



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนโดยลด  
อิทธิพลจากกระแสไหลตัดด้วยวิธีปรับปรุง  
รูปแบบปากทางออกเจ็ท

ผู้วิจัย ชยุต นันทดุสิต

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินรายได้  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2552

## บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยการปรับปรุงปากทางออกเจ็ท ในงานวิจัยได้ใช้ออร์โรฟิสแบบวงกลมยาวแทนออร์โรฟิสแบบวงกลมเพื่อให้สามารถลดผลของกระแสไหลตัดสำหรับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของออร์โรฟิส  $AR=1, 4$  และ  $8$  ผลของการจัดเรียงของเจ็ทที่เป็นแบบเรียงแถวเดียวกันและเรียงแถวสลับกัน และผลของมุมปะทะระหว่างเจ็ทและกระแสไหลตัด  $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  และ  $45^\circ$  สำหรับปากทางออกเจ็ทแบบวงกลมมีขนาด  $D=13.2$  mm และเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า ( $D_e$ ) ของออร์โรฟิสแบบวงกลมยาวกำหนดให้ขนาดของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับกรณีออร์โรฟิสหน้าตัดกลม สำหรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ทกำหนดให้คงที่  $H=2D$  และ  $S=3D$  ตามลำดับ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ทแบบวงกลมเท่ากับ  $Re=13,400$  และค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เทียบเท่า ( $Re_e$ ) ของเจ็ทแบบวงกลมยาวได้กำหนดให้เท่ากับอัตราการไหลของเจ็ทแบบวงกลม ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้แผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัลวัดการกระจายของอุณหภูมิและหาการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้ใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน นอกจากนี้ได้ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทโดยใช้ CFD (Fluent) โดยโมเดลของการไหลแบบปั่นป่วนเป็นแบบ Standard  $k - \epsilon$

จากผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทด้วย CFD พบว่า กระแสไหลตัดบริเวณปลายทางการไหลมีความเร็วสูงกว่าบริเวณต้นทางการไหล ส่งผลทำให้เจ็ทที่อยู่ตำแหน่งบริเวณปลายทางการไหลได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดมากกว่าบริเวณต้นทางการไหล สำหรับลักษณะการไหลของเจ็ทในกรณี  $AR=4$  และ  $8$  ที่เงื่อนไซ  $\theta=0^\circ$  พบว่าสามารถลดอิทธิพลของกระแสไหลตัดได้ดีกว่ากรณี  $AR=1$  โดยบริเวณที่แสดงความเร็วของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวมีค่าสูงกรณีของ  $AR=4$  และ  $8$  ที่เงื่อนไซ  $\theta=0^\circ$  มีขนาดกว้างกว่ากรณีของ  $AR=1$  ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์และลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว คือ บริเวณที่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงและบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันแสดงขอบเขตบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนกรณี  $AR=4$  และ  $8$  ที่เงื่อนไซ  $\theta=0^\circ$  มีขนาดกว้างกว่ากรณีของ  $AR=1$

สำหรับผลของการจัดเรียงของเจ็ทพบว่า การจัดเรียงของเจ็ทแบบเรียงแถวเดียวกันให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีการจัดเรียงแบบเรียงแถวสลับกันที่เงื่อนไซ  $AR$  และมุมปะทะเดียวกัน สำหรับผลของมุมปะทะพบว่า มุมปะทะที่เพิ่มมากขึ้นกลับทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวดลดลง

สำหรับค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยของเจ็ท  $AR=4$  ของการจัดเรียงแบบเรียงแถวเดียวกันที่เงื่อนไซ  $\theta=0^\circ$  มีค่าสูงสุดโดยค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่าเจ็ท  $AR=1$  เป็นค่า  $6.04\%$  และกรณี  $AR=8$  ที่เงื่อนไซการจัดเรียงของเจ็ทและมุมปะทะเดียวกัน มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่าเจ็ท  $AR=1$  เป็นค่า  $5.54\%$  อย่างไรก็ตามสำหรับในกรณีเจ็ท  $AR=8$  ที่มีการจัดเรียงแบบเรียงแถวสลับกันที่มุมปะทะ  $\theta=30^\circ$  และ  $45^\circ$  ให้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยต่ำกว่ากรณีอื่นๆ

## ABSTRACT

The aim of this research is to increase the heat transfer on the impinged surface by modifying the jet outlet geometry. To decrease the effect of crossflow, the orifice geometry was designed from round geometry to elongated round geometry. The experimental investigation includes the effect of aspect ratios  $AR=1, 4$  and  $8$ , the jet arrangement in the case of inline and staggered, and the attacking angle between jet and crossflow  $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  and  $45^\circ$ . The diameter of round orifice was  $D=13.2$  mm, and the equivalent diameter ( $D_e$ ) of elongated round orifice was given in identical cross-section area of round orifice. The jet-to-plate distance and jet-to-jet distance were fixed  $H=2D$  and  $S=3D$ , respectively. The Reynolds number of round jet was fixed at  $Re=13,400$ , and the equivalent Reynolds number ( $Re_e$ ) of elongated round jet was equalized to the flow rate of round orifice. For the heat transfer measurement, the temperature distributions on impinged surface were measured using thermochromic liquid crystal (TLC) sheet, and the Nusselt number distributions were evaluated by image processing technique. Flow patterns on the impinged surface were visualized using Oil film technique. In addition, the flow characteristics were investigated by CFD (Fluent). The standard  $k - \epsilon$  was adopted for turbulent model.

The CFD results show that the crossflow velocity at downstream is higher than the crossflow velocity at upstream, so the effect of crossflow on the downstream jet is stronger than the upstream jet. The decreasing of effect of crossflow in the case of  $AR=4$  and  $8$  with  $\theta = 0^\circ$  is better than the case of  $AR=1$ . The areas of high velocity that impinge to the surface in the case of  $AR=4$  and  $8$  with  $\theta = 0^\circ$  are larger than the case of  $AR=1$ . Corresponding to the Nusselt number distribution and flow characteristic on the impinged surface by oil film technique, the areas of high Nusselt number and areas of oil film that illustrate the boundary of impingement region in the case of  $AR=4$  and  $8$  with  $\theta = 0^\circ$  are larger than of the case of  $AR=1$ .

The effect of jet arrangement shows that the heat transfer rate of inline arrangement is higher than of the staggered arrangement for identical  $AR$  and attacking angle. For the effect of attacking angle, the heat transfer rate at on the impinged surface was decreased by increasing the attacking angle.

The average Nusselt number of  $AR=4$  with inline arrangement and  $\theta = 0^\circ$  is the highest. This average Nusselt number is higher 6.04% than the case of  $AR=1$ , and the average Nusselt number of  $AR=8$  with identical jet arrangement is higher 5.54% than the case of  $AR=1$ . However, in the case of  $AR=8$ , staggered arrangement with  $\theta = 30^\circ$  and  $45^\circ$ , the average Nusselt number is the lowest.

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์เป็นอย่างสูงที่ให้ทุนการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้การสนับสนุนในเรื่องของสถานที่ การสร้างสร้างชุดทดลองและอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นายเอกพจน์ วิเชียรโชติ นิสิตนักศึกษาปริญญาโทบัณฑิต ที่มีส่วนช่วยในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการไหลของเจ็ท และนายนิยม พรหมรัตน์ ที่มีส่วนช่วยในการปรับปรุงและแก้ไขชุดทดลองจนเสร็จสมบูรณ์ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดีตลอดมา

## คำนำ

รายงานเล่มนี้เป็นการสรุปการทำวิจัยเรื่อง “การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทพุงชนโดยลดอิทธิพลจากกระแสไหลตัดด้วยวิธีปรับปรุงรูปแบบปากทางออกเจ็ท” โดยผู้วิจัย ผศ.ดร.ชยุต นันทดุสิตและคณะ งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2552 สำหรับเนื้อหาในรายงานงานประกอบด้วย บทนำ ชูดทดลองและขั้นตอนการวิจัย การจำลองการไหลของเจ็ทด้วย CFD ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง สำหรับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในรายงานเล่มนี้ คณะผู้วิจัยมีความยินดีที่จะได้รับข้อเสนอแนะจากผู้อ่าน เพื่อการปรับปรุงในการเขียนรายงานและทำวิจัยครั้งต่อไป

ชยุต นันทดุสิตและคณะ

พฤศจิกายน 2554

## สารบัญ

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| บทคัดย่อ   | (1)       |
| ABSTRACT   | (2)       |
| กิตติกรรมประกาศ  | (3)       |
| คำนำ   | (4)       |
| สารบัญ   | (5)       |
| รายการตาราง  | (8)       |
| รายการภาพประกอบ  | (9)       |
| สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ  | (12)      |
| <br>   |           |
| <b>บทที่ 1 บทนำ</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา  | 1         |
| 1.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเจ็ทพุงชน   | 2         |
| 1.3 การตรวจเอกสาร  | 4         |
| 1.3.1 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานเจ็ทพุงชน                                  | 4         |
| 1.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  | 6         |
| 1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย  | 16        |
| 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย  | 16        |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ  | 17        |
| <br>   |           |
| <b>บทที่ 2 ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย</b>  | <b>18</b> |
| 2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง   | 18        |
| 2.2 รายละเอียดของชุดทดลอง  | 20        |
| 2.3 การสอบเทียบสี่ของแผ่นเทอร์โมลิตคริสตัล   | 24        |
| 2.4 วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว                                       | 27        |
| 2.5 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ                       | 29        |
| 2.6 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยเทคนิคฟิล์มน้ำมัน                              | 30        |
| <br>   |           |
| <b>บทที่ 3 การจำลองการไหลของเจ็ทกลุ่มที่พุงชนพื้นผิวด้วยโปรแกรมคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล</b> | <b>31</b> |
| 3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล  | 31        |
| 3.1.1 สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์                                       | 31        |
| 3.1.2 สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน   | 32        |
| 3.2 โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหลโดยใช้ CFD  | 35        |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 3.3 วิธีการและขั้นตอนการใช้โปรแกรม Fluent ในการจำลองการไหล  | 36        |
| 3.3.1 การสร้างกริด (Meshing)  | 36        |
| 3.3.2 ข้อสมมุติฐานที่ใช้ในการคำนวณ  | 38        |
| 3.3.3 วิธีการคำนวณ  | 38        |
| <b>บทที่ 4 ผลการศึกษา</b>   | <b>40</b> |
| 4.1 ลักษณะการไหลของเจ็ท   | 40        |
| 4.1.1 ลักษณะการไหลของเจ็ทที่ระนาบต่างๆ โดยพิจารณาผลของรูปร่างปากทางออกเจ็ทและลักษณะการจัดเรียงของเจ็ทกรณีที่ไม่พิจารณามุมปะทะ | 40        |
| 4.1.2 ลักษณะการไหลของเจ็ทที่ระนาบต่างๆ โดยพิจารณาผลของรูปร่างปากทางออกเจ็ทและลักษณะการจัดเรียงของเจ็ทกรณีที่พิจารณามุมปะทะ    | 45        |
| 4.1.3 สนามความเร็วบนระนาบ Z-X ใกล้บริเวณพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกรณีที่ไม่พิจารณามุมปะทะ  | 47        |
| 4.1.4 สนามความเร็วบนระนาบ Z-X ใกล้บริเวณพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกรณีที่พิจารณามุมปะทะ   | 50        |
| 4.2 ลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว  | 53        |
| 4.2.1 ผลของการจัดเรียงของเจ็ทกรณี AR=1  | 53        |
| 4.2.2 ผลของรูปร่างออริฟิสและการจัดเรียงของเจ็ทกรณีที่ไม่พิจารณามุมปะทะ  | 54        |
| 4.2.3 ผลของรูปร่างออริฟิสและการจัดเรียงของเจ็ทกรณีที่พิจารณามุมปะทะ   | 55        |
| 4.3 ลักษณะการกระจายของنسเซลล์ต้นน้ำเบอร์บนพื้นผิว   | 58        |
| 4.3.1 ผลของการจัดเรียงของเจ็ทกรณี AR=1  | 58        |
| 4.3.2 ผลของรูปร่างออริฟิสและการจัดเรียงของเจ็ทกรณีที่ไม่พิจารณามุมปะทะ  | 59        |
| 4.3.3 ผลของรูปร่างออริฟิสและการจัดเรียงของเจ็ทกรณีที่พิจารณามุมปะทะ   | 59        |
| 4.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว   | 62        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>  | <b>63</b> |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย  | 63        |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ  | 64        |
| บรรณานุกรม  | 65        |
| ภาพผนวก   | 67        |
| ก โปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า H และอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล                             | 67        |
| ข โปรแกรม MATLAB สำหรับหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ  | 68        |

|   |    |
|---|----|
| ค. รายละเอียดการใช้โปรแกรม Fluent ในการจำลองการไหลของเจ็ท | 72 |
| ง. การนำเสนอผลงานวิชาการ                                  | 78 |



## รายการตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงรายละเอียดขนาดของออริฟิส                             | 19   |
| 2.2 แสดงรายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง                  | 19   |
| 3.1 แสดงรายละเอียดในการกำหนด Inflation function              | 36   |
| 3.2 แสดงการกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไข Spatial discretization | 38   |

## รายการภาพประกอบ

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 1.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ   | 2    |
| 1.2 โครงสร้างการไหลแบบ Horse shoe ที่เกิดจากกระแสไหลตัดผ่านลำเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว                     | 3    |
| 1.3 การระบายความร้อนในใบพัดก๊าซเทอร์โบ (สิทธิบัตรลำดับที่ US 5,533,864)                               | 4    |
| 1.4 การระบายความร้อนผนังห้องเผาไหม้ (สิทธิบัตรลำดับที่ US 6,000,908)                                  | 5    |
| 1.5 การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (สิทธิบัตรลำดับที่ US 5,329,994)                          | 5    |
| 1.6 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและโครงสร้างภายใน (สิทธิบัตรลำดับที่ US 4,494,171)                       | 6    |
| 1.7 แสดงเปรียบเทียบการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทโดยติดตั้งผนังด้านหัวฉีด                                | 6    |
| 1.8 ลักษณะการไหลของเจ็ทในกระแสไหลตัดที่เงื่อนไขอัตราส่วนพลังค์มีผลต่างๆ                               | 7    |
| 1.9 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในกระแสไหลตัด   | 8    |
| 1.10 แสดงโมเดลที่ใช้ในการทดลองของ Nakabe และคณะ   | 9    |
| 1.11 แสดงผลของอัตราส่วนความเร็วจากผลการทดลองของ Nakabe และคณะ   | 9    |
| 1.12 แสดงโมเดลที่ใช้ในการทดลองของ Nakabe และคณะ   | 10   |
| 1.13 แสดงผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของ Nakabe และคณะ  | 10   |
| 1.14 แสดงเวกเตอร์การไหลแบบหมุนวนที่ระนาบตั้งฉากกับกระแสไหลตัด ( $x/d=20$ )                            | 10   |
| 1.15 ผลของระยะพุ่งชนที่มีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุด   | 11   |
| 1.16 แสดงลักษณะปากทางออกเจ็ทหน้าตัดวงกลมและวงกลมยาว (Elongated)                                       | 11   |
| 1.17 แสดงความเข้มข้นของกลุ่มควัน (เจ็ท) ที่ไหลในกระแสไหลตัด   | 12   |
| 1.18 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทในกระแสไหลตัด ( $VR=3$ )  | 12   |
| 1.19 แสดงลักษณะหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองของ Esposito   | 13   |
| 1.20 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามตำแหน่งศูนย์กลางปากทางออกเจ็ท ( $Re=20,000$ )       | 14   |
| 1.21 แสดงการจัดเรียงของหัวฉีดและระบายความร้อนแบบ Film cooling ที่ใช้ในการทดลองของ Chiu และคณะ         | 15   |
| 1.22 แสดงผลของระยะพุ่งชนตามแนวแกน X ของออริฟิสที่อยู่แถวกลาง กรณีที่เงื่อนไข $AR=0.5$ และ $Re=30,000$ | 16   |
| 2.1 แสดงโมเดลที่ใช้ในการทดลอง   | 18   |
| 2.2 แสดงลักษณะการจัดเรียงของเจ็ทกลุ่ม $4 \times 6$ แถว  | 18   |
| 2.3 แสดงรายละเอียดรูปร่างของออริฟิส   | 19   |
| 2.4 แสดงแผนผังของชุดทดลอง   | 20   |
| 2.5 แสดงภาพถ่ายของชุดห้องพักอากาศและด้านบนเป็น Test section   | 21   |
| 2.6 แสดงการติดตั้งแผ่นสำหรับวัดการกระจายสัมประสิทธิ์การพาความร้อน                                     | 22   |
| 2.7 แสดงการติดตั้งแผ่นเจ็ทเข้ากับผนังด้านล่างของอุโมงค์ลม   | 22   |
| 2.8 แสดงลักษณะแผ่นเจ็ทแบบรูวงกลมยาวที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง $AR=4$                           | 23   |
| 2.9 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบสปีชีของแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัล                                  | 24   |
| 2.10 แสดงสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ  | 25   |

