัย. การถ่ายเทความร้อน. ปรับปรุงและพิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: โครงการตำราเรียน สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์. 2533.
2. A.H. H. Ali; & Y. Hanaoka. Experimental study on laminar flow forced-convection in a channel with upper V-corrugated plate heated by radiation. In *International Journal, Heat and Mass Transfe.* 2002; V.45. pp.2107-2117.
3. B. Sunden. Heat transfr and pressure drop in a new type of corrugated channels. In *International Communication, Heat and Mass Transfer.* 2000; V.12. pp. 559-566.
4. C.C. Wang; & C.K. Chen. Forced convection in a wavy-wall channel. IN *International Journal, Heat and Mass Transfer.* 2002; V.45. pp. 2587-2595.
5. C. Zimmerer; et al. Comparison of heat and mass transfer in different heat exchanger geometries with corrugated walls. In *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2001; V.26. pp.269-273.
6. D. Bereiziat; & R. Devienne. Experimental characterization of Newtonian and non-Newtonian fluid flows in corrugated channels. In *International Journal, Engineering Science.* 1999; V.3. pp. 1461-1479.
7. D.R. Sawyers, M. Sen; & H.C. Chang. Heat transfer enhancement in three- dimensional corrugated channel flow. In *International Journal, Heat and Mass Transfe.* 1998; V.41. pp 3559-3573.
8. G. Fabbri. Heat transfer optimization in corrugated wall channels. In *International Journal, Heat and mass Transfer.* 2000; V.43. pp.4299-4310.
9. G. Fabbri; & R. Rossi. Analysis of the heat transfer in the entrance region of optimized corrugated wall channel. In *Internations Communications, Heat and Mass transfer.* 2005; V.32. pp.902-912.
10. H.M. Metwally; & R.M. Manglik. Enhanced heat transfer due to curvature-induced lateral vortices in laminar flows in sinusoidal corrugated-plate channels. In *International Journal, Heat and Mass Transfer.* 2003; V.47. pp.2283-2292.
11. M. Gradeck; & M. Lebouche. Two-phase gas-liquid flow in horizontal corrugated channels. In *International Journal, Multiphase Flow.* 2002; V. 26. pp. 435-443.

12. M. Gradeck; & B. Hoareau; & M. Lebouche. Local analysis of heat transfer inside corrugated channel. In *International Journal, Heat and Mass transfer*. 2005; V. 48. pp.1909-1915.
13. P. Naphon. Laminar convective heat transfer and pressure drop in the corrugated channels. In *Internations Communications, Heat and Mass transfer*. 2006; V.34. pp. 62-71.
14. P. Naphon. Heat transfer characteristics and pressure drop in channel with V corrugated upper and lower plates. In *Energy Conversion and Management*. 2006; V.48 pp.1516-1524.
15. R.C. Yalamanc, A .Sirivat; & K.R. Rajagopal. An experimental investigation of the flow of dilute polymer solution through corrugated channels. In *Non-Newtonian Fluid Mech*. 1995;V. 58. pp. 243-277.
16. Y. Islamoglu; & C. Parmaksizoglu. The effect of channel height on the enhanced heat transfer characteristics in a corrugated heat exchanger channel. In *Applied Thermal Engineering*. 2003; V. 23. pp.979-987.
17. Y. Islamoglu; & C. Parmaksizoglu. Numerical investigation of convective heat transfer and pressure drop in a corrugated heat exchanger channel. In *Applied Thermal Engineering*. 2004; V.24. pp.141-147.
18. Y. Islamoglu; & A. Kurt. Heat transfer analysis using ANNs with experimental data for air flowing in corrugated channels. In *International Journal, Heat and Mass Transfer*. 2004; V. 47. pp.1361-1365.

ตาราง 2 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเรียบ แรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 25.45$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> ·°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|------|
| 0.0020              | 24.82                     | 25.12                     | 35.29                      | 34.72                      | 35.05                      | 33.50                      | 44.68                    | 48.51                    | 54.05                    | 43.06                    | 46.45                    | 56.00                    | 0.08                | 19.49                   | 1616.03 | 14.17                         | 1.31 |
| 0.0023              | 25.40                     | 25.54                     | 32.63                      | 32.57                      | 32.60                      | 32.60                      | 40.77                    | 44.51                    | 49.59                    | 40.81                    | 44.01                    | 52.23                    | 0.13                | 19.10                   | 1827.25 | 16.46                         | 1.52 |
| 0.0025              | 25.25                     | 25.44                     | 33.00                      | 32.67                      | 32.81                      | 31.84                      | 39.34                    | 42.81                    | 47.42                    | 42.72                    | 39.47                    | 49.59                    | 0.18                | 18.67                   | 2017.29 | 17.50                         | 1.62 |
| 0.0027              | 25.52                     | 25.71                     | 32.47                      | 31.96                      | 32.28                      | 31.35                      | 38.18                    | 41.46                    | 45.78                    | 38.54                    | 41.57                    | 47.79                    | 0.21                | 18.66                   | 2190.54 | 18.86                         | 1.75 |
| 0.0029              | 25.78                     | 25.95                     | 32.23                      | 31.71                      | 32.03                      | 31.10                      | 37.62                    | 41.07                    | 45.60                    | 38.38                    | 41.33                    | 46.94                    | 0.23                | 19.14                   | 2350.27 | 19.73                         | 1.83 |



ตาราง 3 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเรียบ แรงดันไฟฟ้าของ heater 25 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 26.50$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | Qave<br>(W) | Re      | h<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------|---------|-----------------------------|------|
| 0.0020              | 25.70                     | 25.88                     | 40.59                      | 39.69                      | 40.16                      | 38.16                      | 53.86                    | 58.48                    | 67.44                    | 53.06                    | 57.45                    | 69.70                    | 0.10                | 28.37       | 1596.65 | 14.36                       | 1.32 |
| 0.0023              | 26.21                     | 26.34                     | 38.72                      | 38.09                      | 38.40                      | 36.80                      | 52.04                    | 54.95                    | 63.72                    | 51.04                    | 55.88                    | 66.95                    | 0.13                | 28.21       | 1807.17 | 15.23                       | 1.40 |
| 0.0025              | 26.66                     | 26.89                     | 38.05                      | 37.48                      | 37.70                      | 36.21                      | 47.87                    | 52.32                    | 59.65                    | 48.37                    | 53.10                    | 62.60                    | 0.17                | 28.75       | 1993.94 | 17.78                       | 1.63 |
| 0.0027              | 26.96                     | 27.21                     | 37.27                      | 36.80                      | 36.98                      | 35.66                      | 43.74                    | 48.23                    | 56.20                    | 44.83                    | 50.55                    | 59.76                    | 0.21                | 28.86       | 2165.68 | 20.84                       | 1.92 |
| 0.0029              | 26.45                     | 26.71                     | 36.04                      | 35.67                      | 35.82                      | 34.68                      | 42.48                    | 47.01                    | 53.91                    | 43.80                    | 49.64                    | 57.92                    | 0.24                | 28.35       | 2327.66 | 21.37                       | 1.97 |

ตาราง 4 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเรียบ แรงดันไฟฟ้าของ heater 30 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 25.42$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | Qave<br>(W) | Re      | h<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------|---------|-----------------------------|------|
| 0.0020              | 24.77                     | 24.97                     | 44.19                      | 44.16                      | 44.17                      | 43.46                      | 62.48                    | 69.41                    | 81.32                    | 62.64                    | 65.01                    | 79.49                    | 0.12                | 39.99       | 1586.35 | 15.47                       | 1.41 |
| 0.0023              | 24.86                     | 25.03                     | 42.51                      | 41.52                      | 42.05                      | 40.78                      | 58.61                    | 65.67                    | 77.02                    | 59.06                    | 61.38                    | 75.60                    | 0.13                | 39.98       | 1797.73 | 16.71                       | 1.53 |
| 0.0025              | 25.50                     | 25.64                     | 41.71                      | 40.72                      | 41.25                      | 40.00                      | 54.70                    | 61.23                    | 72.72                    | 55.45                    | 58.20                    | 71.78                    | 0.14                | 41.19       | 1984.14 | 19.32                       | 1.77 |
| 0.0027              | 25.55                     | 25.73                     | 40.91                      | 39.91                      | 40.45                      | 39.20                      | 51.52                    | 57.69                    | 69.03                    | 52.58                    | 55.36                    | 68.05                    | 0.17                | 41.46       | 2155.54 | 21.65                       | 1.98 |
| 0.0029              | 26.00                     | 26.19                     | 39.11                      | 38.48                      | 38.77                      | 38.32                      | 46.21                    | 51.99                    | 65.69                    | 47.77                    | 50.52                    | 61.71                    | 0.20                | 40.81       | 2318.21 | 25.65                       | 2.36 |