|  |    |
|--|----|
| 2.11 แสดงผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสี R, G, B และอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัลที่ใช้ในการทดลองนี้  | 25 |
| 2.12 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงเฉดสีเทียบกับอุณหภูมิทั้งห้าจุดที่สอบเทียบสี  | 27 |
| 2.13 แสดงเส้นของสมการที่ใช้ทำนายอุณหภูมิเทียบกับจุดข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบทั้งห้าบริเวณ   | 27 |
| 2.14 แสดงรายละเอียดของผนังสำหรับวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว  | 28 |
| 3.1 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน   | 33 |
| 3.2 แสดงโมเดลที่ใช้ในการออกแบบสำหรับการจำลองการไหล   | 35 |
| 3.3 แสดงรายละเอียดในการสร้างกริด   | 36 |
| 3.4 แสดงการกำหนดขนาดของกริดแบบจำกัดขอบเขต (ขอบเขตอยู่ในบริเวณที่เป็นทรงกลม)  | 37 |
| 3.5 แสดงรายละเอียดของกริดที่ระนาบตัดผ่านรูออริฟิสในกรณี AR=1 การจัดเรียงแบบ Inline   | 37 |
| 3.6 แสดงรายละเอียดของกริดที่ระนาบตัดผ่านรูออริฟิสในกรณี AR=8, $\theta=0^\circ$ การจัดเรียงแบบ Inline   | 38 |
| 3.7 แสดงตัวอย่างของกราฟการลดลงของค่าความผิดพลาด  | 39 |
| 4.1 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบต่างๆกรณีของเจ็ท AR=1 ที่มีการจัดเรียงแบบ in-line ( $Re_E=13,400$ )  | 41 |
| 4.2 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบต่างๆกรณีของเจ็ท AR=1 ที่มีการจัดเรียงแบบ staggered ( $Re_E=13,400$ )  | 42 |
| 4.3 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบต่างๆกรณีของเจ็ท AR=4 ที่มีการจัดเรียงแบบ in-line ( $Re_E=13,400$ )  | 43 |
| 4.4 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบต่างๆกรณีของเจ็ท AR=4 ที่มีการจัดเรียงแบบ in-line ( $Re_E=13,400$ )  | 44 |
| 4.5 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วในระนาบ Y-X ที่ $Z=1.5D$ กรณีของเจ็ท AR=4 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_E=13,400$ )   | 46 |
| 4.6 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วในระนาบ Y-X ที่ $Z=1.5D$ กรณีของเจ็ท AR=8 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_E=13,400$ )   | 46 |
| 4.7 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วในระนาบ Y-X ที่ $Z=0.75D$ กรณีของเจ็ท AR=4 ที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered ( $Re_E=13,400$ )   | 47 |
| 4.8 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วในระนาบ Y-X ที่ $Z=0.75D$ กรณีของเจ็ท AR=8 ที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered ( $Re_E=13,400$ )   | 47 |
| 4.9 แสดง Contours ความเร็วในแนวแกน Y และเวกเตอร์ความเร็ว ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_E=13,400$ )                     | 48 |
| 4.10 แสดง Contours ความเร็วในแนวแกน Y และเวกเตอร์ความเร็ว ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered ( $Re_E=13,400$ )                 | 49 |
| 4.11 แสดง Contours ความเร็วในแนวแกน Y และเวกเตอร์ความเร็ว ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ในกรณีของเจ็ท AR=4 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_E=13,400$ ) | 50 |

|   |    |
|---|----|
| 4.12 แสดง Contours ความเร็วในแนวแกน Y และเวกเตอร์ความเร็ว ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ในกรณีของเจ็ท AR=8 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_e=13,400$ )    | 51 |
| 4.13 แสดง Contours ความเร็วในแนวแกน Y และเวกเตอร์ความเร็ว ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ในกรณีของเจ็ท AR=4 ที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered ( $Re_e=13,400$ ) | 52 |
| 4.14 แสดง Contours ความเร็วในแนวแกน Y และเวกเตอร์ความเร็ว ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ในกรณีของเจ็ท AR=8 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_e=13,400$ )    | 53 |
| 4.15 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวกรณี AR=1( $Re=13,400$ )   | 54 |
| 4.16 แสดงลักษณะการไหลของกระแสไหลตัดที่ไหลผ่านเจ็ทที่มีการจัดเรียงแบบ inline และ staggered   | 54 |
| 4.17 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวกรณี AR=4 ( $Re=13,400$ )  | 56 |
| 4.18 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวกรณี AR=4 ( $Re=13,400$ )  | 57 |
| 4.19 แสดงลักษณะการกระจายของน้ำเสลดที่นมเบอร์บนพื้นผิวกรณี AR=1( $T_j=27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $Re=13,400$ )  | 58 |
| 4.20 แสดงลักษณะการกระจายของน้ำเสลดที่นมเบอร์บนพื้นผิวกรณี AR=4 ( $T_j=27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $Re=13,400$ )   | 60 |
| 4.21 แสดงลักษณะการกระจายของน้ำเสลดที่นมเบอร์บนพื้นผิวกรณี AR=8 ( $T_j=27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $Re=13,400$ )   | 61 |
| 4.40 แสดงค่าน้ำเสลดที่นมเบอร์ที่เฉลี่ยทั้งพื้นผิว   | 62 |

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

|                    |     |  |
|--------------------|-----|--|
| $A$                | คือ | พื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (m)  |
| $AR$               | คือ | อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของออร์ริฟิสวงกลมยาว   |
| $B$                | คือ | ความเข้มขององค์ประกอบสีน้ำเงินในภาพ  |
| $D$                | คือ | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทหน้าตัดวงกลม (m)   |
| $D_E$              | คือ | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ทเทียบเท่า  |
| $g$                | คือ | ค่าแรงดึงดูดของโลก ( $m/s^2$ )   |
| $G$                | คือ | ความเข้มขององค์ประกอบสีเขียวในภาพ  |
| $H$                | คือ | ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (m, หัวข้อที่ 2.1)   |
| $H$                | คือ | แสดงค่าเฉลี่ยในภาพ (หัวข้อที่ 2.3)   |
| $h$                | คือ | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )   |
| $\bar{h}$          | คือ | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )   |
| $\bar{h}_c$        | คือ | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยบนแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตัลติดสู่อากาศรอบๆ ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )                              |
| $I$                | คือ | แสดงค่าความมืดความสว่างของสีในภาพ (หัวข้อที่ 2.3)  |
| $I$                | คือ | กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส (A) (หัวข้อที่ 2.4)   |
| $k$                | คือ | ค่าการนำความร้อนของอากาศ ( $W/m \cdot ^\circ C$ )  |
| $p$                | คือ | ความดันสถิต ( $N/m^2$ )  |
| $\dot{Q}$          | คือ | อัตราการพาความร้อน (W)   |
| $\dot{Q}_{input}$  | คือ | อัตราการเกิดความร้อนบนแผ่นสแตนเลส (W)  |
| $\dot{Q}_{losses}$ | คือ | อัตราการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีและการพาความร้อนแบบธรรมชาติบนผนังด้านหลังของแผ่นสแตนเลสที่ติดแผ่น Thermo-chromic liquid crystals (W) |
| $\dot{q}_r$        | คือ | ฟลักซ์การสูญเสียความร้อนที่ถ่ายโอนไปยังสิ่งแวดล้อมโดยการแผ่รังสี ( $W/m^2$ )   |
| $\dot{q}_c$        | คือ | ฟลักซ์การสูญเสียความร้อนที่ถ่ายโอนไปยังสิ่งแวดล้อมโดยการพา ( $W/m^2$ )   |
| $R$                | คือ | ความเข้มขององค์ประกอบสีแดงในภาพ  |
| $R$                | คือ | ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส ( $\Omega$ )   |
| Re                 | คือ | ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์   |
| $S$                | คือ | ระยะห่างระหว่างเจ็ท (m)  |
| $S$                | คือ | แสดงค่าการอิมพัลส์ของสีในภาพ   |
| $T_j$              | คือ | อุณหภูมิของเจ็ทที่ปากทางออก ( $^\circ C$ )   |
| $T_s$              | คือ | อุณหภูมิโดยรอบในห้องทดลอง ( $^\circ C$ )   |
| $T_w$              | คือ | อุณหภูมิของเส้นแถบสีที่ปรากฏบนแผ่น Thermo-chromic liquid crystals ( $^\circ C$ )   |
| $\bar{T}_w$        | คือ | อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิว ( $^\circ C$ )   |
| $\bar{u}(x)$       | คือ | ความเร็วเฉลี่ย X (m/s)   |
| $u'(x,t)$          | คือ | ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด X (m/s)  |

|                     |     |   |
|---------------------|-----|---|
| $V_j$               | คือ | ความเร็วของเจ็ท (m/s)   |
| $\bar{V}_j$         | คือ | ความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของท่อเจ็ท (m/s)                                |
| $V_c$               | คือ | ความเร็วกระแสไหลตัด (m/s)   |
| $X$                 | คือ | แกนที่อยู่ในแนวของกระแสไหลตัด   |
| $Y$                 | คือ | แกนที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับผนังที่เจ็ทพุ่งชน                                |
| $Z$                 | คือ | แกนที่อยู่ในแนวของตั้งฉากกับแนวการไหลของกระแสไหลตัด                       |
| $\varepsilon_{TLC}$ | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีความร้อนของแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตัลติด      |
| $\mu$               | คือ | สัมประสิทธิ์ความหนืด ( $N \cdot s/m^2$ )                                  |
| $\nu$               | คือ | ความหนืดเชิงจลน์ของเจ็ท ( $m^2/s$ )                                       |
| $\theta$            | คือ | มุมปะทะ ระหว่างเจ็ทและกระแสไหลตัด ( $^\circ$ )                            |
| $\rho_j$            | คือ | ความหนาแน่นของของไหลที่เป็นเจ็ท ( $kg/m^3$ )                              |
| $\rho_c$            | คือ | ความหนาแน่นของของไหลที่เป็นกระแสไหลตัดตาม ( $kg/m^3$ )                    |
| $\sigma$            | คือ | ค่าคงที่ Stefan-Boltzman ( $W/m^2 \cdot K^4$ )                            |
| $\tau_{ij}$         | คือ | ความเค้นเนื่องจากความหนืด (viscous stresses) ( $N/m^2$ )                  |
| $\Delta T$          | คือ | ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ( $^\circ C$ ) |
| $V$                 | คือ | เวกเตอร์ความเร็ว  |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยประหยัดพลังงาน โดยเฉพาะในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น การให้ความร้อน การระบายความร้อน การทำให้แห้งบนพื้นผิวหรือในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน กระบวนการส่วนใหญ่จะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนโดยแสดงอยู่ในรูปของสมการ

$$\dot{Q} = hA(\Delta T) \quad (1.1)$$

ในที่นี้  $\dot{Q}$  คืออัตราการพาความร้อน,  $h$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน,  $A$  คือพื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และ  $\Delta T$  คือผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในสมการที่ (1.1) สามารถทำได้สองวิธีคือ วิธีแรกทำได้โดยการการเพิ่มขนาดของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น การติดตั้งบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน แต่เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองวัสดุ อุปกรณ์มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก อีกทั้งจะเกิดการสูญเสียความดันในระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวครีปจะต้านการไหลทำให้ต้องเพิ่มกำลังของปั๊ม ส่วนอีกวิธีทำได้โดยการลดความหนาหรือทำลายชั้นขอบเขต (Boundary layer) ที่เกิดขึ้นระหว่างของไหลกับพื้นผิว เนื่องจากภายในชั้นขอบเขต ของไหลมีความเร็วต่ำและมีค่าการนำความร้อนต่ำเหมือนเป็นชั้นฉนวนความร้อน ในกรณีที่ต้องการลดความหนาของชั้นขอบเขตสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วให้กับของไหลโดยต้องเพิ่มกำลังของปั๊ม ส่วนวิธีการทำลายชั้นขอบเขตสามารถทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (Turbulators) เช่น กลุ่มของริบส์ (Ribs) หรือพินส์ (Pins) บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งวิธีดังกล่าวไม่จำเป็นต้องเพิ่มความเร็วของของไหล เนื่องจากชั้นขอบเขตจะถูกทำลายเมื่อมีการไหลผ่านอุปกรณ์ที่ติดตั้ง แต่ก็เป็วิธีที่ต้องคำนึงถึงการสูญเสียความดันที่เพิ่มขึ้นในระบบ

การใช้เจ็ทพุงชนพื้นผิวเป็นวิธีการบังคับของไหลที่มีความเร็วพุงชนพื้นผิวที่ต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรง วิธีนี้ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิว เช่น การระบายความร้อนในใบพัดแก๊สเทอร์โบวิน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผนังห้องเผาไหม้ และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง (Compact High Intensity Cooler, CHIC) เป็นต้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุงชนโดยตรง และเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว อีกทั้งยังมีจุดเด่นคือ ให้อัตราส่วนระหว่างปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ออัตราการไหลที่สูง สามารถประหยัดพลังงานได้ดีเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ

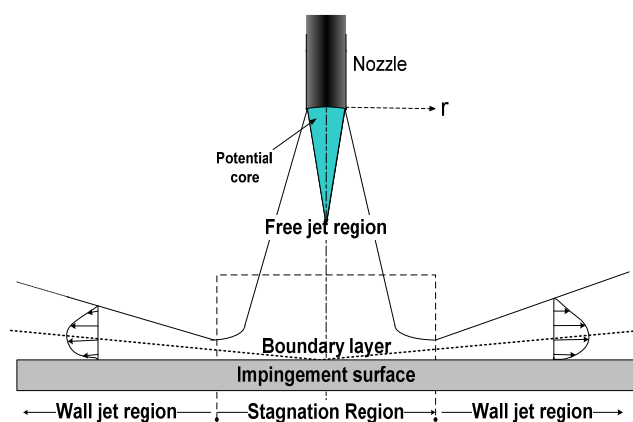
แต่อย่างไรก็ตาม การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสูงเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุงชนโดยตรง แต่บริเวณรอบๆที่เจ็ทพุงชน การถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ [1-3] ส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ และในกรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดกว้างหรือต้องการควบคุมการแลกเปลี่ยนความร้อนบนพื้นผิว จำเป็นต้องใช้กลุ่มเจ็ทพุงชนแทนเจ็ทลำเดียว ซึ่งโครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของกลุ่มเจ็ทพุงชนจะซับซ้อนกว่ากรณีของเจ็ทลำเดียว เนื่องจากก่อนที่เจ็ทจะพุงชนพื้นผิวจะเกิดปรากฏการณ์การผสมระหว่างเจ็ทที่อยู่ติดกัน และหลังจากที่เจ็ทพุงชนพื้นผิวจะเกิดปรากฏการณ์การชนกันของเจ็ทที่ไหลบนพื้นผิว [4, 5] นอกจากนี้หลังจากที่เจ็ทพุงชนพื้นผิวแล้วจะไหลรวมตัวกันเป็นการไหลภายในช่องระหว่างแผ่นเจ็ทกับพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน ซึ่งจะเกิดเป็นกระแสไหลตัดกับเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหล

(Downstream) จากการศึกษาในอดีตพบว่ากระแสไหลตัดมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลดลง [6] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษากรณีใช้เจ็ทหน้าตัดวงกลมยาว (Elongated) แทนเจ็ทหน้าตัดวงกลม เพื่อลดอิทธิพลของกระแสไหลตัด และเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณปลายทางการไหลด้วยกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลตัดไหลผ่านลำเจ็ท

## 1.2. ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเจ็ทพุ่งชน

เจ็ทพุ่งชน (Impinging jet) คือของไหลที่พุ่งออกจากหัวฉีดถูกบังคับให้ไหลพุ่งชนพื้นผิว รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างการไหลกรณีเจ็ทพุ่งชนตั้งฉากบนพื้นผิว จากรูปโครงสร้างของเจ็ทพุ่งชนสามารถแบ่งได้ 3 ส่วน คือ (1) ช่วงเจ็ทอิสระ (Free jet region) เป็นส่วนที่เจ็ทไหลออกจากหัวฉีดซึ่งจะมีโพเทนเชียลคอร์ (Potential core) อยู่กึ่งกลาง (2) บริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation region) เป็นส่วนที่เจ็ทไหลพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงและบริเวณรอบๆ และ (3) ช่วงเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นการไหลของเจ็ทในแนวขนานบนพื้นผิวรอบๆ บริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation region) หลังจากการชน ในบริเวณนี้ความเร็วของเจ็ทที่ไหลบนพื้นผิวจะเริ่มลดลงโดยที่อัตราการลดความเร็วจะแปรผกผันจากระยะจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวรัศมี ส่งผลทำให้ชั้นขอบเขต (Boundary layer) บนพื้นผิวจะค่อยๆ หนาขึ้น

โดยปกติเจ็ทลำเดียวจะถูกนำไปใช้แลกเปลี่ยนความร้อนบนพื้นผิวที่มีบริเวณจำกัดหรือเฉพาะจุดบนพื้นผิว ในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณรอบๆ ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะขึ้นอยู่กับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และโครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว ในกรณีที่ส่วนปลายสุดของโพเทนเชียลคอร์พุ่งชนพื้นผิว จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนสูงที่สุด เนื่องจากการไหลของเจ็ทมีโมเมนตัมและมีค่าความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ที่สูง แต่กรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมากขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะลดลง เนื่องจากโมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวลดลง



รูปที่ 1.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ

กรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีบริเวณกว้างจำเป็นต้องใช้เจ็ทหลายๆลำหรือกลุ่มเจ็ทพุ่งชน (Multiple impinging jets) เพื่อให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงและสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว โครงสร้างการไหลกรณีของกลุ่ม