ตาราง 5 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มิลลิเมตร โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 26.79$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | Qave<br>(W) | Re      | h<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------|---------|-----------------------------|------|
| 0.0020              | 26.01                     | 26.24                     | 37.04                      | 35.44                      | 36.08                      | 34.55                      | 43.81                    | 49.01                    | 51.84                    | 43.06                    | 44.09                    | 48.16                    | 0.08                | 19.37       | 1608.07 | 14.95                       | 2.55 |
| 0.0023              | 26.54                     | 26.76                     | 32.63                      | 32.57                      | 32.60                      | 33.78                      | 40.56                    | 45.60                    | 48.31                    | 39.90                    | 40.75                    | 45.49                    | 0.13                | 18.82       | 1818.02 | 17.68                       | 3.02 |
| 0.0025              | 26.90                     | 27.04                     | 35.16                      | 34.09                      | 34.46                      | 33.57                      | 39.30                    | 43.88                    | 47.03                    | 38.57                    | 40.06                    | 44.09                    | 0.15                | 19.56       | 2004.92 | 20.15                       | 3.45 |
| 0.0027              | 26.86                     | 27.13                     | 34.24                      | 33.40                      | 33.65                      | 32.14                      | 37.77                    | 42.51                    | 45.18                    | 37.02                    | 38.18                    | 42.10                    | 0.19                | 18.85       | 2178.83 | 21.65                       | 3.71 |
| 0.0029              | 27.10                     | 27.31                     | 33.87                      | 33.15                      | 33.38                      | 31.99                      | 36.67                    | 41.16                    | 43.79                    | 35.83                    | 37.02                    | 40.95                    | 0.21                | 19.22       | 2337.74 | 24.81                       | 4.25 |

ตาราง 6 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มิลลิเมตร โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 25 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 25.95$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | Qave<br>(W) | Re      | h<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------|---------|-----------------------------|------|
| 0.002               | 25.52                     | 25.78                     | 38.64                      | 37.23                      | 38.15                      | 36.53                      | 46.60                    | 51.49                    | 54.62                    | 46.64                    | 46.70                    | 50.41                    | 0.10                | 25.21       | 1604.81 | 17.14                       | 2.92 |
| 0.0023              | 25.57                     | 25.82                     | 37.97                      | 36.71                      | 37.51                      | 35.21                      | 44.99                    | 50.05                    | 53.44                    | 45.15                    | 45.36                    | 49.38                    | 0.13                | 27.16       | 1813.33 | 19.50                       | 3.33 |
| 0.0025              | 25.93                     | 26.11                     | 37.48                      | 36.33                      | 37.05                      | 34.94                      | 43.92                    | 48.98                    | 52.40                    | 44.10                    | 44.16                    | 47.98                    | 0.16                | 28.31       | 1999.78 | 21.57                       | 3.68 |
| 0.0027              | 26.16                     | 26.30                     | 36.62                      | 35.55                      | 36.22                      | 34.33                      | 42.45                    | 47.29                    | 50.43                    | 42.49                    | 42.36                    | 46.08                    | 0.19                | 28.14       | 2172.39 | 23.50                       | 4.02 |
| 0.0029              | 26.07                     | 26.21                     | 35.52                      | 34.66                      | 35.14                      | 33.63                      | 40.18                    | 44.66                    | 47.52                    | 40.12                    | 40.56                    | 43.78                    | 0.22                | 27.73       | 2334.03 | 26.78                       | 4.58 |

ตาราง 7 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มิลลิเมตร โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 30 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 26.46$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | h<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-----------------------------|------|
| 0.002               | 25.70                     | 25.88                     | 45.31                      | 43.30                      | 44.75                      | 42.99                      | 54.89                    | 59.88                    | 66.30                    | 52.69                    | 55.32                    | 59.16                    | 0.10                | 38.26                   | 1582.81 | 20.43                       | 3.45 |
| 0.0023              | 25.91                     | 26.12                     | 43.90                      | 42.26                      | 43.44                      | 42.48                      | 51.73                    | 57.05                    | 63.17                    | 49.78                    | 51.74                    | 56.89                    | 0.14                | 39.95                   | 1789.41 | 24.05                       | 4.07 |
| 0.0025              | 26.58                     | 26.77                     | 43.30                      | 41.81                      | 42.81                      | 42.25                      | 49.98                    | 55.23                    | 61.17                    | 47.99                    | 49.72                    | 55.08                    | 0.17                | 41.58                   | 1973.71 | 27.41                       | 4.64 |
| 0.0027              | 26.80                     | 26.92                     | 42.95                      | 41.48                      | 42.42                      | 40.17                      | 48.99                    | 53.72                    | 59.73                    | 46.41                    | 48.38                    | 53.50                    | 0.19                | 42.24                   | 2144.12 | 29.46                       | 4.99 |
| 0.0029              | 26.90                     | 27.05                     | 41.85                      | 40.56                      | 41.34                      | 39.24                      | 46.77                    | 51.78                    | 57.33                    | 44.48                    | 46.39                    | 51.25                    | 0.24                | 41.99                   | 2303.92 | 32.37                       | 5.49 |

ตาราง 8 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มิลลิเมตร โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 24.84$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|------|
| 0.002               | 24.53                     | 24.80                     | 34.93                      | 33.60                      | 34.22                      | 32.90                      | 44.20                    | 47.63                    | 49.48                    | 42.44                    | 43.42                    | 46.95                    | 0.07                | 19.38                   | 1620.37 | 14.06                         | 2.41 |
| 0.0023              | 24.63                     | 24.84                     | 32.63                      | 32.57                      | 32.60                      | 30.96                      | 40.98                    | 44.11                    | 45.80                    | 39.31                    | 40.33                    | 43.77                    | 0.10                | 18.16                   | 1833.82 | 15.55                         | 2.67 |
| 0.0025              | 24.71                     | 24.91                     | 32.53                      | 31.63                      | 32.04                      | 30.47                      | 39.50                    | 42.40                    | 44.10                    | 37.58                    | 38.78                    | 42.23                    | 0.12                | 18.59                   | 2023.48 | 17.57                         | 3.02 |
| 0.0027              | 24.88                     | 25.03                     | 32.11                      | 31.32                      | 31.67                      | 30.25                      | 38.45                    | 42.04                    | 43.30                    | 36.71                    | 37.91                    | 41.44                    | 0.15                | 19.08                   | 2196.22 | 18.98                         | 3.27 |
| 0.0029              | 24.97                     | 25.12                     | 31.39                      | 30.68                      | 30.99                      | 29.87                      | 36.93                    | 39.65                    | 41.56                    | 35.28                    | 36.47                    | 39.98                    | 0.19                | 18.53                   | 2358.06 | 20.84                         | 3.59 |

ตาราง 9 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มิลลิเมตร โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 25 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 25.65$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | h<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-----------------------------|------|
| 0.002               | 25.40                     | 25.67                     | 38.69                      | 37.33                      | 38.02                      | 35.72                      | 46.93                    | 50.25                    | 53.51                    | 46.37                    | 46.74                    | 50.08                    | 0.09                | 25.35                   | 1606.39 | 17.43                       | 2.97 |
| 0.0023              | 25.46                     | 25.71                     | 37.83                      | 36.66                      | 37.28                      | 36.22                      | 46.18                    | 49.88                    | 52.73                    | 45.19                    | 45.34                    | 48.05                    | 0.12                | 27.80                   | 1813.86 | 20.15                       | 3.44 |
| 0.0025              | 25.42                     | 25.72                     | 33.68                      | 33.69                      | 33.75                      | 34.70                      | 43.36                    | 46.79                    | 49.90                    | 42.56                    | 45.36                    | 46.68                    | 0.13                | 28.15                   | 2002.71 | 22.64                       | 3.87 |
| 0.0027              | 25.60                     | 25.80                     | 36.18                      | 35.21                      | 35.72                      | 34.07                      | 42.13                    | 45.56                    | 48.67                    | 41.40                    | 42.01                    | 45.77                    | 0.16                | 28.28                   | 2175.36 | 24.67                       | 4.22 |
| 0.0029              | 25.79                     | 25.94                     | 35.36                      | 34.44                      | 34.95                      | 33.34                      | 40.68                    | 44.02                    | 47.73                    | 39.78                    | 40.52                    | 44.33                    | 0.19                | 27.86                   | 2336.41 | 26.26                       | 4.50 |

ตาราง 10 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 6 มิลลิเมตร โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 30 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 25.48$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | h<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-----------------------------|------|
| 0.002               | 24.95                     | 25.24                     | 45.71                      | 43.27                      | 44.65                      | 42.62                      | 57.53                    | 61.38                    | 66.24                    | 55.14                    | 56.34                    | 61.08                    | 0.07                | 39.69                   | 1585.95 | 19.34                       | 3.27 |
| 0.0023              | 24.86                     | 25.21                     | 43.58                      | 41.70                      | 42.78                      | 41.49                      | 52.69                    | 56.70                    | 61.86                    | 50.21                    | 51.63                    | 56.77                    | 0.10                | 40.67                   | 1795.13 | 23.60                       | 4.00 |
| 0.0025              | 25.27                     | 25.51                     | 41.52                      | 39.92                      | 40.89                      | 39.68                      | 49.00                    | 52.91                    | 57.84                    | 46.54                    | 48.48                    | 53.55                    | 0.13                | 40.29                   | 1985.56 | 26.79                       | 4.55 |
| 0.0027              | 25.70                     | 25.88                     | 40.03                      | 38.62                      | 39.42                      | 38.60                      | 47.38                    | 51.19                    | 55.96                    | 44.60                    | 46.16                    | 51.52                    | 0.16                | 39.79                   | 2159.34 | 28.31                       | 4.82 |
| 0.0029              | 26.03                     | 26.20                     | 39.22                      | 38.00                      | 38.68                      | 37.21                      | 45.19                    | 48.94                    | 53.41                    | 43.67                    | 44.57                    | 49.73                    | 0.19                | 39.84                   | 2319.75 | 31.02                       | 5.29 |

ตาราง 11 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มิลลิเมตร โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 24.09$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|------|
| 0.002               | 23.43                     | 23.64                     | 32.77                      | 32.50                      | 32.85                      | 31.67                      | 42.03                    | 49.37                    | 50.97                    | 42.44                    | 43.87                    | 49.90                    | 0.10                | 18.36                   | 1627.59 | 13.21                         | 2.04 |
| 0.0023              | 23.68                     | 23.88                     | 32.63                      | 32.57                      | 32.60                      | 30.42                      | 37.17                    | 44.40                    | 46.18                    | 37.88                    | 39.05                    | 46.02                    | 0.15                | 18.52                   | 1839.83 | 17.37                         | 2.68 |
| 0.0025              | 23.97                     | 24.14                     | 31.24                      | 30.95                      | 31.17                      | 29.97                      | 35.55                    | 43.01                    | 45.07                    | 36.19                    | 37.13                    | 44.96                    | 0.16                | 18.40                   | 2029.94 | 18.80                         | 2.91 |
| 0.0027              | 24.32                     | 24.50                     | 30.64                      | 30.65                      | 30.67                      | 29.66                      | 34.17                    | 41.37                    | 43.34                    | 34.58                    | 35.53                    | 43.24                    | 0.20                | 18.54                   | 2203.67 | 21.31                         | 3.30 |
| 0.0029              | 24.57                     | 24.77                     | 30.22                      | 30.25                      | 30.20                      | 29.35                      | 33.17                    | 40.33                    | 42.22                    | 33.73                    | 34.97                    | 42.44                    | 0.19                | 18.38                   | 2365.07 | 22.49                         | 3.48 |

ตาราง 12 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มิลลิเมตร โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 25 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 24.56$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | h<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-----------------------------|------|
| 0.002               | 24.45                     | 24.65                     | 36.99                      | 36.54                      | 37.19                      | 35.79                      | 46.75                    | 55.16                    | 59.69                    | 47.43                    | 48.81                    | 56.89                    | 0.09                | 25.40                   | 1612.52 | 15.30                       | 2.35 |
| 0.0023              | 24.32                     | 24.52                     | 35.67                      | 35.44                      | 35.74                      | 34.59                      | 41.25                    | 49.52                    | 54.20                    | 42.19                    | 43.99                    | 51.88                    | 0.14                | 26.71                   | 1823.77 | 20.60                       | 3.17 |
| 0.0025              | 24.35                     | 24.55                     | 35.22                      | 35.00                      | 35.28                      | 34.44                      | 40.30                    | 48.60                    | 53.56                    | 41.18                    | 43.15                    | 52.60                    | 0.16                | 28.38                   | 2011.21 | 22.42                       | 3.45 |
| 0.0027              | 24.51                     | 24.67                     | 34.48                      | 34.31                      | 34.49                      | 32.94                      | 38.62                    | 47.27                    | 52.23                    | 39.38                    | 41.28                    | 51.55                    | 0.18                | 27.85                   | 2185.54 | 23.41                       | 3.60 |
| 0.0029              | 24.68                     | 24.88                     | 33.67                      | 33.63                      | 33.69                      | 32.42                      | 36.58                    | 44.74                    | 49.07                    | 37.00                    | 38.76                    | 49.15                    | 0.19                | 27.77                   | 2347.02 | 27.18                       | 4.19 |

ตาราง 13 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มิลลิเมตร โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 30 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 24.89$$

| $\dot{m}$ | $T_{\text{ain1}}$ | $T_{\text{ain2}}$ | $T_{\text{aout1}}$ | $T_{\text{aout2}}$ | $T_{\text{aout3}}$ | $T_{\text{aout4}}$ | $T_{\text{up1}}$ | $T_{\text{up2}}$ | $T_{\text{up3}}$ | $T_{\text{lp1}}$ | $T_{\text{lp2}}$ | $T_{\text{lp3}}$ | $\Delta P$ | $Q_{\text{ave}}$ | $Re$    | $h$                        | $Nu$ |
|-----------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------|------------------|---------|----------------------------|------|
| (kg/s)    | (°C)              | (°C)              | (°C)               | (°C)               | (°C)               | (°C)               | (°C)             | (°C)             | (°C)             | (°C)             | (°C)             | (°C)             | (kPa)      | (W)              |         | (W/m <sup>2</sup> .<br>°C) |      |
| 0.002     | 24.08             | 24.29             | 43.21              | 42.51              | 43.33              | 40.86              | 51.68            | 62.60            | 70.18            | 52.05            | 54.78            | 65.17            | 0.09       | 38.57            | 1592.80 | 20.04                      | 3.05 |
| 0.0023    | 24.60             | 24.81             | 41.43              | 40.96              | 41.56              | 39.64              | 48.31            | 58.63            | 65.44            | 48.49            | 50.93            | 61.53            | 0.14       | 39.07            | 1802.57 | 23.11                      | 3.53 |
| 0.0025    | 24.79             | 24.96             | 40.05              | 39.61              | 40.17              | 38.53              | 46.02            | 56.44            | 64.22            | 46.39            | 48.42            | 59.63            | 0.16       | 39.31            | 1991.50 | 24.71                      | 3.78 |
| 0.0027    | 25.16             | 25.33             | 38.85              | 38.57              | 38.94              | 36.94              | 42.90            | 53.07            | 60.51            | 43.68            | 45.60            | 56.99            | 0.17       | 39.17            | 2165.52 | 27.88                      | 4.27 |
| 0.0029    | 25.36             | 25.52             | 37.77              | 37.53              | 37.81              | 36.98              | 42.02            | 51.95            | 59.71            | 42.86            | 44.56            | 55.95            | 0.19       | 39.33            | 2325.98 | 28.75                      | 4.41 |