เจ็ทจะซับซ้อนกว่ากรณีของเจ็ทลำเดียว โดยเฉพาะในกลุ่มเจ็ทจะมีตัวแปรที่เพิ่มเข้ามาเช่น รูปแบบการจัดเรียงของเจ็ทและระยะห่างระหว่างลำเจ็ทซึ่งจะมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

ลักษณะการไหลของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว ลำเจ็ทที่อยู่ต้นทางการไหลหลังจากที่พุ่งชนพื้นผิวจะเปลี่ยนเป็นเจ็ทผนัง (Wall jet) และไหลอยู่ระหว่างผนังเจ็ทและพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน เกิดเป็นกระแสไหลตัดกับเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหล ซึ่งกระแสไหลตัดนี้มีผลต่อโครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว [6, 7] โดยผลของกระแสไหลตัดสามารถแสดงในรูปอัตราส่วนความเร็ว (Velocity ratio) ดังนี้

$$VR = \frac{V_j}{V_c} \quad (1.2)$$

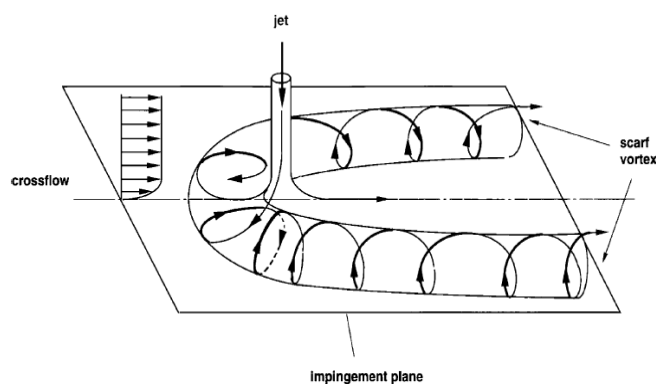
หรือแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนฟลักซ์มวล (Mass flux ratio)

$$M = \frac{\rho_j V_j}{\rho_c V_c} \quad (1.3)$$

หรืออัตราส่วนฟลักซ์โมเมนตัม (Momentum flux ratio)

$$G = \frac{\rho_j V_j^2}{\rho_c V_c^2} \quad (1.4)$$

ในที่นี้  $V_j$  และ  $V_c$  คือความเร็วของเจ็ทและกระแสไหลตัดตามลำดับ  $\rho_j$  และ  $\rho_c$  คือความหนาแน่นของเจ็ทและกระแสไหลตัดตามลำดับ



รูปที่ 1.2 โครงสร้างการไหลแบบ Horse shoe ที่เกิดจากกระแสไหลตัดผ่านลำเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว [8]

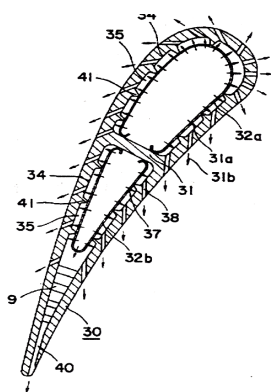
รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้างการไหลหมุนวนรูปเกือกม้า (Horse shoe vortices) ที่เกิดจากการปะทะระหว่างกระแสไหลตัดกับเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว โดยบริเวณที่เกิดการปะทะระหว่างกระแสทั้งสองจะเกิดเป็นกระแสหมุนวน (Scarf vortex) ไหลแยกออกสองข้างของลำเจ็ท และในกรณีที่กระแสไหลตัดผ่านมีความเร็วสูงจะทำให้กระแสเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเกิดการหันเหส่งผลทำให้เจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวสูญเสียโมเมนตัม จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนลดลง [8]

### 1.3 การตรวจเอกสาร

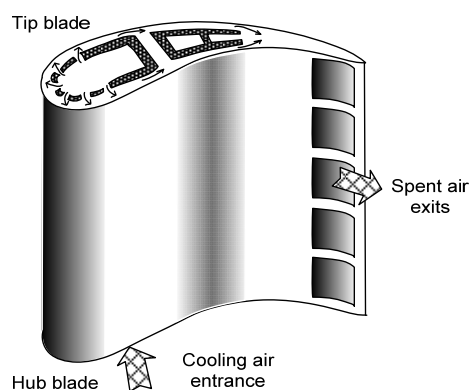
การถ่ายเทความร้อนโดยใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวได้มีการศึกษามานานตั้งแต่อดีต มีนักวิจัยจำนวนมากศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทและคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ถูกเจ็ทพุ่งชน จากการศึกษาพบว่า การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ถูกชนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเจ็ทก่อนพุ่งชนและการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวหลังจากการชน เนื่องจากการใช้เจ็ทพุ่งชนนั้นให้อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวสูงกว่าวิธีอื่นๆ จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางเช่น การระบายความร้อนใบพัดแก๊สเทอร์โบวิน ผนังห้องเผาไหม้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือใช้ในอุปกรณ์ระบายความร้อนขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง (Compact High Intensity Cooler, CHIC) ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำเจ็ทพุ่งชนไปใช้งานในอุปกรณ์ด้านความร้อนที่ได้รับการจดสิทธิบัตรและการตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชนรวมถึงการศึกษาโครงสร้างลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชน

#### 1.3.1 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เทคนิคเจ็ทพุ่งชน

**สิทธิบัตรลำดับที่ US5,533,864 การระบายความร้อนในใบพัดแก๊สเทอร์โบวิน** [9] เป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบระบายความร้อนในใบพัดแก๊สเทอร์โบวินโดยใช้เจ็ทพุ่งชนตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.3 ในการออกแบบได้เป่าอากาศไหลเข้าด้านในใบพัดผ่านช่องด้านล่างของใบพัด หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านรูต่างๆที่ได้ออกแบบไว้และพุ่งชนพื้นผิวที่ต้องการระบายความร้อน ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างภายในใบพัดค่อนข้างที่จะซับซ้อนโดยเฉพาะใบพัดแก๊สเทอร์โบวินที่มีขนาดเล็ก



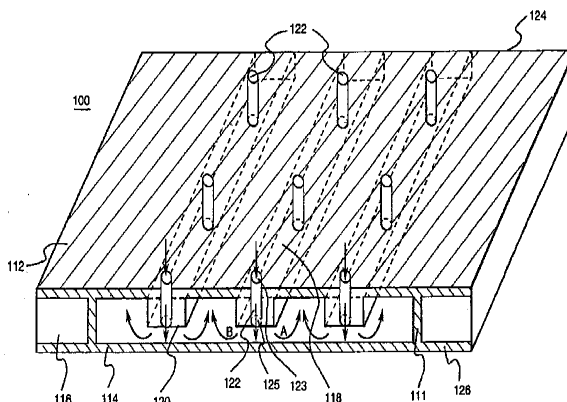
(ก) ภาพตัดของใบพัดแก๊สเทอร์โบวิน



(ข) โครงสร้างภายในของใบพัดแก๊สเทอร์โบวิน

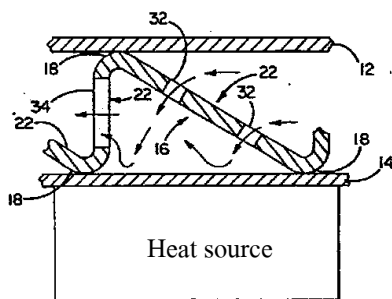
รูปที่ 1.3 การระบายความร้อนในใบพัดแก๊สเทอร์โบวิน [9]

**สิทธิบัตรลำดับที่ US6,000,908 การระบายความร้อนผนังห้องเผาไหม้** [10] เป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนในผนังห้องเผาไหม้ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.4 โดยออกแบบให้ห้องเผาไหม้แบบผนังคู่ แผ่นหนึ่งสัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรงส่วนอีกแผ่นใช้สำหรับติดตั้งหัวฉีด เพื่อปล่อยเจ็ทให้ไหลพุ่งชนผนังที่สัมผัสกับแก๊สร้อนทำให้เกิดการระบายความร้อนขึ้น สำหรับสิทธิบัตรนี้ได้มีแนวคิดเกี่ยวกับการจัดระบบการไหลของกระแสลมทิ้ง (Spent air) ให้ไหลออกอย่างเป็นระบบ เนื่องจากการนำเจ็ทพุ่งชนมาใช้กับห้องเผาไหม้ระบบผนังสองชั้น จะมีปัญหาในเรื่องกระแสลมทิ้ง (Crossflow) ไหลตัดผ่านกระแสลมเจ็ทที่กำลังจะพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวลดลง



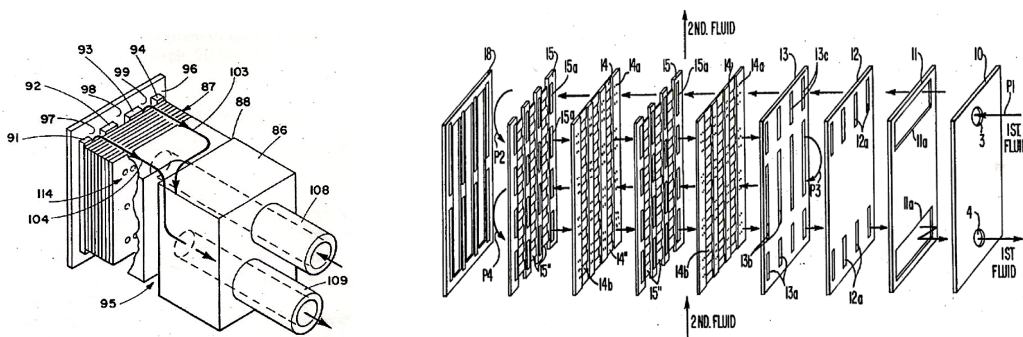
รูปที่ 1.4 การระบายความร้อนผนังห้องเผาไหม้ [10]

สิทธิบัตรลำดับที่ US5,329,994 การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [11] เป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคเจ็ทพุ่งชน ตามที่แสดงในรูปที่ 1.5 สำหรับโครงสร้างของระบบประกอบด้วยแผ่นระบายสองแผ่นที่วางขนานกัน และมีแผ่นระบายอีกแผ่นถูกตัดให้หยักแล้วเจาะรูออริฟิซสอดระหว่างแผ่นระบายทั้งสองที่วางขนานกัน เมื่อของไหลไหลผ่านรูออริฟิซจะเปลี่ยนเป็นเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวระบายความร้อนที่ติดอยู่กับแหล่งความร้อน ทำให้เกิดการระบายความร้อนบนพื้นผิวขึ้น หลังจากนั้นของไหลก็จะไหลออกตามช่องที่ได้ออกแบบไว้ต่อไป



รูปที่ 1.5 การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [11]

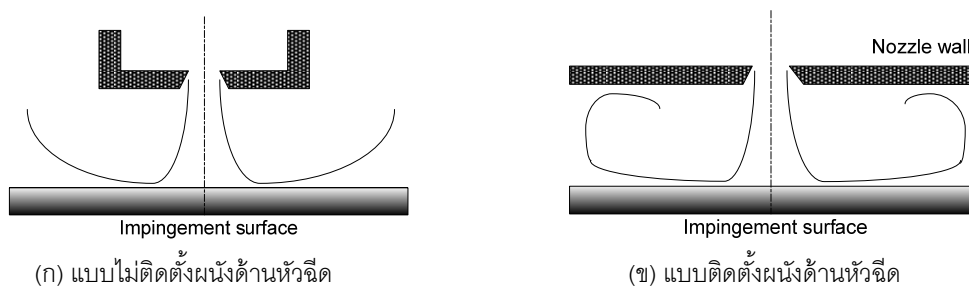
สิทธิบัตรลำดับที่ US4,494,171 การถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [12] สำหรับสิทธิบัตรนี้เป็นการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยนำหลักการของเจ็ทพุ่งชนมาใช้ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.6 ทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลงและมีน้ำหนักเบา เมื่อเทียบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิม เนื่องจากให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง ทำให้สามารถลดพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนหรือขนาดของอุปกรณ์ได้ สำหรับโครงสร้างภายในอุปกรณ์จะใช้แผ่นออริฟิซหลายๆแผ่นวางซ้อนกัน โดยที่เจ็ทจะไหลออกจากกลุ่มของออริฟิซที่อยู่บนแผ่นแรกและพุ่งชนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนของแผ่นถัดไป หลังจากนั้นเจ็ทจะไหลผ่านแผ่นออริฟิซหลายๆชั้นในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 1.6 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและโครงสร้างภายใน [12]

### 1.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

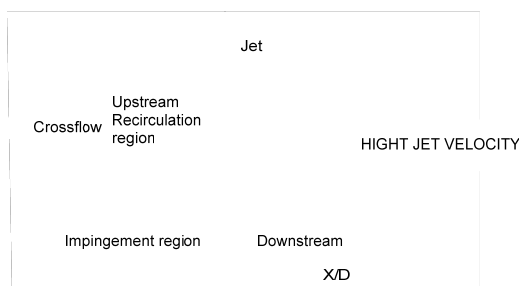
Ashforth-Frost และ Jambunathan [13] ได้ศึกษาผลกระทบจากลักษณะของหัวฉีดและการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทที่มีต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ในการทดลองได้เลือกใช้หัวฉีดสองประเภทที่ให้ลักษณะการกระจายความเร็วที่ปากทางออกแบบสม่ำเสมอ (Flat velocity profile) และแบบที่พัฒนาแล้ว (Fully developed velocity profile) พบว่าส่วนโพเทนเชียลคอร์ (Potential core) ของเจ็ทที่มีการกระจายความเร็วที่ปากทางออกแบบพัฒนาแล้วจะยาวกว่าของแบบสม่ำเสมอประมาณ 7% นอกจากนี้ได้ศึกษาผลกระทบจากการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทโดยติดตั้งผนังด้านหัวฉีดตามที่แสดงในรูปที่ 1.7 พบว่าการติดตั้งผนังด้านหัวฉีด (รูปที่ 1.7 (ข)) มีผลทำให้โพเทนเชียลคอร์ของเจ็ทยาวกว่าแบบไม่ติดตั้งผนังด้านหัวฉีด (รูปที่ 1.7 (ก)) ประมาณ 20% และในกรณีนี้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวพบว่าการติดตั้งผนังด้านหัวฉีดทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงเมื่อเทียบกับแบบไม่ติดตั้งผนังด้านหัวฉีด ซึ่งเป็นผลจากการที่เจ็ทถูกจำกัดบริเวณการไหลหลังจากที่พุ่งชนผนัง



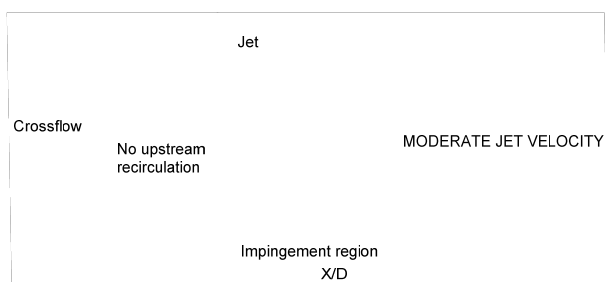
รูปที่ 1.7 แสดงเปรียบเทียบการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทโดยติดตั้งผนังด้านหัวฉีด

Ashforth-Frost และคณะ [14] ได้ศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทจากหัวฉีดแบบสลิต (Slot nozzle) ที่พุ่งชนพื้นผิวโดยทำการวัดความเร็วเฉลี่ยและระดับความปั่นป่วน (Turbulence) ตามแนวแกนของเจ็ทและหน้าตัดของเจ็ท จากการศึกษาพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสอดคล้องกับความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทที่วัดได้ คือในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน  $L=4W$  ( $W$  คือความกว้างของสลิต) ซึ่งเป็นระยะที่โพเทนเชียลคอร์ของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว พบว่าระดับความปั่นป่วนของเจ็ทในส่วนที่พุ่งชนพื้นผิวมีค่าน้อย และในขณะที่เจ็ทไหลบนพื้นผิวระดับความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้น มีการเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วนบนพื้นผิว ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดสองบริเวณ คือ จุดที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณที่ห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน แต่ในกรณีที่ระยะจากปาก

ทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน  $L=9.2W$  เนื่องจากที่ระยะดังกล่าวโพเทนเชียลคอร์ของเจ็ทหมดลงทำให้ระดับความปั่นป่วนในเจ็ทสูงขึ้น และเปลี่ยนเป็นการไหลแบบปั่นป่วนก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนจะสูงสุดที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น เมื่อระยะห่างจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงตามลำดับ



(ก) อัตราส่วนฟลักซ์มวลสูง



(ข) อัตราส่วนฟลักซ์มวลปานกลาง

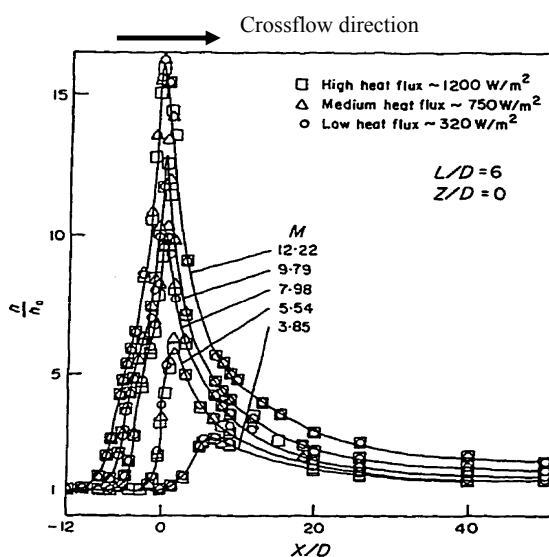


(ค) อัตราส่วนฟลักซ์มวลต่ำ

รูปที่ 1.8 ลักษณะการไหลของเจ็ทในกระแสไหลตัดที่เงื่อนไขอัตราส่วนฟลักซ์มวลต่างๆ [15]