ตาราง 14 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มิลลิเมตร โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 25.87$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|------|
| 0.0020              | 25.15                     | 25.43                     | 34.97                      | 34.33                      | 34.89                      | 33.03                      | 41.00                    | 47.64                    | 48.99                    | 40.32                    | 43.09                    | 49.02                    | 0.09                | 18.62                   | 1615.78 | 16.45                         | 2.53 |
| 0.0023              | 25.37                     | 25.61                     | 32.63                      | 32.57                      | 32.60                      | 32.00                      | 38.18                    | 44.95                    | 47.04                    | 37.89                    | 40.56                    | 47.09                    | 0.13                | 17.77                   | 1827.16 | 17.83                         | 2.74 |
| 0.0025              | 25.77                     | 26.00                     | 33.11                      | 32.94                      | 33.25                      | 31.96                      | 36.69                    | 43.10                    | 45.20                    | 37.17                    | 38.81                    | 45.69                    | 0.15                | 18.63                   | 2014.68 | 20.94                         | 3.22 |
| 0.0027              | 26.17                     | 26.43                     | 32.72                      | 32.53                      | 32.86                      | 31.56                      | 35.69                    | 42.54                    | 44.72                    | 35.42                    | 37.62                    | 45.15                    | 0.17                | 18.84                   | 2186.96 | 22.55                         | 3.47 |
| 0.0029              | 26.26                     | 26.50                     | 32.33                      | 32.24                      | 32.52                      | 31.34                      | 34.55                    | 40.96                    | 43.13                    | 34.32                    | 36.49                    | 43.88                    | 0.18                | 18.83                   | 2346.72 | 25.26                         | 3.89 |

ตาราง 15 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มิลลิเมตร โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 25 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 25.44$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> ·°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|------|
| 0.0020              | 25.03                     | 25.35                     | 38.34                      | 37.56                      | 38.36                      | 35.86                      | 46.24                    | 54.11                    | 58.17                    | 45.62                    | 49.19                    | 57.73                    | 0.09                | 25.87                   | 1606.78 | 16.81                         | 2.57 |
| 0.0023              | 25.05                     | 25.32                     | 36.50                      | 35.97                      | 36.67                      | 35.50                      | 42.35                    | 50.45                    | 54.69                    | 42.12                    | 45.62                    | 54.36                    | 0.12                | 26.59                   | 1817.65 | 20.19                         | 3.10 |
| 0.0025              | 25.42                     | 25.65                     | 35.83                      | 35.48                      | 36.08                      | 35.13                      | 40.80                    | 48.66                    | 53.42                    | 40.39                    | 43.37                    | 52.42                    | 0.13                | 27.68                   | 2005.07 | 23.03                         | 3.54 |
| 0.0027              | 25.55                     | 25.77                     | 35.38                      | 35.07                      | 35.65                      | 33.90                      | 39.01                    | 46.72                    | 50.96                    | 38.84                    | 41.52                    | 50.65                    | 0.15                | 27.91                   | 2177.56 | 25.85                         | 3.97 |
| 0.0029              | 25.50                     | 25.76                     | 34.61                      | 34.33                      | 34.92                      | 34.04                      | 37.84                    | 45.76                    | 50.42                    | 37.47                    | 40.23                    | 50.02                    | 0.18                | 28.26                   | 2337.62 | 27.56                         | 4.24 |

ตาราง 16 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนโค้ง ขนาด 12 มิลลิเมตร โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 30 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 25.30$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | h<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-----------------------------|------|
| 0.0020              | 25.05                     | 25.31                     | 44.50                      | 43.55                      | 44.67                      | 42.51                      | 52.60                    | 62.51                    | 70.18                    | 52.74                    | 57.48                    | 68.80                    | 0.08                | 39.48                   | 1587.32 | 20.23                       | 3.07 |
| 0.0023              | 25.03                     | 25.28                     | 43.13                      | 42.33                      | 43.29                      | 41.93                      | 50.03                    | 59.76                    | 67.13                    | 50.08                    | 54.60                    | 66.20                    | 0.10                | 40.60                   | 1794.77 | 22.75                       | 3.46 |
| 0.0025              | 25.08                     | 25.31                     | 42.03                      | 41.36                      | 42.19                      | 41.04                      | 47.12                    | 56.66                    | 64.40                    | 46.93                    | 51.21                    | 62.86                    | 0.13                | 41.66                   | 1981.74 | 26.32                       | 4.01 |
| 0.0027              | 25.18                     | 25.41                     | 38.81                      | 38.20                      | 39.02                      | 38.09                      | 43.76                    | 52.85                    | 59.38                    | 44.18                    | 47.42                    | 58.63                    | 0.14                | 38.88                   | 2162.85 | 27.21                       | 4.16 |
| 0.0029              | 25.60                     | 25.78                     | 37.91                      | 37.44                      | 38.10                      | 37.49                      | 43.33                    | 51.90                    | 57.96                    | 43.03                    | 46.39                    | 57.40                    | 0.18                | 39.03                   | 2323.09 | 28.18                       | 4.32 |

ตาราง 17 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 26.05$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | h<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-----------------------------|------|
| 0.0020              | 25.39                     | 25.40                     | 34.76                      | 33.52                      | 34.31                      | 33.42                      | 38.34                    | 42.38                    | 46.09                    | 36.97                    | 37.24                    | 44.62                    | 0.08                | 17.92                   | 1515.16 | 15.95                       | 6.12 |
| 0.0023              | 24.91                     | 25.01                     | 32.63                      | 32.57                      | 32.60                      | 32.21                      | 37.30                    | 40.99                    | 44.44                    | 35.89                    | 35.91                    | 42.52                    | 0.09                | 17.47                   | 1713.79 | 16.60                       | 6.38 |
| 0.0025              | 26.37                     | 26.32                     | 31.63                      | 31.63                      | 31.64                      | 32.73                      | 36.08                    | 40.30                    | 43.64                    | 34.58                    | 35.23                    | 42.99                    | 0.12                | 18.84                   | 1886.77 | 20.02                       | 7.69 |
| 0.0027              | 26.75                     | 26.71                     | 33.36                      | 32.57                      | 32.96                      | 32.50                      | 35.23                    | 39.23                    | 42.93                    | 33.67                    | 34.21                    | 42.35                    | 0.15                | 19.07                   | 2047.76 | 22.07                       | 8.48 |
| 0.0029              | 26.84                     | 26.82                     | 33.11                      | 32.39                      | 32.73                      | 31.38                      | 34.27                    | 38.35                    | 41.68                    | 33.07                    | 33.26                    | 41.47                    | 0.17                | 19.10                   | 2197.94 | 24.12                       | 9.28 |

ตาราง 18 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 25 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 24.99$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|------|
| 0.0020              | 25.02                     | 25.14                     | 40.05                      | 38.07                      | 38.97                      | 36.42                      | 43.66                    | 48.19                    | 54.27                    | 40.94                    | 42.16                    | 52.03                    | 0.07                | 28.52                   | 1505.17 | 18.68                         | 7.14 |
| 0.0023              | 25.21                     | 25.26                     | 38.29                      | 36.89                      | 37.79                      | 36.52                      | 41.52                    | 46.06                    | 51.90                    | 39.05                    | 40.35                    | 50.37                    | 0.09                | 29.00                   | 1701.46 | 21.16                         | 8.10 |
| 0.0025              | 25.00                     | 25.11                     | 36.41                      | 35.18                      | 35.96                      | 34.85                      | 39.50                    | 43.79                    | 50.03                    | 37.30                    | 38.49                    | 48.64                    | 0.11                | 28.47                   | 1881.57 | 22.21                         | 8.52 |
| 0.0027              | 24.77                     | 24.88                     | 35.09                      | 33.77                      | 34.65                      | 33.47                      | 38.19                    | 42.76                    | 48.57                    | 35.68                    | 37.32                    | 47.42                    | 0.14                | 27.51                   | 2046.38 | 22.33                         | 8.58 |
| 0.0029              | 24.73                     | 24.78                     | 34.39                      | 33.16                      | 33.98                      | 32.84                      | 37.16                    | 41.73                    | 47.85                    | 34.53                    | 36.10                    | 46.37                    | 0.17                | 27.73                   | 2197.36 | 23.87                         | 9.18 |