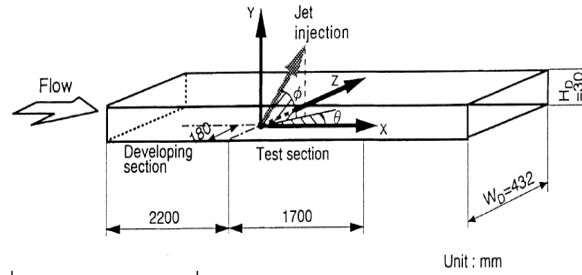
Bouchez และ Goldstein [15] ได้ศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกระแสไหลตัด ในการทดลองได้ใช้เจ็ทที่มีหน้าตัดวงกลมพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน  $H=6D$  ( $D$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ท) จากการศึกษาพบว่ากระแสการไหลของเจ็ทในกระแสไหลตัดสามารถแบ่งลักษณะการไหลออกเป็น 3 ประเภท ตามอัตราส่วนฟลักซ์มวล ( $M$ ) คือ ที่ระดับสูง ระดับปานกลาง และระดับต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 1.8 ในกรณีที่อัตราส่วนฟลักซ์มวลมีค่าสูง การพุ่งชนของเจ็ทบนผนังด้านตรงข้ามจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและเกิดการไหลแบบหมุนวนขึ้นบริเวณทางด้านต้นทางของบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับกรณีที่อัตราส่วนฟลักซ์มวลอยู่ในระดับปานกลาง บริเวณที่เกิดการไหลแบบหมุนวนทางด้านต้นทางการไหลจะหายไป แต่เจ็ทยังคงพุ่งชนผนังด้านตรงข้าม และ

ในกรณีที่อัตราส่วนของฟลักซ์มวลมีค่าต่ำ เจ็ทจะถูกพัดพาโดยกระแสไหลตัดไม่เกิดการพุ่งชนพื้นผิว รูปที่ 1.9 แสดงอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวในกรณีที่ไม่มีเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวต่อด้วยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวในกรณีที่ไม่มีเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว ( $h/h_0$ ) จากรูปพบว่าในบริเวณต้นทางการไหลของบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะมีค่า  $h/h_0=1$  และลดลงเล็กน้อยก่อนถึงบริเวณต้นทางการไหลของเจ็ท เนื่องจากความเร็วของกระแสไหลตัดลดลงเมื่อถูกขวางโดยเจ็ท และในบริเวณต้นทางการไหลของเจ็ทจะเกิดการไหลแบบหมุนวนทำให้ค่า  $h/h_0$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุด (Stagnation point) และลดลงอย่างต่อเนื่องตามทิศทางการไหลของกระแสไหลตัด นอกจากนี้ยังพบว่าค่า  $h/h_0$  สูงสุดของแต่ละกรณีจะมีค่าลดลงตามการลดลงของอัตราส่วนฟลักซ์มวล และจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเลื่อนตำแหน่งไปด้านปลายทางการไหล

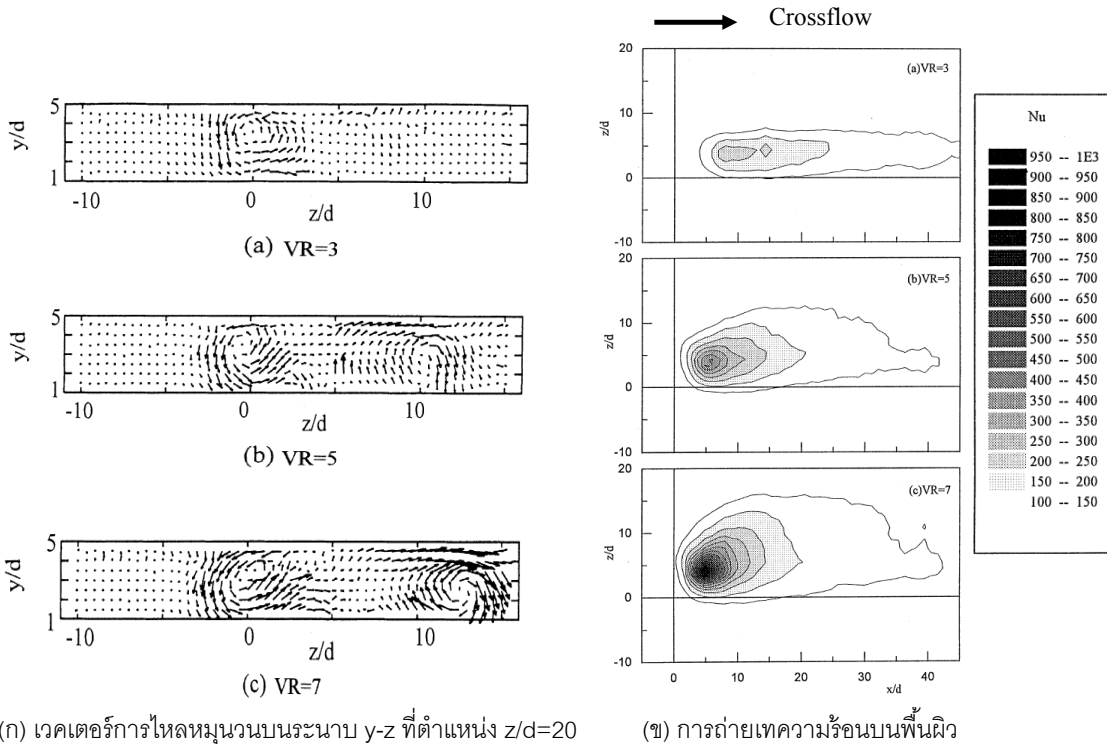


รูปที่ 1.9 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในกระแสไหลตัด [15]

Nakabe และคณะ [16] ได้ศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนในกระแสไหลตัดภายในอุโมงค์หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการทดลองได้ขีดเจ็ทจากด้านล่างของ Test section ทำมุมเอียง  $45^\circ$  กับระนาบ XY และระนาบ YZ พุ่งชนผนังด้านบนของ Test section ดังแสดงในรูปที่ 1.10 สำหรับอัตราส่วนความเร็วที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง  $VR=3$  ถึง 7 รูปที่ 1.11 (ก) แสดงเวกเตอร์ความเร็วการไหลแบบหมุนวนที่ระยะห่างจากศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนในระนาบ YZ ที่  $X/d=20$  ( $d$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ท) และรูปที่ 1.11 (ข) แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขอัตราส่วนความเร็วต่างๆ จากรูปพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนความเร็ว (เพิ่มความเร็วเจ็ท) ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้น และทำให้การไหลหมุนวนในกระแสไหลตัดเพิ่มขึ้น ซึ่งการไหลหมุนวนมีส่วนช่วยทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 1.10 แสดงโมเดลที่ใช้ในการทดลองของ Nakabe และคณะ [16]

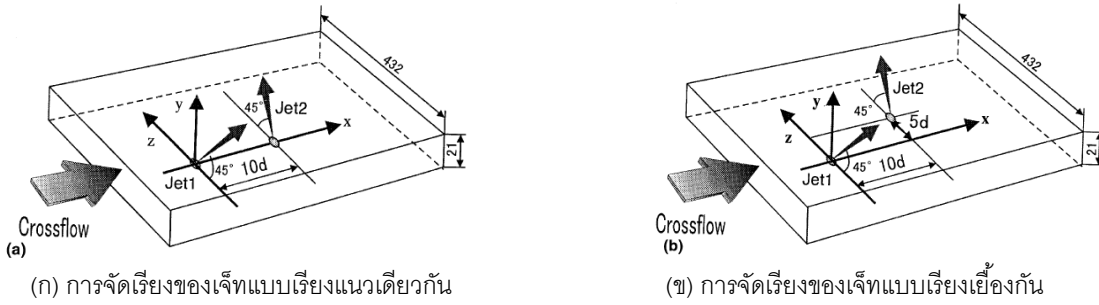


(ก) เวกเตอร์การไหลหมุนวนบนระนาบ y-z ที่ตำแหน่ง z/d=20

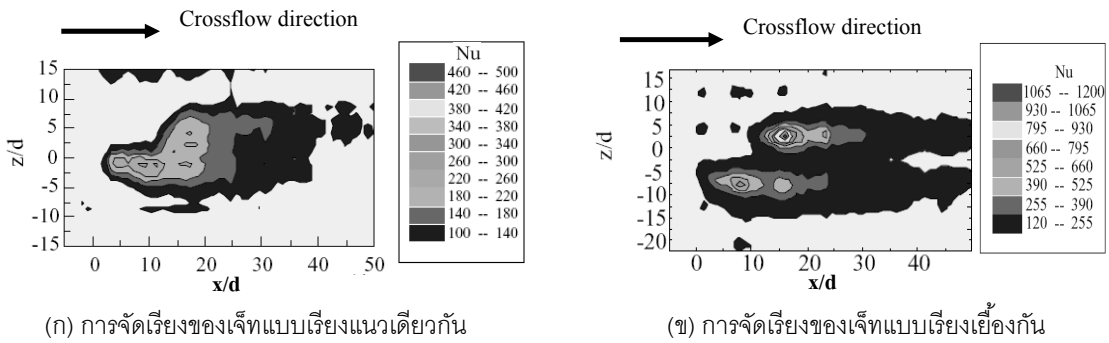
(ข) การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ 1.11 แสดงผลของอัตราส่วนความเร็วจากผลการทดลองของ Nakabe และคณะ [16]

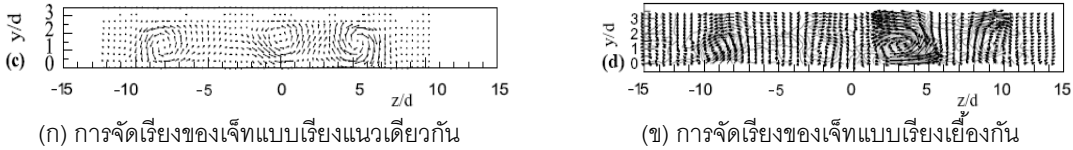
นอกจากนี้ Nakabe และคณะ [17] ได้ศึกษากรณีที่ใช้เจ็ทสองลำที่มีหน้าตัดวงกลมพุ่งชนพื้นผิวในกระแสไหลตัด และศึกษาผลจากการจัดเรียงของเจ็ทกรณีแบบเรียงแนวเดียวกัน (รูปที่ 1.12 (ก)) และแบบเรียงเยื้องกัน (รูปที่ 1.12 (ข)) โดยกำหนดให้เจ็ทแต่ละลำพุ่งชนทำมุมเอียง  $45^\circ$  กับแกน  $+Z$  และ  $-Z$  ตามลำดับ ที่อัตราส่วนความเร็ว  $VR=5$  จากผลการทดลองตามที่แสดงในรูปที่ 1.13 พบว่าการจัดเรียงของเจ็ทมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกระแสไหลตัดค่อนข้างมาก กรณีของการจัดเรียงของเจ็ทแบบเรียงเยื้องกันทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงและบริเวณที่การถ่ายเทความร้อนสูงมีขนาดกว้างกว่าเมื่อเทียบกับการจัดเรียงของเจ็ทแบบเรียงแนวเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการจัดเรียงของเจ็ทแบบเรียงเยื้องกันจะมีผลทำให้เกิดกระแสหมุนวนหลังจากที่กระแสไหลตัดปะทะกับเจ็ทพุ่งชนได้รุนแรงกว่าการจัดเรียงของเจ็ทแบบเรียงแนวเดียวกัน (รูปที่ 1.14)



รูปที่ 1.12 แสดงโมเดลที่ใช้ในการทดลองของ Nakabe และคณะ [17]



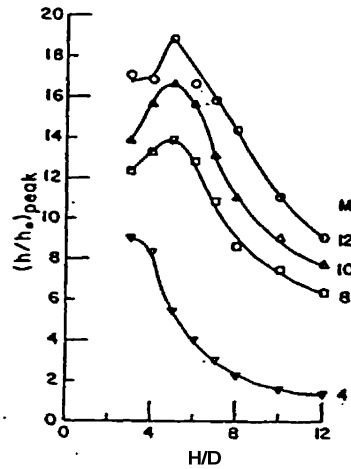
รูปที่ 1.13 แสดงผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของ Nakabe และคณะ [17]



รูปที่ 1.14 แสดงเวกเตอร์การไหลแบบหมุนวนที่ระนาบ y-z ที่ตำแหน่ง x/d=20 [17]

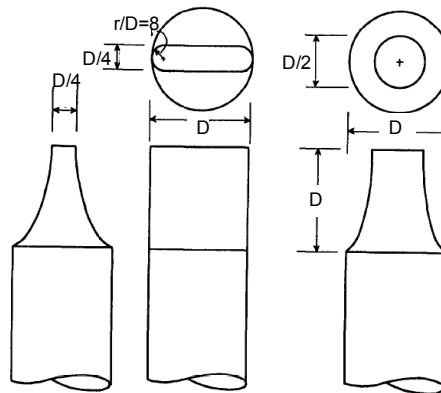
Sparrow และคณะ [18] ได้ศึกษาผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทในกระแสไหลตัดภายใต้เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในช่วง  $H=3D-12D$  (โดย D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ท) และอัตราส่วนฟลักซ์มวลในช่วง  $M=4-12$  จากผลการศึกษาพบว่า กรณีอัตราส่วนฟลักซ์มวลสูง (ในช่วง  $M=8-12$ ) ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง  $H=5D-6D$  และในกรณีที่อัตราส่วนฟลักซ์มวลต่ำ ( $M=4$ ) ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดจะลดลงอยู่ในช่วง  $H<3D$  ดังแสดงในรูปที่ 1.15 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเจ็ทในกระแสไหลตัดที่พุ่งชนพื้นผิว



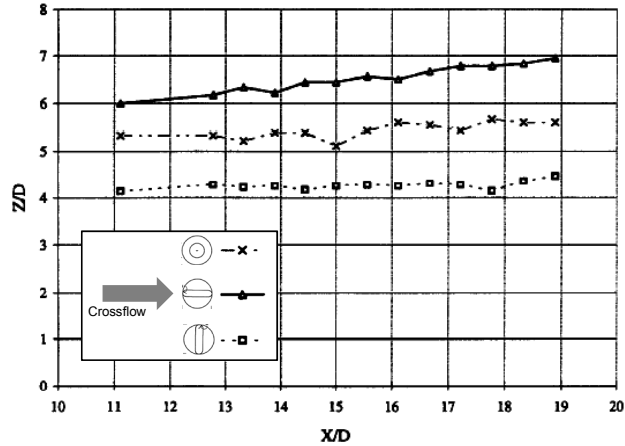


รูปที่ 1.15 ผลของระยะฟุ้งชนที่มีต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุด [18]

Seifer และ Shemer [19] ได้ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทในกระแสไหลตัด โดยเปรียบเทียบปากทางออกเจ็ทที่มีหน้าตัดวงกลม (Round) และวงกลมยาว (Elongated round) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.16 ในการทดลองได้ใช้เจ็ทควีนซิดลงไปในกระแสไหลตัด โดยผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปของความเข้มข้นของกลุ่มควีนซิดที่ไหลในกระแสไหลตัดตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.17 จากผลการทดลองพบว่า กรณีที่จัดรูปแบบปากทางออกของเจ็ทแบบวงกลมยาวโดยกำหนดให้ด้านยาวขนานกับทิศทางการไหลของกระแสไหลตัด จะมีผลทำให้เจ็ทไหลทะลุเข้าไปในกระแสไหลตัดได้มากกว่ากรณีของเจ็ทที่มีหน้าตัดวงกลม เนื่องจากเจ็ทที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดที่มีหน้าตัดวงกลมยาวสามารถลดพื้นที่ที่มีการปะทะระหว่างกระแสการไหลของเจ็ทและกระแสไหลตัด

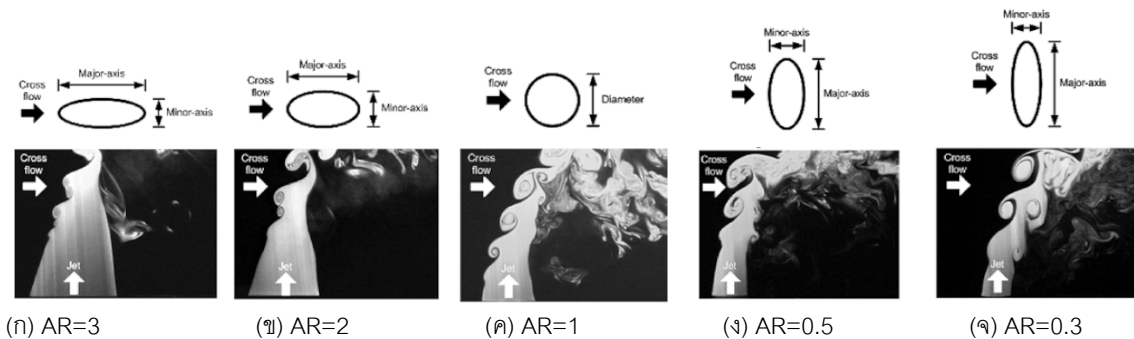


รูปที่ 1.16 แสดงลักษณะปากทางออกเจ็ทหน้าตัดวงกลมและวงกลมยาว (Elongated round hole) [19]