ตาราง 19 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 30 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 23.63$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu    |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|-------|
| 0.0020              | 23.37                     | 23.65                     | 44.47                      | 41.34                      | 43.67                      | 40.52                      | 52.93                    | 53.40                    | 65.92                    | 47.54                    | 50.24                    | 62.40                    | 0.08                | 40.19                   | 1496.90 | 17.84                         | 6.79  |
| 0.0023              | 23.68                     | 23.83                     | 41.37                      | 39.44                      | 40.80                      | 38.82                      | 47.82                    | 52.89                    | 60.44                    | 43.13                    | 45.87                    | 58.75                    | 0.10                | 39.94                   | 1696.79 | 20.12                         | 7.68  |
| 0.0025              | 23.49                     | 23.63                     | 39.40                      | 37.46                      | 38.85                      | 36.97                      | 45.23                    | 47.71                    | 55.88                    | 40.13                    | 42.70                    | 56.89                    | 0.12                | 39.14                   | 1877.00 | 22.52                         | 8.63  |
| 0.0027              | 23.48                     | 23.58                     | 38.32                      | 36.73                      | 37.84                      | 35.17                      | 42.92                    | 45.86                    | 52.79                    | 38.43                    | 41.05                    | 54.09                    | 0.14                | 39.73                   | 2040.60 | 25.36                         | 9.73  |
| 0.0029              | 23.76                     | 23.87                     | 37.11                      | 35.66                      | 36.59                      | 35.11                      | 40.88                    | 44.15                    | 51.01                    | 36.46                    | 39.34                    | 52.52                    | 0.18                | 39.45                   | 2192.23 | 27.67                         | 10.63 |

ตาราง 20 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 24.14$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|------|
| 0.0020              | 24.26                     | 24.62                     | 34.07                      | 33.49                      | 34.11                      | 32.50                      | 37.20                    | 43.70                    | 51.94                    | 32.75                    | 38.74                    | 43.82                    | 0.08                | 19.42                   | 1522.36 | 15.13                         | 5.82 |
| 0.0023              | 24.47                     | 24.69                     | 32.63                      | 32.57                      | 32.60                      | 31.73                      | 35.90                    | 42.40                    | 50.64                    | 31.45                    | 37.44                    | 42.52                    | 0.09                | 19.87                   | 1719.81 | 16.76                         | 6.46 |
| 0.0025              | 24.34                     | 24.52                     | 31.27                      | 31.23                      | 31.20                      | 30.79                      | 34.59                    | 41.01                    | 48.82                    | 30.49                    | 36.08                    | 41.20                    | 0.12                | 19.80                   | 1897.83 | 18.32                         | 7.06 |
| 0.0028              | 23.39                     | 23.61                     | 29.96                      | 29.73                      | 30.04                      | 28.96                      | 31.30                    | 37.63                    | 44.71                    | 28.45                    | 32.89                    | 37.01                    | 0.14                | 17.66                   | 2068.77 | 20.17                         | 7.81 |
| 0.0030              | 23.63                     | 23.90                     | 29.58                      | 29.52                      | 29.79                      | 28.85                      | 30.28                    | 36.82                    | 43.43                    | 27.97                    | 31.92                    | 36.08                    | 0.17                | 17.66                   | 2219.59 | 22.38                         | 8.66 |

ตาราง 21 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 25 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 23.77$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> .<br>°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-----------------------------------|------|
| 0.0020              | 23.01                     | 23.35                     | 37.59                      | 36.62                      | 37.69                      | 35.28                      | 41.11                    | 50.33                    | 60.48                    | 34.27                    | 43.23                    | 51.54                    | 0.07                | 28.18                   | 1513.61 | 16.69                             | 6.40 |
| 0.0023              | 23.21                     | 23.52                     | 35.88                      | 35.28                      | 36.11                      | 34.13                      | 37.79                    | 46.96                    | 58.12                    | 32.10                    | 39.86                    | 48.48                    | 0.09                | 29.11                   | 1712.53 | 19.97                             | 7.67 |
| 0.0025              | 23.62                     | 23.90                     | 34.84                      | 34.38                      | 35.08                      | 33.35                      | 36.33                    | 45.26                    | 58.20                    | 31.08                    | 37.92                    | 46.26                    | 0.12                | 28.79                   | 1890.65 | 21.04                             | 8.09 |
| 0.0027              | 24.08                     | 24.37                     | 33.98                      | 33.60                      | 34.24                      | 32.66                      | 35.95                    | 44.30                    | 55.66                    | 31.40                    | 37.41                    | 45.16                    | 0.13                | 28.86                   | 2053.95 | 21.74                             | 8.37 |
| 0.0029              | 24.18                     | 24.45                     | 33.71                      | 33.45                      | 33.99                      | 32.48                      | 34.39                    | 42.72                    | 56.28                    | 30.36                    | 35.90                    | 43.16                    | 0.16                | 29.40                   | 2203.57 | 24.34                             | 9.38 |

ตาราง 22 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนสี่เหลี่ยมคางหมู โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 30 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 23.86$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> ·°C) | Nu    |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|-------|
| 0.0020              | 23.24                     | 23.57                     | 43.37                      | 41.81                      | 43.28                      | 40.13                      | 47.81                    | 61.90                    | 72.19                    | 37.32                    | 49.73                    | 63.17                    | 0.07                | 39.30                   | 1497.30 | 17.31                         | 6.59  |
| 0.0023              | 23.69                     | 24.01                     | 41.11                      | 40.04                      | 41.38                      | 38.63                      | 43.93                    | 57.86                    | 69.37                    | 34.78                    | 45.77                    | 59.24                    | 0.09                | 39.58                   | 1695.43 | 19.77                         | 7.55  |
| 0.0025              | 24.14                     | 24.38                     | 39.70                      | 38.88                      | 40.09                      | 37.66                      | 41.02                    | 54.22                    | 68.78                    | 32.85                    | 42.36                    | 56.95                    | 0.12                | 40.60                   | 1872.76 | 22.46                         | 8.59  |
| 0.0027              | 23.75                     | 24.03                     | 37.45                      | 36.83                      | 37.83                      | 35.85                      | 37.68                    | 47.89                    | 61.71                    | 34.66                    | 41.54                    | 52.93                    | 0.14                | 38.79                   | 2039.79 | 24.49                         | 9.39  |
| 0.0029              | 23.73                     | 24.02                     | 36.60                      | 36.09                      | 36.90                      | 35.32                      | 35.38                    | 45.38                    | 60.94                    | 33.42                    | 39.49                    | 50.95                    | 0.16                | 39.28                   | 2190.76 | 27.44                         | 10.53 |

ตาราง 23 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 26.04$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|------|
| 0.0020              | 25.16                     | 25.27                     | 35.04                      | 33.97                      | 34.53                      | 33.65                      | 37.74                    | 42.78                    | 45.91                    | 36.55                    | 38.85                    | 43.98                    | 0.11                | 18.24                   | 1483.39 | 14.43                         | 7.46 |
| 0.0023              | 25.88                     | 26.05                     | 32.63                      | 32.57                      | 32.60                      | 33.01                      | 36.56                    | 41.87                    | 45.23                    | 35.72                    | 38.12                    | 43.66                    | 0.14                | 18.70                   | 1675.31 | 15.49                         | 8.02 |
| 0.0025              | 26.29                     | 26.37                     | 34.11                      | 33.26                      | 33.71                      | 32.12                      | 35.89                    | 41.42                    | 44.65                    | 35.29                    | 37.71                    | 43.49                    | 0.16                | 19.23                   | 1847.79 | 16.21                         | 8.40 |
| 0.0027              | 26.41                     | 26.57                     | 33.38                      | 32.69                      | 33.06                      | 31.62                      | 34.82                    | 40.62                    | 43.59                    | 34.71                    | 36.90                    | 42.97                    | 0.19                | 18.77                   | 2006.67 | 16.60                         | 8.60 |
| 0.0029              | 26.17                     | 26.21                     | 33.19                      | 32.50                      | 32.84                      | 31.43                      | 34.49                    | 40.02                    | 43.16                    | 34.25                    | 36.49                    | 42.37                    | 0.22                | 19.55                   | 2152.76 | 18.00                         | 9.33 |