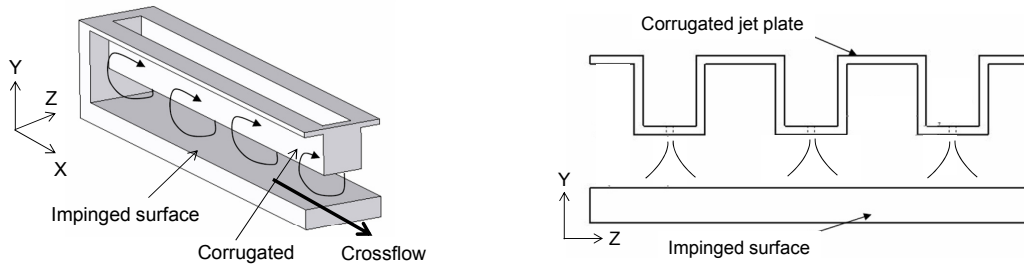
รูปที่ 1.17 แสดงตำแหน่งของกลุ่มควีน (เจ็ต) ที่ไหลทะลุกระแสไหลตัด [19]

New และคณะ [20] ได้ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ตในกระแสไหลตัดโดยพิจารณาผลของอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect Ratio, AR) ของปากทางออกเจ็ตที่เป็นหน้าตัดแบบวงรี ในการศึกษาได้กำหนดให้อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของปากทางออกเจ็ต AR= 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 จากผลการทดลองในรูปที่ 1.18 พบว่า ปากทางออกเจ็ตที่มีค่า AR=3 เจ็ตสามารถไหลพุ่งเข้าไปในกระแสไหลตัดได้มากกว่าตัวแปรอื่นๆ และเมื่อค่า AR ลดลง ทำให้พื้นที่ที่เกิดการปะทะระหว่างเจ็ตและกระแสไหลตัดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้เจ็ตมีทิศทางการไหลเอียงตามทิศทางการไหลของกระแสไหลตัดมากขึ้น

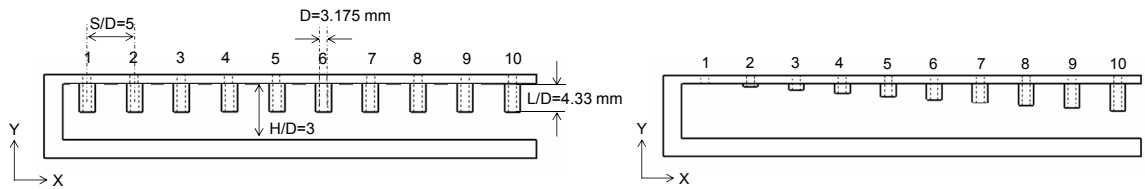


รูปที่ 1.18 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ตในกระแสไหลตัด (VR=3) [20]

Geers และคณะ [5] ได้ศึกษาผลของระยะห่างจากปากทางออกเจ็ตถึงพื้นผิวที่เจ็ตพุ่งชน (H) และระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ต (S) ในกรณีของกลุ่มเจ็ตที่มีหน้าตัดวงกลมพุ่งชนพื้นผิว โดยกำหนดระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ตถึงพื้นผิวที่เจ็ตพุ่งชนอยู่ในช่วง  $H=3D-10D$  (D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ต) และระยะห่างระหว่างเจ็ตอยู่ในช่วง  $S=2D-6D$  จากการศึกษาพบว่าที่ระยะ  $H=3D-6D$  อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าที่ระยะ  $H=8D-10D$  สำหรับผลของตัวแปรระยะห่างระหว่างเจ็ต พบว่าที่ระยะ  $S=4D$  บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมีพื้นที่กว้างกว่ากรณีที่ระยะ  $S=2D$  และมีความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนมากกว่ากรณีที่ระยะ  $S=6D$



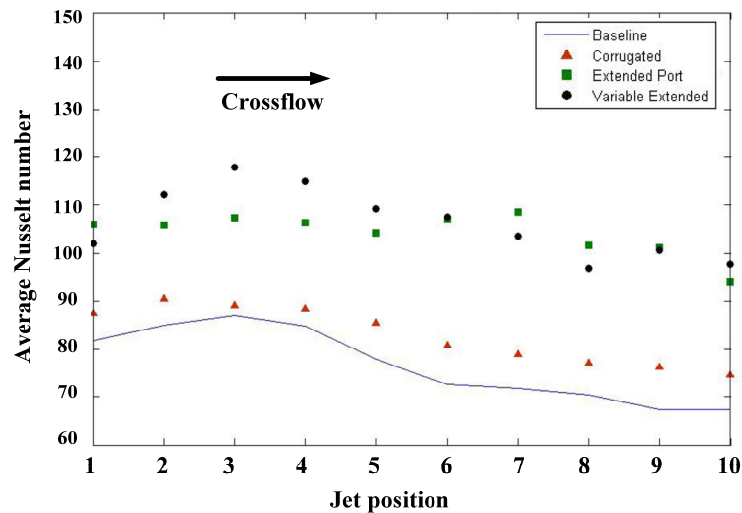
(ก) ลักษณะแผ่นเจ็ทแบบลอน (Corrugated jet plate)



(ข) แบบหัวฉีดท่อยาวคงที่ (Extended port)

(ค) แบบหัวฉีดท่อยาวคงที่ไม่คงที่ (Variable extended port)

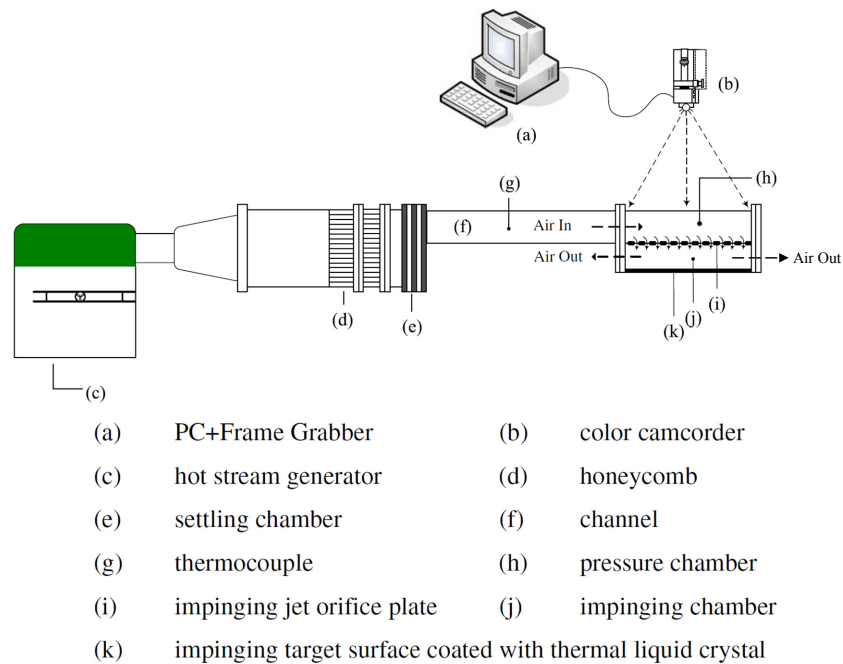
รูปที่ 1.19 แสดงลักษณะหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองของ Esposito [6]

รูปที่ 1.20 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยที่ตำแหน่งของศูนย์กลางปากทางออกเจ็ทแต่ละลำ ( $Re=20,000$ ) [6]

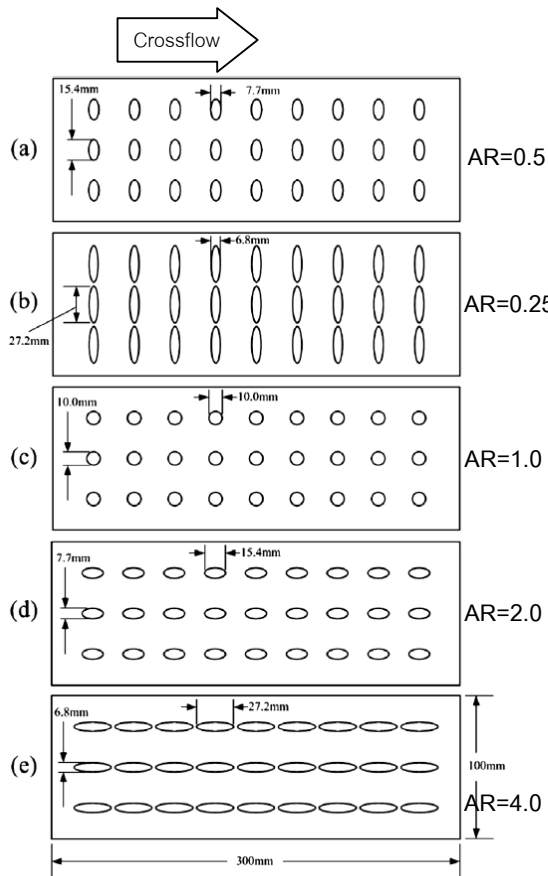
Esposito [6] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน โดยออกแบบชุดทดลองให้สามารถลดผลกระทบจากกระแสไหลเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว สำหรับชุดทดลองที่ได้ออกแบบมีสามลักษณะ (1) แผ่นเจ็ทเป็นแบบลอน (Corrugated) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.19 (ก) ในการออกแบบได้กำหนดทิศทางกระไหลของอากาศหลังจากพุ่งชนพื้นผิว โดยบังคับอากาศให้ไหลออกตามช่องที่เป็นลอนขนานกับทิศทางกระไหลของกระแสลมที่ส่งผลทำให้กระแสไหลตัดรบกวนการไหลของกระแสเจ็ทน้อยลง (2) ได้ออกแบบให้หัวฉีดเป็นแบบท่อยาวคงที่ (Extended port) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.19 (ข) การออกแบบในลักษณะดังกล่าวมีผลทำให้ปากทางออกเจ็ทยื่นออกไปกับพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมากขึ้น และ (3) แบบหัวฉีดท่อยาวไม่คงที่ (Variable extended port) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.19 (ค) โดยที่ท่อหัวฉีดที่ยาวสุดจะติดตั้งด้านปลายทางการไหลของกระแสไหลตัด นอกจากนี้ยังได้ออกแบบชุดทดลองเป็นแบบ ออริฟิส

ธรรมชาติ เพื่อทำการเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลการทดลองของสามกรณีแรก จากผลการทดลองแสดงในรูปที่ 1.20 พบว่าชุดทดลองที่เป็นแบบหัวฉีดท่อยาวไม่คงที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่ากรณีอื่นๆ ยกเว้นที่ตำแหน่งหัวฉีดที่ 7 และ 8 หัวฉีดแบบท่อยาวคงที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด สำหรับกรณีของออร์ริฟิสรธรรมชาติให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำกว่าทุกๆกรณี อย่างไรก็ตามการออกแบบชุดทดลองของ Esposito [6] ทั้งสามรูปแบบมีข้อเสียคือเกิดความดันตกภายในระบบ เนื่องจากมีส่วนที่ยื่นออกมาภายในช่องระหว่างแผ่นเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชน

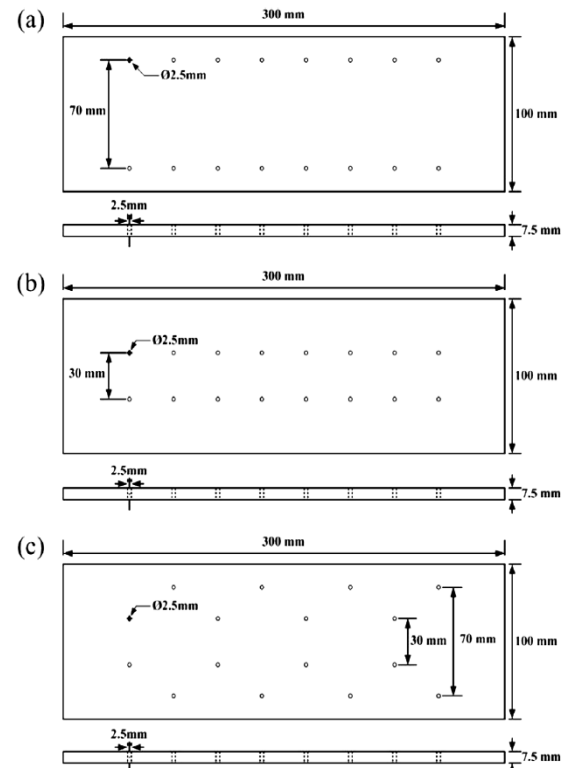
Chiu และคณะ [21] ได้ทำการศึกษามูลของรูปร่างออร์ริฟิสแบบวงรีที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชนโดยใช้ชุดทดลองตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.21 สำหรับค่าอัตราส่วนความยาวแกนหลักต่อด้วยความยาวแกนรอง AR (Aspect ratio) ของออร์ริฟิสรูปร่างอยู่ในช่วง  $AR=0.5-4.0$  โดยการจัดเรียงของหัวฉีดเป็นแบบแถว (Inline)  $3 \times 9$  ลำ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.22 (ก) นอกจากนี้ในการทดลองได้พิจารณาผลของรูปแบบรูปร่าง Film cooling บนผนังที่เจ็ทพุ่งชน โดยแต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2.5 \text{ mm}$  และพิจารณาผลของการจัดเรียงของรู Film cooling สามแบบตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.22 (ข) จากผลการทดลองพบว่า ตัวแปร AR มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุดเกิดขึ้นที่ตัวแปร  $AR=1.0, 0.5, 0.25, 2.0,$  และ  $4.0$  ตามลำดับ จากผลการทดลองที่เกิดขึ้นเนื่องจากการออกแบบของชุดทดลองที่ไม่ได้กำหนดให้เจ็ทแต่ละรูของออร์ริฟิสมีอัตราการไหลคงที่ อากาศที่ไหลเข้าห้องพักอากาศ มีการไหลจากปากทางเข้าสู่ด้านท้ายของห้องพักอากาศ ซึ่งอากาศที่ไหลด้านในในห้องพักอากาศมีทิศทางตั้งฉากกับรูออร์ริฟิส ทำให้ออร์ริฟิสที่อยู่ตำแหน่งด้านต้นทางการไหล (ด้านหน้าของห้องพักอากาศ) มีอัตราการไหลมากกว่าออร์ริฟิสที่อยู่ด้านปลายทางการไหล (ด้านหลังของห้องพักอากาศ) ส่งผลให้ออร์ริฟิสที่ออกแบบให้มีรูปทรง  $AR=0.5$  และ  $0.25$  มีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมากกว่าออร์ริฟิสที่มีรูปทรง  $AR=2.0$  และ  $4.0$



รูปที่ 1.21 แสดงรูปชุดทดลองของ Chiu และคณะ [21]



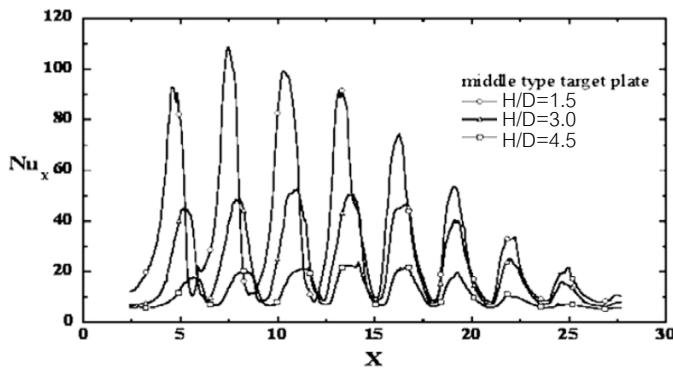
(ก) การจัดเรียงของออริฟิส AR=0.5-4



(ข) การจัดเรียงของรูระบายอากาศแบบ Film cooling

รูปที่ 1.22 แสดงการจัดเรียงของออริฟิสและรูระบายอากาศ Film cooling บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน [21]

ในงานวิจัยเดียวกัน Chiu และคณะ [21] ได้ทำการศึกษามวลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ในการทดลองได้กำหนดระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน  $H/D=1.5, 3.0$  และ  $4.5$  โดยที่  $D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ทหน้าตัดวงกลม รูปที่ 1.23 แสดงการกระจายของค่านัสเซลล์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวแกน  $X$  (แนวทิศทางการไหลเข้าของอากาศ) จากรูปเป็นค่าการกระจายนัสเซลล์นัมเบอร์ที่ตัดตามแนวศูนย์กลางของออริฟิสที่อยู่แถวกลาง กรณีที่เงื่อนไข  $AR=0.5$  และมีรู Film cooling เป็นแบบแถวจัดเรียงในแนวเดียวกันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (แบบ B ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.22 (ข)) จากผลการทดลองพบว่า กรณีที่ระยะ  $H/D=1.5$  จะให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวแปรระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะลดลงตามระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1.23 แสดงผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีผลต่อการกระจายนัสเซลต์ในแนวแกน X ที่เงื่อนไข  $AR=0.5$  กรณีแบบ (a) และ  $Re=30,000$  [21]