ตาราง 24 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 25 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 25.95$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | Qave<br>(W) | Re      | h<br>(W/m <sup>2</sup> ·°C) | Nu    |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------|---------|-----------------------------|-------|
| 0.0020              | 25.34                     | 25.48                     | 40.33                      | 38.64                      | 39.69                      | 37.94                      | 40.72                    | 48.39                    | 53.18                    | 39.49                    | 43.27                    | 50.07                    | 0.12                | 28.68       | 1469.36 | 19.18                       | 9.86  |
| 0.0023              | 25.69                     | 25.75                     | 38.62                      | 37.18                      | 38.05                      | 36.65                      | 39.24                    | 46.98                    | 51.71                    | 38.45                    | 41.85                    | 48.88                    | 0.14                | 28.67       | 1662.71 | 19.74                       | 10.17 |
| 0.0025              | 25.98                     | 26.07                     | 37.37                      | 36.21                      | 36.94                      | 35.75                      | 36.75                    | 45.21                    | 50.12                    | 36.85                    | 40.21                    | 47.58                    | 0.17                | 28.58       | 1836.07 | 21.75                       | 11.22 |
| 0.0027              | 26.29                     | 26.32                     | 36.29                      | 35.20                      | 35.90                      | 36.20                      | 35.42                    | 43.37                    | 48.35                    | 35.27                    | 38.59                    | 46.05                    | 0.19                | 28.93       | 1994.17 | 24.99                       | 12.90 |
| 0.0029              | 26.28                     | 26.34                     | 35.71                      | 34.75                      | 35.39                      | 34.47                      | 34.49                    | 42.11                    | 46.84                    | 34.38                    | 37.51                    | 44.79                    | 0.22                | 28.60       | 2141.99 | 26.60                       | 13.75 |

ตาราง 25 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยวางตำแหน่งลอนตรงกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 30 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 25.60$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | Qave<br>(W) | Re      | h<br>(W/m <sup>2</sup> ·°C) | Nu    |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------|---------|-----------------------------|-------|
| 0.0020              | 24.92                     | 25.06                     | 45.53                      | 43.50                      | 44.81                      | 43.41                      | 43.11                    | 52.87                    | 60.48                    | 41.75                    | 47.21                    | 56.74                    | 0.11                | 40.28       | 1455.43 | 24.61                       | 12.57 |
| 0.0023              | 25.39                     | 25.44                     | 43.46                      | 41.73                      | 42.88                      | 41.03                      | 40.53                    | 50.49                    | 58.37                    | 39.90                    | 45.15                    | 55.13                    | 0.14                | 40.25       | 1648.59 | 26.06                       | 13.35 |
| 0.0025              | 25.59                     | 25.66                     | 41.27                      | 39.89                      | 40.86                      | 39.20                      | 38.33                    | 48.12                    | 56.12                    | 38.26                    | 43.53                    | 53.48                    | 0.16                | 39.89       | 1823.76 | 27.25                       | 13.99 |
| 0.0027              | 25.79                     | 25.88                     | 40.09                      | 38.79                      | 39.75                      | 38.47                      | 37.15                    | 46.79                    | 54.66                    | 37.56                    | 42.64                    | 52.56                    | 0.19                | 39.77       | 1982.19 | 28.15                       | 14.48 |
| 0.0029              | 26.12                     | 26.16                     | 39.24                      | 38.10                      | 38.94                      | 37.63                      | 36.31                    | 45.70                    | 54.20                    | 36.57                    | 41.15                    | 51.57                    | 0.23                | 40.27       | 2129.04 | 29.74                       | 15.31 |

ตาราง 26 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 20 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 24.24$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|------|
| 0.0020              | 23.92                     | 24.20                     | 33.89                      | 33.37                      | 33.83                      | 32.89                      | 40.09                    | 42.79                    | 46.16                    | 38.34                    | 37.68                    | 41.42                    | 0.09                | 19.28                   | 1491.14 | 13.47                         | 6.99 |
| 0.0023              | 23.89                     | 24.14                     | 32.63                      | 32.57                      | 32.60                      | 31.81                      | 38.76                    | 41.37                    | 45.22                    | 37.66                    | 36.71                    | 40.93                    | 0.11                | 19.16                   | 1686.15 | 13.70                         | 7.12 |
| 0.0025              | 24.08                     | 24.23                     | 32.21                      | 31.85                      | 32.21                      | 31.48                      | 37.74                    | 41.10                    | 44.09                    | 36.50                    | 35.97                    | 40.22                    | 0.15                | 19.61                   | 1859.53 | 14.83                         | 7.71 |
| 0.0027              | 24.35                     | 24.37                     | 31.27                      | 30.99                      | 31.22                      | 30.59                      | 36.52                    | 39.40                    | 42.66                    | 35.44                    | 34.95                    | 39.16                    | 0.18                | 19.18                   | 2020.68 | 15.53                         | 8.09 |
| 0.0029              | 24.64                     | 24.57                     | 30.73                      | 30.53                      | 30.63                      | 30.11                      | 35.50                    | 37.90                    | 41.43                    | 34.57                    | 34.14                    | 38.29                    | 0.20                | 19.09                   | 2169.21 | 16.74                         | 8.72 |

ตาราง 27 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 25 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 24.28$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> .°C) | Nu    |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|-------|
| 0.0020              | 24.19                     | 24.46                     | 35.92                      | 35.93                      | 35.98                      | 36.56                      | 44.65                    | 48.79                    | 54.49                    | 42.97                    | 44.38                    | 47.54                    | 0.10                | 27.80                   | 1479.66 | 14.61                         | 7.54  |
| 0.0023              | 23.88                     | 24.09                     | 35.84                      | 35.24                      | 35.81                      | 34.67                      | 41.35                    | 45.74                    | 51.51                    | 39.05                    | 40.90                    | 45.29                    | 0.12                | 27.56                   | 1675.72 | 16.71                         | 8.65  |
| 0.0025              | 24.15                     | 24.31                     | 34.92                      | 34.44                      | 34.96                      | 33.96                      | 39.93                    | 43.58                    | 50.04                    | 37.65                    | 39.58                    | 44.20                    | 0.16                | 27.83                   | 1849.58 | 18.25                         | 9.46  |
| 0.0027              | 24.25                     | 24.40                     | 34.17                      | 33.66                      | 34.17                      | 33.18                      | 38.49                    | 42.50                    | 48.50                    | 36.16                    | 38.20                    | 43.01                    | 0.18                | 28.12                   | 2009.28 | 19.92                         | 10.33 |
| 0.0029              | 24.46                     | 24.64                     | 33.79                      | 33.29                      | 33.74                      | 32.84                      | 37.00                    | 40.35                    | 46.73                    | 34.42                    | 36.53                    | 41.33                    | 0.19                | 28.64                   | 2156.35 | 23.59                         | 12.24 |

ตาราง 28 แสดงผลการทดลองของแผ่นทดสอบชนิดแผ่นเป็นลอนสามเหลี่ยม โดยวางตำแหน่งลอนเยื้องกันแรงดันไฟฟ้าของ heater 30 volt

$$T_{\text{aint,ave}} = 23.58$$

| $\dot{m}$<br>(kg/s) | $T_{\text{ain1}}$<br>(°C) | $T_{\text{ain2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout1}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout2}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout3}}$<br>(°C) | $T_{\text{aout4}}$<br>(°C) | $T_{\text{up1}}$<br>(°C) | $T_{\text{up2}}$<br>(°C) | $T_{\text{up3}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp1}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp2}}$<br>(°C) | $T_{\text{lp3}}$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(kPa) | $Q_{\text{ave}}$<br>(W) | Re      | $h$<br>(W/m <sup>2</sup> ·°C) | Nu    |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|-------|
| 0.0020              | 23.13                     | 23.42                     | 43.34                      | 42.44                      | 43.11                      | 41.54                      | 48.82                    | 53.17                    | 61.57                    | 46.30                    | 48.36                    | 54.66                    | 0.10                | 40.66                   | 1466.21 | 19.01                         | 9.76  |
| 0.0023              | 23.22                     | 23.45                     | 41.17                      | 40.38                      | 41.11                      | 39.66                      | 46.76                    | 50.75                    | 59.32                    | 44.17                    | 46.70                    | 52.95                    | 0.12                | 40.54                   | 1660.80 | 19.80                         | 10.19 |
| 0.0025              | 23.34                     | 23.53                     | 39.75                      | 39.11                      | 39.76                      | 38.45                      | 44.62                    | 49.02                    | 57.14                    | 42.06                    | 44.55                    | 51.06                    | 0.14                | 40.89                   | 1834.89 | 21.62                         | 11.15 |
| 0.0027              | 23.68                     | 23.83                     | 38.87                      | 38.27                      | 38.85                      | 37.69                      | 42.69                    | 46.46                    | 54.82                    | 39.98                    | 42.56                    | 49.08                    | 0.18                | 41.42                   | 1993.58 | 24.68                         | 12.74 |
| 0.0029              | 24.02                     | 24.16                     | 37.97                      | 37.40                      | 37.85                      | 36.86                      | 41.24                    | 45.40                    | 53.16                    | 38.51                    | 41.16                    | 47.76                    | 0.22                | 41.89                   | 2141.72 | 26.66                         | 13.77 |



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ตารางแสดงผลการทดลอง

ภาคผนวก ข  
ตัวอย่างการคำนวณ

### ตัวอย่างการคำนวณ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของแผ่นทดสอบชนิดลอนสามเหลี่ยม โดยวางตำแหน่งลอน  
ตรงกันแรงดันไฟฟ้า 25 โวลต์

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

|                                                              |              |
|--------------------------------------------------------------|--------------|
| ความแตกต่างของความดันที่แผ่นออริฟิซ ( $\Delta P_{orifice}$ ) | =0.22 kPa    |
| อุณหภูมิอากาศทางเข้าเฉลี่ย ( $T_{ai,ave}$ )                  | =25.95 °C    |
| อุณหภูมิอากาศทางออก ณ ตำแหน่งที่ 1 ( $T_{ao,1}$ )            | =40.33 °C    |
| อุณหภูมิอากาศทางออก ณ ตำแหน่งที่ 2 ( $T_{ao,2}$ )            | =38.64 °C    |
| อุณหภูมิอากาศทางออก ณ ตำแหน่งที่ 3 ( $T_{ao,3}$ )            | =39.69 °C    |
| อุณหภูมิอากาศทางออก ณ ตำแหน่งที่ 4 ( $T_{ao,4}$ )            | =37.94 °C    |
| อุณหภูมิแผ่นทดสอบบน ณ ตำแหน่งที่ 1 ( $T_{up,1}$ )            | =40.72 °C    |
| อุณหภูมิแผ่นทดสอบบน ณ ตำแหน่งที่ 2 ( $T_{up,2}$ )            | =48.39 °C    |
| อุณหภูมิแผ่นทดสอบบน ณ ตำแหน่งที่ 3 ( $T_{up,3}$ )            | =53.18 °C    |
| อุณหภูมิแผ่นทดสอบล่าง ณ ตำแหน่งที่ 1 ( $T_{lp,1}$ )          | =39.49 °C    |
| อุณหภูมิแผ่นทดสอบล่าง ณ ตำแหน่งที่ 2 ( $T_{lp,2}$ )          | =43.27 °C    |
| อุณหภูมิแผ่นทดสอบล่าง ณ ตำแหน่งที่ 3 ( $T_{lp,3}$ )          | =50.07 °C    |
| ความต่างศักย์ของแผ่นทำความร้อนแผ่นบน ( $V_{up}$ )            | =25 volt     |
| ความต่างศักย์ของแผ่นทำความร้อนแผ่นล่าง ( $V_{lp}$ )          | =25 volt     |
| กระแสไฟฟ้าที่แผ่นทำความร้อนแผ่นบน ( $I_{up}$ )               | =0.62 ampere |
| กระแสไฟฟ้าที่แผ่นทำความร้อนแผ่นล่าง ( $I_{lp}$ )             | =0.60 ampere |

ข้อมูลทางกายภาพของแผ่นสอบรอยหยัก

|                                             |                |
|---------------------------------------------|----------------|
| พื้นที่ผิวของแผ่นเพลต ( $A_{pl}$ )          | =0.06165 $m^2$ |
| พื้นที่หน้าตัดของช่องออริฟิซ                | =0.00283 $m^2$ |
| ความยาวพื้นผิวของรอยหยัก ( $\bar{\sigma}$ ) | =0.4748 $m^2$  |
| ความยาวของแผ่นทดสอบ ( $\bar{X}$ )           | =0.288 m       |
| ความสูงของช่องการไหล (H)                    | =17 cm         |

หาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศ  
จากสมการ

$$T_{a,ave} = \frac{T_{ao,ave} + T_{ai,ave}}{2}$$

โดยที่

$$T_{ao,ave} = \frac{T_{ao,1} + T_{ao,2} + T_{ao,3} + T_{ao,4}}{4}$$

$$= \frac{40.33 + 38.64 + 39.69 + 37.94}{4}$$

$$= 39.15 \text{ } C^{\circ}$$

และ

$$T_{ai,ave} = 25.95$$

ดังนั้น

$$T_{a,ave} = \frac{39.15 + 25.95}{2}$$

$$= 32.55 \text{ } C^{\circ}$$

หาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นทดสอบ

จากสมการ

$$T_{pl,ave} = \frac{T_{up,ave} + T_{lp,ave}}{2}$$

โดยที่

$$T_{up,ave} = \frac{T_{up1} + T_{up2} + T_{up3}}{3}$$

$$= \frac{40.72 + 48.39 + 53.18}{3}$$

$$= 47.43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

และ

$$T_{lp,ave} = \frac{T_{lp,1} + T_{lp,2} + T_{lp,3}}{3}$$

$$= \frac{39.49 + 43.27 + 50.07}{3}$$

$$= 44.28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ดังนั้น

$$T_{pl,ave} = \frac{47.43 + 44.28}{2}$$

$$= 45.85 \text{ } ^\circ\text{C}$$

หาค่าอัตราการไหลของอากาศ

$$\dot{Q}_f = AV_f$$

จากสมการเบอร์นูลลี

$$\frac{V_f^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 = \frac{p_1}{\gamma} + z_1$$

ดังนั้น

$$V_f = \sqrt{2g \left[ \left( \frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left( \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) \right]}$$

เมื่อ  $z_1 = z_2 = 0$  จะได้ว่า

$$V_f = \left( \frac{2\Delta p_{orifice}}{\rho} \right)^{0.5}$$

$$\begin{aligned} \rho &= \left( -4 \times 10^{-8} \times T_{a,ave}^3 \right) + \left( 2 \times 10^{-5} \times T_{a,ave}^2 \right) - \left( 4.8 \times 10^{-3} \times T_{a,ave} \right) + 1.2967 \\ &= \left( -4 \times 10^{-8} \times 32.55^3 \right) + \left( 2 \times 10^{-5} \times 32.55^2 \right) - \left( 4.8 \times 10^{-3} \times 32.55 \right) + 1.2967 \\ &= 1.16 \text{ kg} / \text{m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และ} \quad V_f &= \left( \frac{2 \times 0.22}{1.16} \right)^{0.5} \\ &= 0.616 \text{ m} / \text{s} \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศ

$$\begin{aligned} \dot{Q}_f &= AV_f \\ &= 0.00283 \times 0.616 \\ &= 0.00174 \text{ m}^3 / \text{s} \end{aligned}$$

หาค่าอัตราการถ่ายความร้อนของอากาศ

จากสมการ

$$Q_{air} = \dot{m} C_p (T_{aout,ave} - T_{ain,ave})$$

โดย

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \dot{Q}_f \rho \\ &= 0.00174 \times 1.16 \\ &= 0.00202 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} C_p &= (2 \times 10^{-10} \times T_{a,ave}^4) - (7 \times 10^{-8} \times T_{a,ave}^3) + (8 \times 10^{-6} \times T_{a,ave}^2) - (3 \times 10^{-4} \times T_{a,ave}) + 1.0102 \\ &= (2 \times 10^{-10} \times 32.55^4) - (7 \times 10^{-8} \times 32.55^3) + (8 \times 10^{-6} \times 32.55^2) \\ &\quad - (3 \times 10^{-4} \times 32.28) + 1.0102 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_p = 1.01 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} Q_{air} &= 0.00202 \times 1.01 (39.15 - 25.95) \times 1000 \\ &= 26.87 \text{ watt} \end{aligned}$$

หาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของแผ่นทำความร้อน

จากสมการ

$$Q_{heater} = Q_{heater,up} + Q_{heater,lp}$$

โดย

$$\begin{aligned} Q_{heater,up} &= V_{up} \times I_{up} \\ &= 25 \times 0.62 \\ &= 15.5 \text{ watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{heater,lp} &= V_{lp} \times I_{lp} \\ &= 25 \times 0.6 \\ &= 15 \text{ watt} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} Q_{heater} &= 15.5 + 15 \\ &= 30.5 \text{ Watt} \end{aligned}$$

หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

จากสมการ

$$h = \frac{Q_{ave}}{A_{pl} \Delta T_{LMTD}}$$

โดย

$$\begin{aligned} Q_{ave} &= \frac{Q_{heater} + Q_{air}}{2} \\ &= \frac{30.5 + 26.87}{2} \\ &= 28.685 \text{ Watt} \end{aligned}$$