จากการทบทวนเอกสารการท้าววิจัยพบว่ากระแสไหลตัดมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหน้าตัดวงกลมลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการปะทะของกระแสไหลตัดทำให้เจ็ทเสียโมเมนตัมในการพุ่งชนพื้นผิว อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมา การออกแบบให้ออร์ริฟิสเป็นลักษณะยาวตามการไหลของกระแสไหลตัดสามารถลดผลของกระแสไหลตัดได้ เช่นงานวิจัยของ New และคณะ [20] ที่ออกแบบให้ออร์ริฟิสเป็นแบบวงรี และวิจัยของ Seifer และ Shemer [19] ที่ออกแบบปากทางออกเจ็ทให้มีลักษณะวงกลมยาว ซึ่งงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะออกแบบให้ออร์ริฟิสมีลักษณะวงกลมยาวสำหรับใช้ในกรณีของเจ็ทแบบกลุ่ม เพื่อลดผลของกระแสไหลตัดและเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของมุมปะทะระหว่างกระแสไหลตัดและเจ็ทแบบวงกลมยาว

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของรูปร่างปากทางออกเจ็ท ลักษณะการจัดเรียงของเจ็ท มุมปะทะระหว่างเจ็ทและกระแสไหลตัดที่มีต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทบนพื้นผิว
2. ศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน เมื่อใช้เจ็ทที่มีหน้าตัดเป็นวงกลมยาว แทนเจ็ทหน้าตัดแบบวงกลม

#### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของอัตราส่วนความกว้างต่อความสูง (Aspect ratio, AR) ของปากทางออกเจ็ทแบบวงกลมยาวกรณี  $AR=4$  และ  $8$  โดยกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดทางออกเจ็ทคงที่และเปลี่ยนแปลงความกว้างและความสูงของปากทางออกเจ็ทและเปรียบเทียบกับกรณีของเจ็ทหน้าตัดกลม  $AR=1$
2. ศึกษากรณีที่เจ็ทจากปากทางออกพุ่งชนตั้งฉากกับผนังด้านตรงข้ามภายในช่องลมหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า และกำหนดให้ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทหน้าตัดกลม
3. ศึกษากรณีเจ็ทกลุ่มจำนวนกว้างคูณยาว  $4 \times 6$  ลำ จัดเรียงเป็นแบบแถวเดียวกัน (Inline arrangement) และเรียงแบบเยื้องกัน (Staggered arrangement)
4. กำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ทคงที่ทุกการทดลอง สำหรับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เทียบเท่าที่กำหนดให้เท่ากับ  $Re_e=13,400$  (คิดจากความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกเจ็ทและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า)

5. ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตัล (Thermal liquid crystal sheet)
6. ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวโดยใช้วิธีฟิล์มน้ำมัน (Oil film)
7. ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมกรไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหน้าตัดวงกลมยาว
2. สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบระบบหรืออุปกรณ์การให้ความร้อนหรือระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะกับการใช้งาน เช่น การให้ความร้อนหรือระบายความร้อนในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นโลหะ การระบายความร้อนของใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และทำเตาอบแบบใช้เจ็ทอากาศร้อน

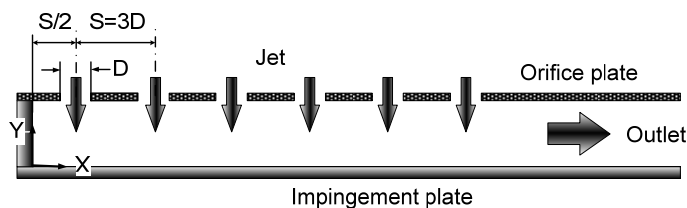
## บทที่ 2

### ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย

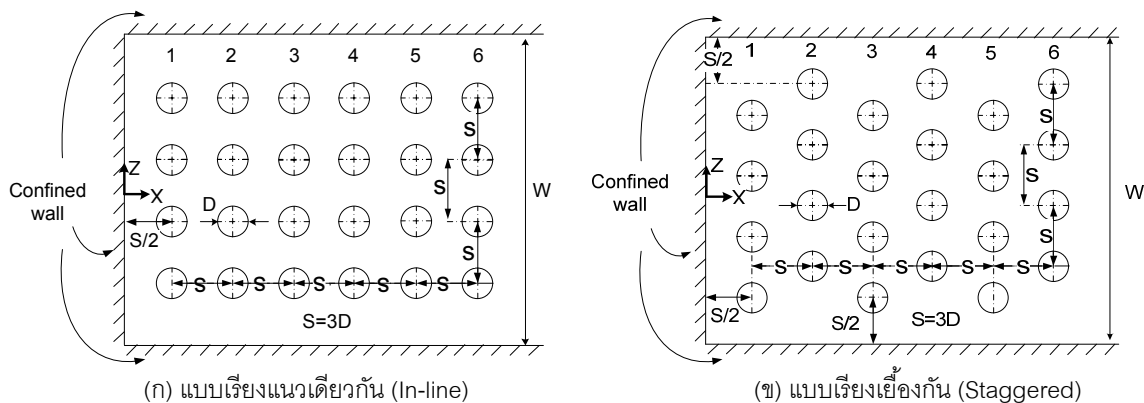
ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับโมเดลการทดลอง วิธีการทดลองและเงื่อนไขการทดลอง สำหรับการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนด้วยแผ่นเทอร์โมลิตวิด คริสตัลและการศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน

#### 2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 2.1 แสดงโมเดลที่ใช้ในการทดลอง จากรูปเจ็ทที่ไหลออกจากรูบนแผ่นออริฟิฟพุ่งชนผนังด้านตรงข้ามในแนวตั้งฉาก โดยเจ็ทหลังจากที่พุ่งชนพื้นผิวจะไหลรวมตัวเป็นกระแสไหลตัด (Crossflow) และไหลออกทางช่องที่ได้กำหนด สำหรับรูปแบบการจัดเรียงของกลุ่มเจ็ทแบ่งเป็นสองลักษณะคือ แบบเรียงแนวเดียวกัน (Inline) และแบบเรียงเยื้องกัน (Staggered) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.2 สำหรับระบบพิกัดที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ Cartesian coordinates โดยที่แกน X อยู่ในแนวของกระแสไหลตัด แกน Y อยู่ในแนวตั้งฉากกับผนังที่เจ็ทพุ่งชน และแกน Z อยู่ในแนวของตั้งฉากกับแนวการไหลของกระแสไหลตัด



รูปที่ 2.1 แสดงโมเดลที่ใช้ในการทดลอง



(น) แบบเรียงแนวเดียวกัน (In-line)

(ข) แบบเรียงเยื้องกัน (Staggered)

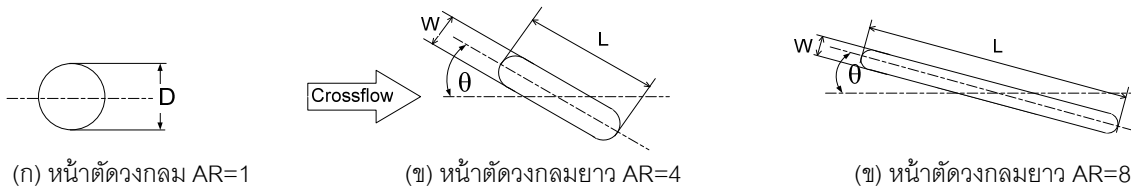
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการจัดเรียงของเจ็ทกลุ่ม 4 x 6 แถว ( $D=13.2 \text{ mm}$ ,  $W=180 \text{ mm}$ )

#### สำหรับเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. ลักษณะของออริฟิฟเป็นแบบขอบตรง (Square edge) มีความหนา 2 mm โดยมีรูปร่างของปากทางออกเจ็ทแต่ละแบบกำหนดให้มีขนาดของพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ( $137 \text{ mm}^2$ ) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.3 แบบแรกหน้าตัดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D=13.2 \text{ mm}$  แบบที่สองหน้าตัดวงกลมยาว (Elongated) โดยที่อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว



AR=4 และ 8 โดยกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า  $D_E=13.2$  mm สำหรับรายละเอียดของความกว้างและความยาวของออริฟิสแสดงในตารางที่ 2.1 ในการกำหนดตัวแปรอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของออริฟิสแบบวงกลมยาวใช้ในการศึกษาขั้นเบื้องต้น เนื่องจากยังไม่มีการวิจัยที่ใช้ออริฟิสลักษณะดังกล่าวนี้ใช้ในกรณีเจ็ทพุ่งชน



รูปที่ 2.3 แสดงรายละเอียดรูปร่างของออริฟิส

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดของออริฟิส

|      | L (mm) | W (mm) | A (mm <sup>2</sup> ) | $D_E$ (mm) |
|------|--------|--------|----------------------|------------|
| AR=1 | 13.2   | 13.2   | 136.85               | 13.2       |
| AR=4 | 24     | 6      | 136.27               | 13.2       |
| AR=8 | 33.6   | 4.2    | 137.33               | 13.2       |

2. ในการจัดเรียงของเจ็ทมีสองลักษณะ (1) แบบเรียงแนวเดียวกัน (inline) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.2 (ก) และ (2) แบบเรียงเยื้องกัน Staggered ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.2 (ข) สำหรับระยะห่างระหว่างเจ็ทตามแนวการไหลและแนวตั้งฉากกับการไหลของกระแสไหลตัดมีค่าเท่ากันที่ความยาว 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ทหน้าตัดกลม ( $S=3D$ ) [ 24, 25]

3. มุมปะทะระหว่างเจ็ทและกระแสไหลตัดกรณีของเจ็ทหน้าตัดกลมยาวกำหนดให้อยู่ในช่วง  $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  และ  $45^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในการกำหนดตัวแปรมุมปะทะครั้งนี้ใช้ในการศึกษาขั้นเบื้องต้น

4. ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกำหนดให้คงที่  $H=2D_E$  [24, 25]

ตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

|                                      | Array (4x6) of jet |   |
|--------------------------------------|--------------------|---|
| Round jet<br>(Diameter, $D=13.2$ mm) | Inline             | $\theta=0^\circ$                                      |
|                                      | Staggered          | $\theta = 0^\circ$                                    |
| Elongated jet<br>Aspect ratio, AR=4  | Inline             | $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ and $45^\circ$ |
|                                      | Staggered          | $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ and $45^\circ$ |
| Elongated jet<br>Aspect ratio, AR=8  | Inline             | $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ and $45^\circ$ |
|                                      | Staggered          | $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ and $45^\circ$ |
| Jet-to-jet distance                  | $S=3D_E$           |   |
| Jet-to-plate distance                | $H=2D_E$           |   |
| Reynolds number                      | 13,400             |   |

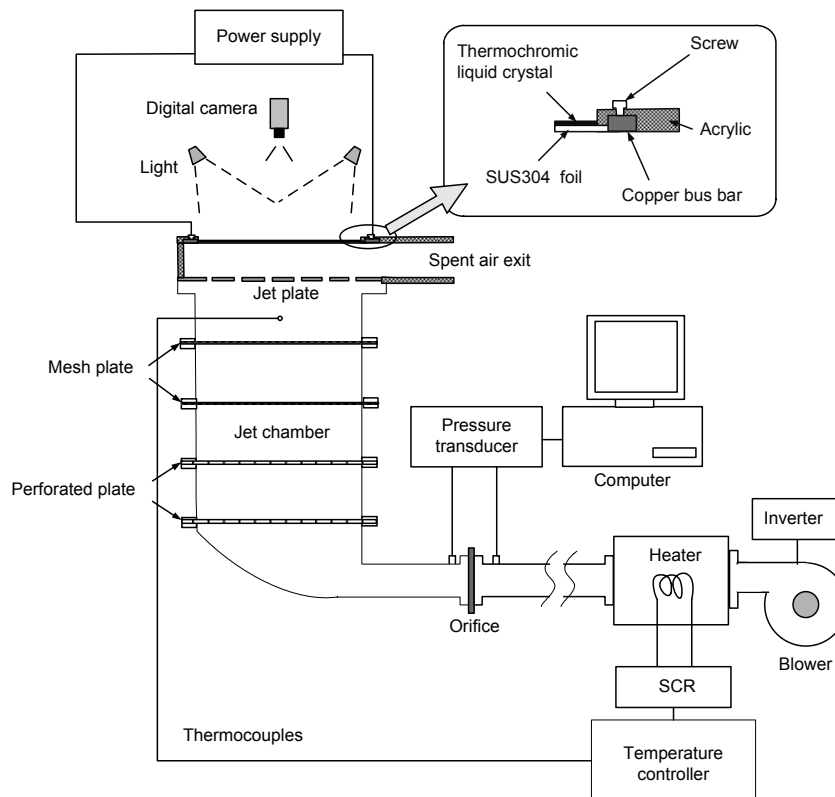
ตารางที่ 2.2 แสดงตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ในทุกการทดลองจะควบคุมผลต่างอุณหภูมิของเจ็ทและอุณหภูมิห้องไม่เกิน  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เทียบได้กำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ท  $AR=4$  และ 8 เท่ากับอัตราการไหลของเจ็ท  $AR=1$  โดยค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เทียบหาได้จากสมการ

$$Re_E = \frac{D_E \bar{V}_j}{\nu} \quad (2.1)$$

โดยที่  $D_E$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของออริฟิส  
 $\bar{V}_j$  คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกเจ็ท  
 $\nu$  คือ ความหนืดจลน์ของเจ็ท

ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดให้เรย์โนลด์นัมเบอร์เทียบเท่า  $Re_E=13,400$  เนื่องจากเป็นช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่หลายๆงานวิจัยใช้ในการศึกษาและสามารถนำไปออกแบบใช้ในจริงงานได้ [25-27]

## 2.2 รายละเอียดของชุดทดลอง

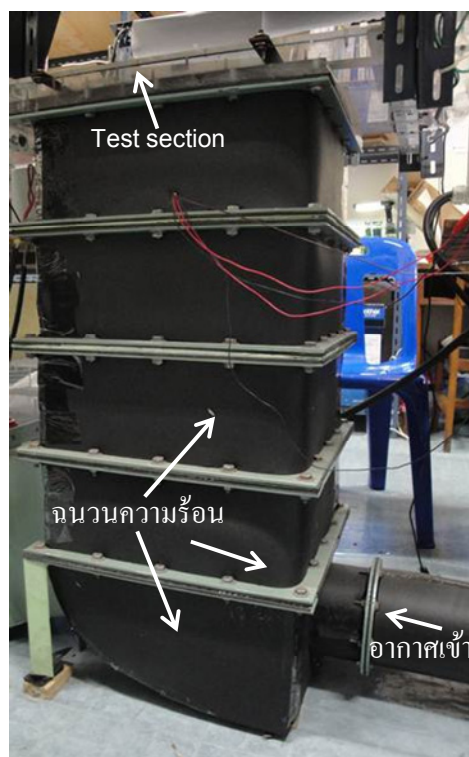


รูปที่ 2.4 แสดงแผนผังของชุดทดลอง

รูปที่ 2.4 แสดงแผนผังของชุดทดลอง ชุดทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ชุดสร้างกระแสเจ็ทและส่วน Test section

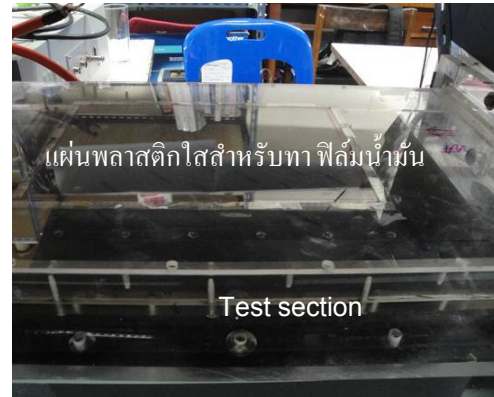
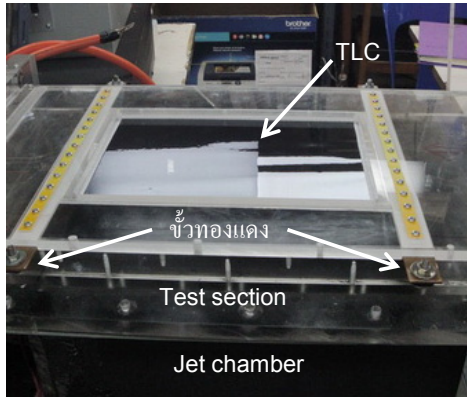
สำหรับส่วนที่ใช้ในการสร้างกระแสเจ็ทประกอบด้วยโบลเวอร์ขนาด 3 แรงม้า ดูดอากาศจากในห้องทดลองที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องปรับอากาศ และผ่านห้องควบคุมอุณหภูมิที่ติดตั้งฮีตเตอร์ที่ต่อเข้ากับชุดควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นอากาศจะไหลผ่านออริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหลและเข้าสู่ห้องกักอากาศ (Chamber) โดยห้องกักอากาศถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่เพียงพอ (หน้าตัด  $30 \times 36 \text{ cm}^2$  สูง 86 cm) สำหรับห้องกักอากาศแบ่งออกเป็น 5 ชั้นตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.5 โดยระหว่างแต่ละชั้นได้ติดตั้งแผ่นเหล็กตะแกรงและตาข่ายมุ้งลวด เพื่อให้ความเร็วของเจ็ทแต่ละรูใกล้เคียงกัน

ในการควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทได้ใช้ฮีตเตอร์ที่มีกำลัง 2 kW ที่ให้ความร้อนกับอากาศ สำหรับการควบคุมอัตราการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ฮีตเตอร์ได้ใช้ Temperature controller และ Power controller (SCR) เพื่อให้อุณหภูมิของเจ็ทคงที่ตลอดการทดลอง สำหรับความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $\pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งในการทดลองได้ทำการควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทที่  $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับชุดทดลองทั้งหมดได้ติดตั้งเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและทำให้การควบคุมอุณหภูมิเจ็ทคงที่มากขึ้น



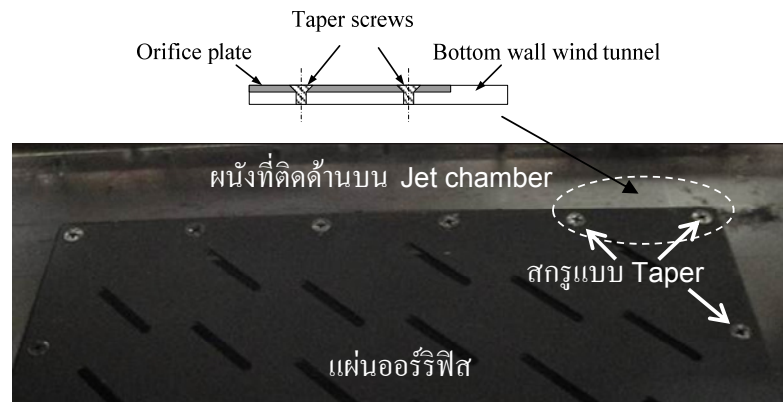
รูปที่ 2.5 แสดงภาพถ่ายของชุดห้องพักอากาศและด้านบนเป็น Test section

ในส่วนของ Test section ได้ติดตั้งด้านบนของห้องกักอากาศตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.5 จากรูป Test section ทำมาจากแผ่นพลาสติกใสที่มีขนาดความหนา 10 mm มีความสูงมีค่าเป็นสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกเจ็ทแบบกลม ( $H=2D_E=26.4 \text{ mm}$ ) โดยผนังที่ใช้สำหรับวัดการกระจายสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้ออกแบบให้สามารถถอดประกอบเพื่อง่ายในการติดตั้งแผ่นออริฟิส และออกแบบให้สามารถเปลี่ยนเป็นผนังที่ใช้สำหรับศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมันตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.6

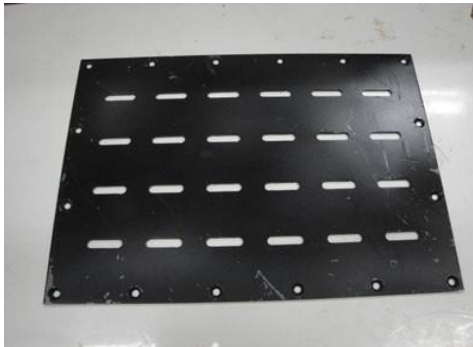
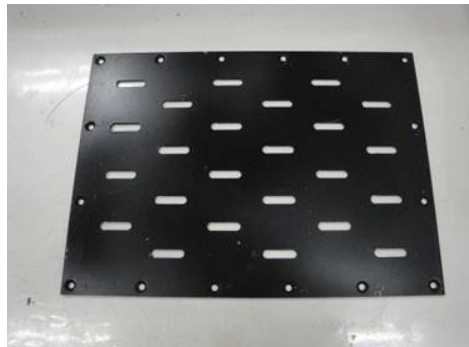
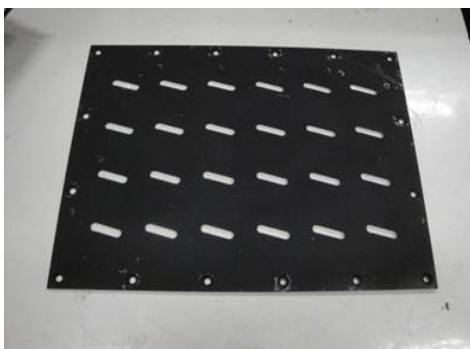
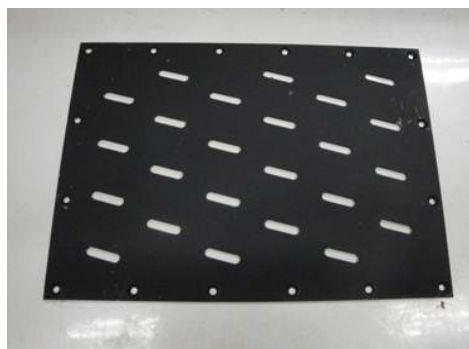
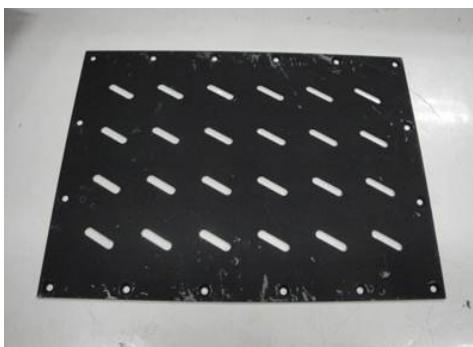
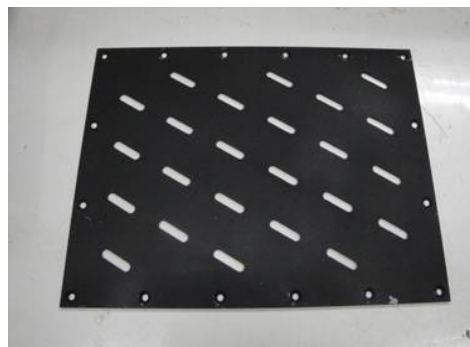


(ก) ผนังสำหรับวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (ข) ผนังสำหรับศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวด้วยฟิล์มน้ำมัน  
รูปที่ 2.6 แสดงการติดตั้งแผ่นสำหรับวัดการกระจายสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

รูปที่ 2.7 แสดงการติดตั้งแผ่นออริฟิสเข้ากับผนังด้านล่างของชุด Test section ในการติดตั้งแผ่นออริฟิสได้ทำการเจาะร่องผนังด้านล่างของชุด Test section ให้มีความหนา กว้างและยาวใกล้เคียงกับขนาดของแผ่นออริฟิส เพื่อให้สามารถติดตั้งแผ่นออริฟิสได้เรียบเสมอกับพื้นผิวผนังของชุด Test section ในการจับยึดแผ่นออริฟิสได้ใช้สกรูแบบเทเปอร์ (Taper screw) ซึ่งสามารถฝังหัวสกรูให้เรียบเสมอกับพื้นผิวของแผ่นออริฟิสตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.7 เพื่อไม่ให้เกิดการไหลภายในชุด Test section รูปที่ 2.8 แสดงแผ่นเจ็ทที่เป็นแบบวงกลมยาวที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง  $AR=4$  ในการเจาะรูเจ็ทได้ใช้เครื่อง CNC เพื่อให้ลักษณะการจัดเรียงและมุมของรูเจ็ทคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด



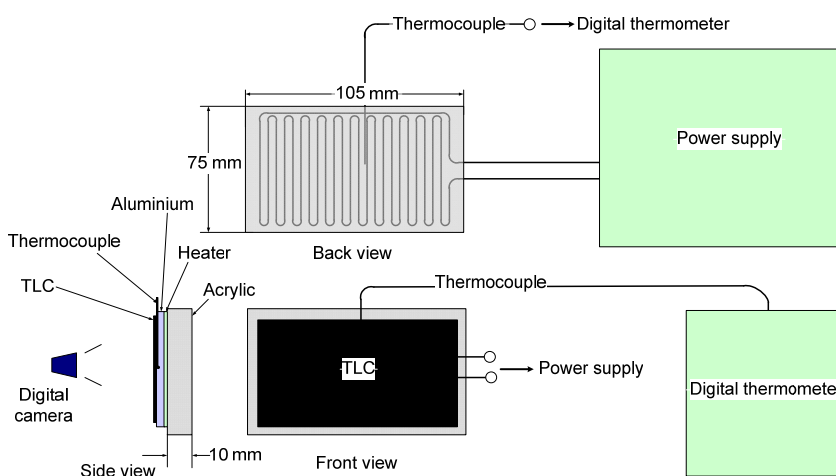
รูปที่ 2.7 แสดงการติดตั้งแผ่นเจ็ทเข้ากับผนังด้านล่างของอุโมงค์ลม

(ก)  $AR=4$ ,  $\theta = 0^\circ$ , Inline arrangement(ข)  $AR=4$ ,  $\theta = 0^\circ$ , Staggered arrangement(ค)  $AR=4$ ,  $\theta = 15^\circ$ , Inline arrangement(ง)  $AR=4$ ,  $\theta = 15^\circ$ , Staggered arrangement(จ)  $AR=4$ ,  $\theta = 30^\circ$ , Inline arrangement(ฉ)  $AR=4$ ,  $\theta = 30^\circ$ , Staggered arrangement(ช)  $AR=4$ ,  $\theta = 45^\circ$ , Inline arrangement(ซ)  $AR=4$ ,  $\theta = 45^\circ$ , Staggered arrangement

รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะแผ่นเจ็ทแบบรูวงกลมยาวที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง  $AR=4$

### 2.3 การสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

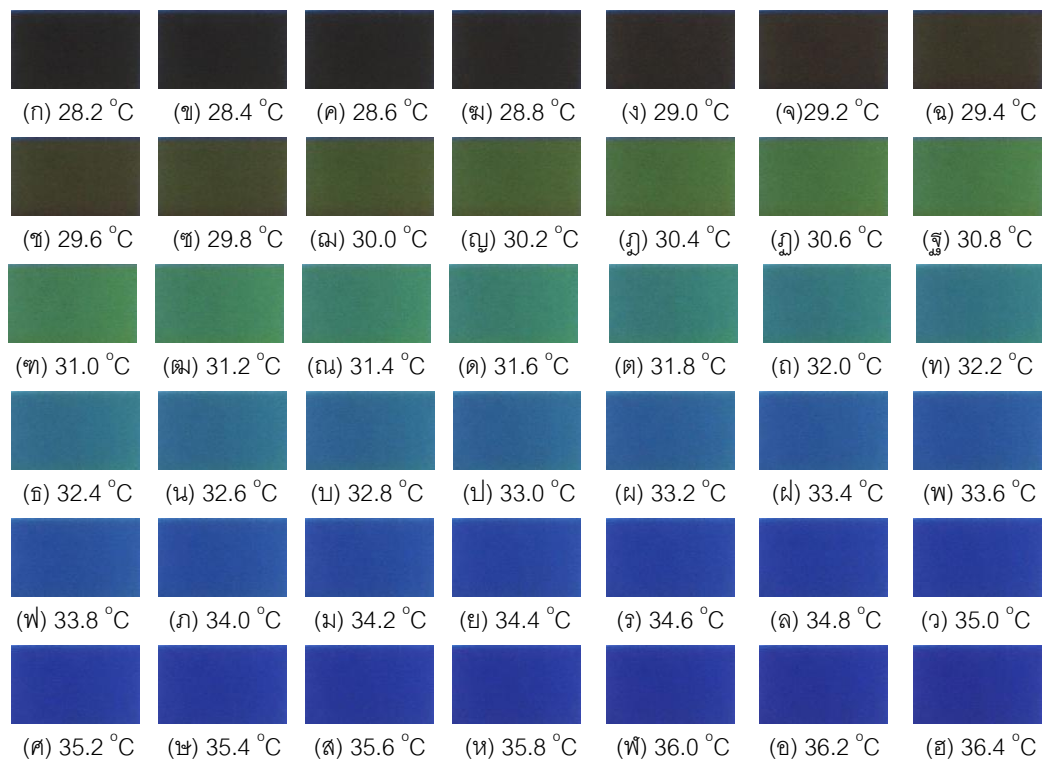
ในการใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว จำเป็นที่จะต้องทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลก่อนใช้งาน รูปที่ 2.9 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบสี โดยมีแผ่นฮีตเตอร์ติดบนแผ่นพลาสติกใสมีขนาดความกว้าง 75 mm ยาว 105 mm และหนา 10 mm ขั้วของฮีตเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ ส่วนด้านหน้าของฮีตเตอร์จะติดแผ่นอะลูมิเนียมบางซึ่งมีหน้าที่รับความร้อนจากฮีตเตอร์และกระจายความร้อนให้ทั่วทั้งแผ่นและด้านหน้าของแผ่นอะลูมิเนียมจะติดแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่มีขนาดความกว้าง 47 mm ยาว 70 mm เพื่อแสดงสีที่อุณหภูมิต่างๆ ส่วนด้านหน้าของชุดทดลองจะติดตั้งกล้องดิจิทัลเพื่อทำการบันทึกภาพการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล สำหรับแผ่นอะลูมิเนียมด้านที่ติดแผ่น TLC ได้เจาะร่องสำหรับติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ ในการสอบเทียบสีนั้นได้กำหนดเงื่อนไขให้เหมือนกับสภาวะในการทดลองจริง เช่น การให้แสงและระยะห่างของกล้องบันทึกภาพ ในการสอบเทียบสีแต่ละครั้งจะกำหนดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 28–38°C ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลไม่แสดงสีจนถึงแสดงสีน้ำเงินเข้ม



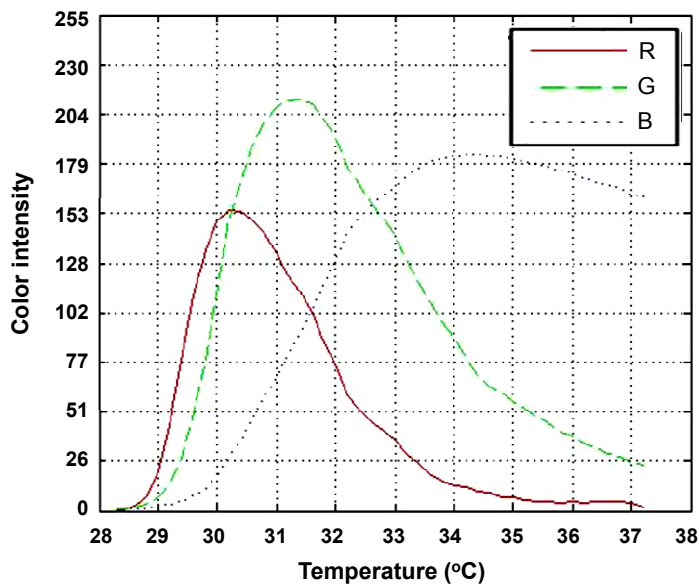
รูปที่ 2.9 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

สำหรับขั้นตอนในการสอบเทียบสีนั้นได้จัดอุปกรณ์ให้อยู่ในสภาพเดียวกับการทดลองจากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิบนแผ่นอะลูมิเนียมเท่ากับ 40°C ซึ่งแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลจะแสดงสีน้ำเงินเข้ม จากนั้นรอให้อุณหภูมิบนแผ่นอะลูมิเนียมมีค่าคงที่ จึงทำการบันทึกภาพแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.10 (ฮ) และทำซ้ำลักษณะเดียวกันโดยลดอุณหภูมิบนแผ่นอะลูมิเนียมลงครั้งละ 0.2 °C จนถึงอุณหภูมิที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลไม่แสดงสี (สีดำ) โดยรูปที่ 2.10 แสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ได้จากการสอบเทียบอุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 2.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อนำภาพทั้งหมดที่ได้จากการสอบเทียบแต่ละภาพนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสีและอุณหภูมิโดยโปรแกรมที่พัฒนาในซอฟต์แวร์ MATLAB ในแต่ละภาพที่บันทึกจะถูกตัดให้มีขนาด 53x104 Pixel แล้วแยกองค์ประกอบสีของแต่ละจุดภาพให้เป็น 3 ภาพคือ ภาพที่แสดงองค์ประกอบสีแดง R, ภาพที่แสดงองค์ประกอบสีเขียว G, ภาพที่แสดงองค์ประกอบสีน้ำเงิน B จากนั้น นำค่าระดับสี (0-255, 8 บิต) ของทุก Pixel ภายในภาพแสดงองค์ประกอบแต่ละสีมาหาค่าเฉลี่ย ก็จะได้ข้อมูลค่า R, G, B เฉลี่ยที่อุณหภูมินั้นๆ



รูปที่ 2.10 แสดงสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 2.11 แสดงผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสี R, G, B และอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ใช้ในการทดลองนี้

รูปที่ 2.11 แสดงผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสี R, G, B และอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัลที่ใช้ในการทดลองนี้ ซึ่งหากต้องการใช้ข้อมูลสี R, G, B ในการสร้างสมการหาความสัมพันธ์แล้ว จำเป็นต้องสร้างสมการของข้อมูลสีที่ซับซ้อน ในงานวิจัยนี้จึงแปลงข้อมูลสีระบบ R, G, B เป็นข้อมูลสีระบบ H, S, I ตามสมการต่อไปนี้

$$H = \begin{cases} \frac{1}{360} \left[ 90 - \arctan\left(\frac{F}{\sqrt{3}}\right) \right] & \text{For } G > B \\ \frac{1}{360} \left[ 90 - \arctan\left(\frac{F}{\sqrt{3}}\right) + 180 \right] & \text{For } G < B \end{cases} \quad (2.2)$$

$$F = \frac{2R - G - B}{G - B} \quad \text{For } G \neq B$$

$$F = R \quad \text{For } G = B$$

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (2.3)$$

$$S = 1 - \left[ \frac{\min(R, G, B)}{I} \right] \quad (2.4)$$

|          |   |   |
|----------|---|---|
| ในที่นี้ | R | คือ ความเข้มขององค์ประกอบสีแดงในภาพ     |
|          | G | คือ ความเข้มขององค์ประกอบสีเขียวในภาพ   |
|          | B | คือ ความเข้มขององค์ประกอบสีน้ำเงินในภาพ |
|          | H | คือ แสดงค่าเฉดสีในภาพ                   |
|          | S | คือ แสดงค่าการอิ่มตัวของสีในภาพ         |
|          | I | คือ แสดงค่าความมืดความสว่างของสีในภาพ   |