และ

$$\Delta T_{LMTD} = \left[ \frac{(T_{pl,ave} - T_{ai,ave}) - (T_{pl,ave} - T_{ao,ave})}{\ln \left( \frac{T_{pl,ave} - T_{ai,ave}}{T_{pl,ave} - T_{ao,ave}} \right)} \right]$$

$$= \left[ \frac{(45.85 - 25.95) - (45.85 - 39.15)}{\ln \left( \frac{45.85 - 25.95}{45.85 - 39.15} \right)} \right]$$

$$= 12.13 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ดังนั้น

$$h \frac{28.685}{(2 \times 0.06165 \times 12.13)}$$

$$= 19.18 \text{ W / m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

หาค่าตัวเลขเซลล์นัมเบอร์

จากสมการ

$$Nu = \frac{hL\bar{\sigma}}{kX}$$

โดย

$$L = 0.5H$$

$$= 0.5 \times 0.017$$

$$= 0.0085 \text{ m}$$

และ

$$\begin{aligned} k &= (-2 \times 10^{-8} \times T_{a,ave}^2) + (7 \times 10^{-5} \times T_{a,ave}) + 0.025 \\ &= (-2 \times 10^{-8} \times 32.55^2) + (7 \times 10^{-5} \times 32.55) + 0.025 \\ &= 0.027 \text{ W / m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{19.2 \times 0.0085 \times 0.4748}{0.027 \times 0.288} \\ &= 9.86 \end{aligned}$$

หาค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

จากสมการ

$$\text{Re} = \frac{2 \dot{m}}{\nu \rho (H + W)}$$

โดย

$$\begin{aligned} \nu &= \left[ (9 \times 10^{-8} \times T_{a,ave}^3) + (9 \times 10^{-5} \times T_{a,ave}^2) + (0.0832 \times T_{a,ave}) + 13.33 \right] \times 10^{-6} \\ &= \left[ (9 \times 10^{-8} \times 32.55^3) + (9 \times 10^{-5} \times 32.55^2) + (0.0832 \times 32.55) + 13.33 \right] \times 10^{-6} \\ &= 0.0000161 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{2 \times 0.00202}{0.0000161 \times 1.16 \times (0.017 + 0.13)} \\ &= 1469.36 \end{aligned}$$

อภิธานศัพท์

## รายการสัญลักษณ์

| สัญลักษณ์    | ความหมาย                                | หน่วย                   |
|--------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| A            | พื้นที่ผิวทั้งหมดของหน้าตัดท่อ          | $m^2$                   |
| $A_{pl}$     | พื้นที่ผิวของแผ่นรอยหยักที่มุมต่าง ๆ    | $m^2$                   |
| $C_p$        | ความร้อนจำเพาะของอากาศ                  | $kJ/kg \cdot ^\circ C$  |
| D            | เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ                    | m                       |
| $D_h$        | เส้นผ่านศูนย์กลาง hydraulic             | m                       |
| H            | ความสูงของช่องทดสอบ                     | m                       |
| h            | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน           | $kW/m^2 \cdot ^\circ C$ |
| I            | กระแสไฟฟ้า                              | Ampere                  |
| k            | ค่าการนำความร้อน                        | $W/m^2 \cdot ^\circ C$  |
| $L_i$        | ระยะที่เกิดการไหลเต็มท่อ                | m                       |
| $\dot{m}$    | อัตราการไหลเชิงมวล                      | kg/s                    |
| Nu           | ค่านัสเซลล์นัมเบอร์                     | -                       |
| P            | ความดัน                                 | kPa                     |
| Pr           | ค่าพริ้นด์นัมเบอร์                      | -                       |
| $Q_{av}$     | อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย            | W                       |
| $Q_f$        | อัตราการไหลของของไหล                    | $m^3/s$                 |
| $Q_{heater}$ | อัตราการถ่ายเทความร้อนของแผ่นทำความร้อน | W                       |
| Re           | ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์                    | -                       |
| $T_{a,av}$   | อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย                     | $^\circ C$              |
| $T_{ai,av}$  | อุณหภูมิอากาศทางเข้าเฉลี่ย              | $^\circ C$              |
| $T_{ai,1}$   | อุณหภูมิอากาศทางเข้า ณ ตำแหน่งที่ 1     | $^\circ C$              |
| $T_{ai,2}$   | อุณหภูมิอากาศทางเข้า ณ ตำแหน่งที่ 2     | $^\circ C$              |
| $T_{ao,av}$  | อุณหภูมิอากาศทางออกเฉลี่ย               | $^\circ C$              |
| $T_{ao,1}$   | อุณหภูมิอากาศทางออก ณ ตำแหน่งที่ 1      | $^\circ C$              |
| $T_{ao,2}$   | อุณหภูมิอากาศทางออก ณ ตำแหน่งที่ 2      | $^\circ C$              |
| $T_{ao,3}$   | อุณหภูมิอากาศทางออก ณ ตำแหน่งที่ 3      | $^\circ C$              |
| $T_{ao,4}$   | อุณหภูมิอากาศทางออก ณ ตำแหน่งที่ 4      | $^\circ C$              |

| สัญลักษณ์         | ความหมาย                              | หน่วย                  |
|-------------------|---------------------------------------|------------------------|
| $T_{lp,1}$        | อุณหภูมิแผ่นทดสอบด้านล่างตำแหน่งที่ 1 | $^{\circ}\text{C}$     |
| $T_{lp,2}$        | อุณหภูมิแผ่นทดสอบด้านล่างตำแหน่งที่ 2 | $^{\circ}\text{C}$     |
| $T_{lp,3}$        | อุณหภูมิแผ่นทดสอบด้านล่างตำแหน่งที่ 3 | $^{\circ}\text{C}$     |
| $T_{Pl,av}$       | อุณหภูมิแผ่นรอยหยักเฉลี่ย             | $^{\circ}\text{C}$     |
| $T_{up,1}$        | อุณหภูมิแผ่นทดสอบด้านล่างตำแหน่งที่ 1 | $^{\circ}\text{C}$     |
| $T_{up,2}$        | อุณหภูมิแผ่นทดสอบด้านล่างตำแหน่งที่ 2 | $^{\circ}\text{C}$     |
| $T_{up,3}$        | อุณหภูมิแผ่นทดสอบด้านล่างตำแหน่งที่ 3 | $^{\circ}\text{C}$     |
| $\Delta T_{LMTD}$ | ผลต่างอุณหภูมิเชิงล็อก                | $^{\circ}\text{C}$     |
| $V$               | ความต่างศักย์ไฟฟ้า                    | Volt                   |
| $V_a$             | ความเร็วของของไหล                     | m/s                    |
| $W$               | ความกว้างของช่องทดสอบ                 | m                      |
| $v$               | ความหนืดเชิงจลน์                      | $\text{m}^2/\text{s}$  |
| $\rho$            | ความหนาแน่นของอากาศ                   | $\text{kg}/\text{m}^3$ |

ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

|                              |                                                                                                      |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ ชื่อสกุล                | นายเกียรติ กรกำจายฤทธิ์                                                                              |
| วันเดือนปีเกิด               | 9 กันยายน 2521                                                                                       |
| สถานที่เกิด                  | นครราชสีมา                                                                                           |
| สถานที่อยู่ปัจจุบัน          | วิทยาลัยการอาชีพชัยบาดาล ตำบลบัวชุม อำเภอชัยบาดาล<br>จังหวัดลพบุรี 15130                             |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน | ครูผู้ช่วย                                                                                           |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน         | วิทยาลัยการอาชีพชัยบาดาล<br>สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา                                          |
| ประวัติการศึกษา              |                                                                                                      |
| พ.ศ. 2536                    | มัธยมศึกษาตอนต้น<br>จากโรงเรียนพิมายวิทยา                                                            |
| พ.ศ. 2539                    | ประกาศนียบัตรวิชาชีพ<br>จากวิทยาลัยเทคนิคเลย                                                         |
| พ.ศ. 2541                    | ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง<br>จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ<br>นครราชสีมา |
| พ.ศ. 2543                    | อุดมศึกษา คุรุศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)<br>สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ ประเทศไทย    |
| พ.ศ. 2551                    | บัณฑิตศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)<br>จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ              |