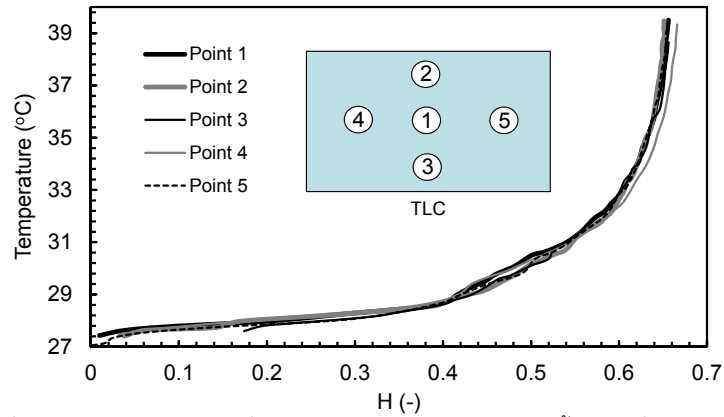
จากสมการที่ (2.2) - (2.3) ค่าความเข้มขององค์ประกอบสี R, G, B ในแต่ละภาพสามารถแปลงเป็นข้อมูลสี H, S, I โดยใช้โปรแกรม MATLAB ตามที่ได้แสดงในภาคผนวก ก. รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตัวประกอบเฉดสี H โดยให้แกนนอนแสดงค่าเฉดสีและแกนตั้งแสดงค่าอุณหภูมิ ในรูปแสดงผลการสอบเทียบ 5 ตำแหน่งบนแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัลที่ใช้ทดลองจริง จากรูปค่าเฉดสี H มีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถใช้ข้อมูลของทั้ง 5 ตำแหน่งในการสร้างเส้นสมการสำหรับทำนายอุณหภูมิได้ดังนี้

$$T = 60.146H^3 - 35.224H^2 + 8.5288H + 27.16 \quad 27^\circ\text{C} < T < 33^\circ\text{C} \quad (0.00 < H < 0.58) \quad (2.5)$$

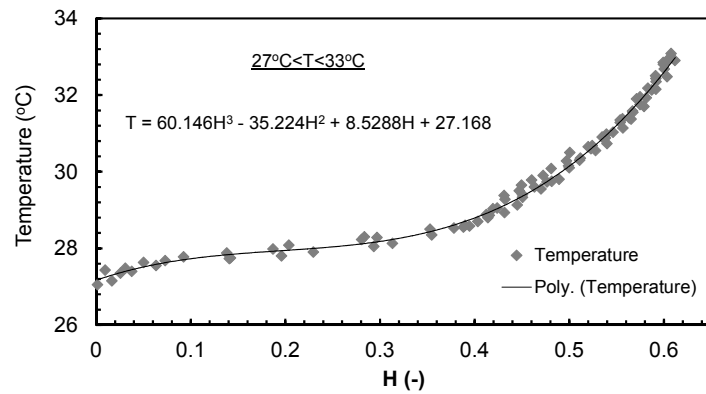
$$T = 91158H^4 - 209333H^3 + 180380H^2 - 69093H + 9953.9 \quad 33^\circ\text{C} < T < 39^\circ\text{C} \quad (0.58 < H < 0.65) \quad (2.6)$$

รูปที่ 2.13 แสดงเส้นของสมการทำนายอุณหภูมิที่สร้างขึ้นเทียบกับจุดข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบทั้ง 5 ตำแหน่ง โดยรูปที่ 2.13 (ก) และ (ข) แสดงเส้นสมการสามารถใช้ทำนายอุณหภูมิที่อยู่ในช่วง  $27^\circ\text{C} < T < 33^\circ\text{C}$  และ  $33^\circ\text{C} < T < 39^\circ\text{C}$  ตามลำดับ

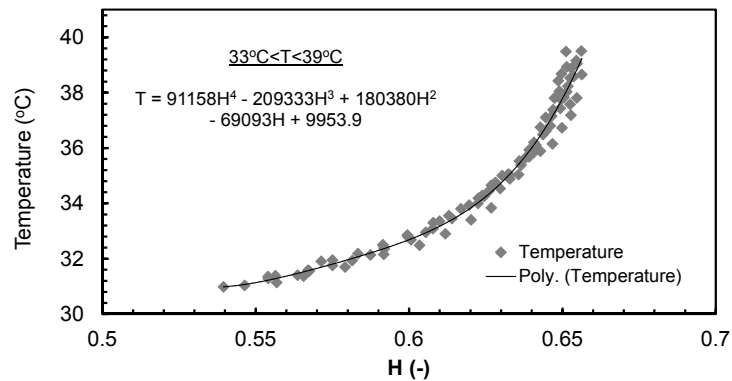




รูปที่ 2.12 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงเจดสีเทียบกับอุณหภูมิทั้งห้าจุดที่สอบเทียบสี



(น)  $27^{\circ}\text{C} < T < 33^{\circ}\text{C}$



(ข)  $33^{\circ}\text{C} < T < 39^{\circ}\text{C}$

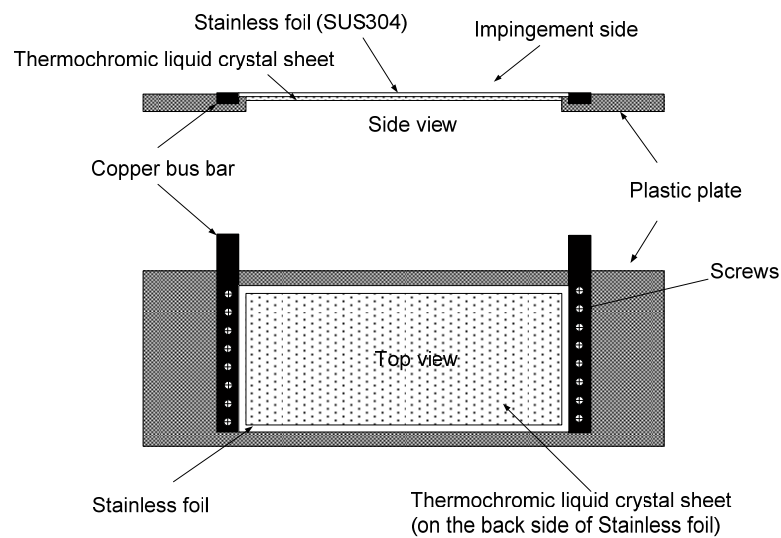
รูปที่ 2.13 แสดงเส้นของสมการที่ใช้ทำนายอุณหภูมิเทียบกับจุดข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบทั้งห้าบริเวณ

#### 2.4 วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ 2.14 แสดงรายละเอียดของแผ่นสำหรับวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสำหรับใช้เป็นพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน แผ่นที่ใช้สำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวทำมาจากแผ่นพลาสติกที่มีความหนา 10 mm โดยตรงกลางแผ่นพลาสติกได้ทำการเจาะรูเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 180 mm x 270 mm จากนั้นจะทำการซิงแผ่นสแตนเลสบางที่มี

ความหนา 0.03 mm ให้เรียบและตั้งด้วยแท่งทองแดงทั้งสองข้างเพื่อเป็นขั้วสำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแผ่นสแตนเลสบาง ในการทดลองจะจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแท่งทองแดงเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านแผ่นสแตนเลสได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว จากนั้นจะทำการวัดกระแสไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้าเพื่อที่จะคำนวณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลสซึ่งสามารถคำนวณหาฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว

สำหรับการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวได้ใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล (TLC) ติดบนแผ่นสแตนเลสตรงข้ามกับด้านที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่จะเลือกใช้มีคุณสมบัติในการแสดงการเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดง สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ก่อนใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลจะต้องทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏก่อนใช้วัดอุณหภูมิตามหัวข้อ 2.3 ในการสอบเทียบอุณหภูมิจะใช้กล้องดิจิทัลฉบับที่ภาพสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆและใช้วิธีการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามที่จะได้กล่าวต่อไป



รูปที่ 2.14 แสดงรายละเอียดของผนังสำหรับวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

สำหรับอัตราการเกิดความร้อนบนแผ่นสแตนเลสสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{input} = I^2 \cdot R \quad (2.7)$$

ในที่นี้  $I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส

$R$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส

และใช้เจ็ทที่มีอุณหภูมิประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวแผ่นสแตนเลสเพื่อทำการระบายความร้อน โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิว ( $h$ ) ได้จากสมการ

$$h = \frac{\dot{Q}_{input} - \dot{Q}_{losses}}{A(T_w - T_j)} \quad (2.8)$$

- โดยที่  $\dot{Q}_{input}$  คือ อัตราการเกิดความร้อนบนแผ่นสแตนเลส  
 $\dot{Q}_{losses}$  คือ อัตราการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีและการพาความร้อนแบบธรรมชาติบนผนังด้านหลังของแผ่นสแตนเลสที่ติดแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตัล  
 $A$  คือ พื้นที่ของแผ่นสแตนเลส  
 $T_w$  คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวที่วัดจากแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตัล  
 $T_j$  คือ อุณหภูมิของเจ็ทในห้องพักอากาศ

จากสมการ 2.8 สามารถคำนวณให้อยู่ในรูปต่อพื้นที่การถ่ายเทความร้อนจะได้

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_r - \dot{q}_c}{T_w - T_j} \quad (2.9)$$

โดยที่  $\dot{q}_r = \sigma \varepsilon_{ILC} (\bar{T}_w - T_s)$  และ  $\dot{q}_c = \bar{h}_c (\bar{T}_w - T_s)$  คืออัตราการสูญเสียความร้อนที่ถ่ายโอนไปยังสิ่งแวดล้อมโดยการแผ่รังสีและการพาความร้อนตามลำดับ สำหรับ  $\sigma$  คือค่าคงที่ Stefan-Boltzman,  $\varepsilon_{ILC}$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีความร้อนของแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตัลติด ( $\varepsilon_{ILC}=0.9$ ) [5],  $\bar{T}_w$  คืออุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิว  $T_s$  คืออุณหภูมิโดยรอบในห้องทดลอง และ  $\bar{h}_c$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยบนแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตัลติดสู่อากาศรอบๆ [22] จากสมการ (2.9) สามารถคำนวณหาค่าตัวเลขได้จากรูปที่ 2.9

$$Nu = \frac{hD_E}{k} \quad (2.10)$$

ในที่นี้  $D_E$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของปากทางออกเจ็ท และ  $k$  คือค่าการนำความร้อนของอากาศ สำหรับค่าตัวเลขที่ได้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}D_E}{k} \quad (2.11)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย  $\bar{h}$  สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.9) โดยการแทนค่าอุณหภูมิเฉพาะจุด  $T_w$  เป็นอุณหภูมิเฉลี่ย  $\bar{T}_w$

## 2.5 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

ในการหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนหรือค่าตัวเลขบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน สามารถทำได้โดยนำรูปที่ได้จากการถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตัล มาวิเคราะห์ประมวลผลโดยใช้โปรแกรมที่เขียนในซอฟต์แวร์ MATLAB ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพมีรายละเอียดดังนี้

- (1) เลือกรูปการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตัลที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนคงที่ค่าหนึ่ง โดยภายในรูปต้องแสดงสีในช่วงอุณหภูมิ  $27^\circ C \leq T \leq 39^\circ C$

- (2) โหลดไฟล์รูปถ่ายของแผ่นเทอร์โมลิตวูดคริสตัลที่ต้องการวิเคราะห์เข้าสู่โปรแกรม MATLAB
- (3) ตัดรูปให้เหลือเฉพาะส่วนที่ต้องการวิเคราะห์
- (4) นำรูปมาทำการแยกองค์ประกอบของสี R, G, B และเปลี่ยนข้อมูลสีเป็นระบบ H, S, I
- (5) แทนค่าเจดสี H ของแต่ละจุดภาพในสมการทำนายอุณหภูมิ (สมการ (2.5) และ (2.6)) เพื่อหาข้อมูลการกระจายอุณหภูมิของแต่ละจุดภาพ
- (6) ใช้ข้อมูลการกระจายอุณหภูมิตั้งบนพื้นผิว คำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยใช้สมการ (2.9) และ คำนวณหาค่านัสเซิลตันัมเบอร์ที่กระจายทั่วทั้งพื้นผิวที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการ (2.10)

## 2.6 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยเทคนิคฟิล์มน้ำมัน

สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยเทคนิคฟิล์มน้ำมัน ได้นำชุดทดลองเดิมที่ใช้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว โดยเปลี่ยนแผ่นที่เจ็ทพุ่งชนซึ่งจากเดิมเป็นแผ่นสเตนเลสบางมาใช้เป็นแผ่นพลาสติกใสตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.6

ในการทดลองได้นำแผ่นพลาสติกใสด้านที่เจ็ทพุ่งชนทาด้วยน้ำมันสีขาวที่มีส่วนผสมของพาราฟินแบบเหลว ผงไททาเนียมไดออกไซด์และกรดโอล์กเป็นฟิล์มบางๆทั่วทั้งพื้นผิว จากนั้นจึงนำแผ่นพลาสติกใสมาติดตั้งเข้ากับชุดทดลองเป็นระนาบที่เจ็ทพุ่งชน หลังจากที่เจ็ทเริ่มไหลพุ่งชนฟิล์มน้ำมันก็จะทำการบันทึกภาพการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวจากด้านหลังของแผ่นพลาสติกใส โดยใช้กล้องดิจิทัลบันทึกการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันที่เวลาต่างๆ ซึ่งจากการไหลของฟิล์มน้ำมันบนแผ่นพลาสติกใสจะทำให้สามารถสังเกตการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวได้

### บทที่ 3

## การจำลองการไหลของเจ็ทกลุ่มที่พุ่งชนพื้นผิวด้วยโปรแกรมคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล

ในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการจำลองการไหล ได้แก่ สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองการไหล การจำลองการไหลแบบปั่นป่วน โมเดลการจำลองการไหล วิธีการและขั้นตอนการใช้โปรแกรมจำลองการไหล และเงื่อนไขที่กำหนดในการจำลองการไหล เพื่อใช้อธิบายถึงลักษณะการไหลของกลุ่มเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม ANSYS V12.0 และใช้โปรแกรมย่อย FLUENT

### 3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) คือการใช้คอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหาพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมอย่างกว้างขวางสำหรับนักออกแบบ วิศวกรและนักวิจัยที่จำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ของการไหล เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถช่วยลดระยะเวลาและงบประมาณเมื่อเทียบกับการศึกษาด้วยวิธีเชิงทดลอง

#### 3.1.1 สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์

การไหลของของไหลโดยทั่วไปอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ค่อนข้างซับซ้อน อย่างไรก็ตามสามารถแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) และใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ สำหรับหลักการแก้ปัญหาพลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีเชิงตัวเลขจะนิยมใช้หลักการคำนวณแบบปริมาตรควบคุม (Control volume) ซึ่งเป็นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของของไหลที่พื้นผิวเข้า-ออกของปริมาตรควบคุมแต่ละด้านโดยใช้สมการควบคุม (Governing equations) ในกรณีที่ไม่คิดการแลกเปลี่ยนความร้อน สมการควบคุมประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์มวลและสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม

#### สมการเชิงอนุพันธ์มวล

สมการเชิงอนุพันธ์มวล (Conservation of mass) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่อธิบายการไม่สูญหายของมวล เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สมการต่อเนื่อง (Continuity) โดยที่ตัวแปรเหล่านั้นจะเปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดโดเมนของการไหล ซึ่งเขียนเป็นสมการในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.1)$$

โดยที่  $\vec{V}$  คือ เวกเตอร์ความเร็ว,  $\rho$  คือความหนาแน่นของของไหล และ  $t$  คือ เวลา

สำหรับเทอมแรกด้านซ้ายของสมการคืออัตราการเปลี่ยนแปลงมวลภายในต่อหน่วยปริมาตร ส่วนเทอมที่สองคือการไหลเข้าออกของมวลต่อหน่วยปริมาตร ถ้าเป็นการไหลที่ไม่อัดตัว (Incompressible flow) ความหนาแน่น ( $\rho$ ) จะคงที่ ดังนั้นสมการ (4.1) ลดรูปเหลือ

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.2)$$

### สมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัม

สมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) เป็นสมการที่อธิบายจากการเคลื่อนที่ของของไหลที่ได้มาจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second law) ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับความเร่ง เขียนเป็นสมการโมเมนตัมในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \Delta \vec{V} \right) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \tau_{ij} + \rho \vec{g} \quad (3.3)$$

โดยที่  $\tau_{ij}$  คือความเค้นเนื่องจากความหนืด (Viscous stresses)

สมการ (3.3) เขียนในรูปแบบอนุรักษ์ (Conservation form) อธิบายได้ว่าผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมต้องเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม (อัตราการไหลเข้าออกสุทธิของโมเมนตัม) งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมุติฐานว่าของไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) จึงนำกฎความเสียดทานของ สโตกส์ (Stokes's law) ซึ่งความเค้นเนื่องจากความหนืด (Viscous stresses) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความเครียด (Strain rates) และสัมประสิทธิ์ความหนืด (Viscosity coefficient) จะเรียกสมการที่ได้ชื่อว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation)

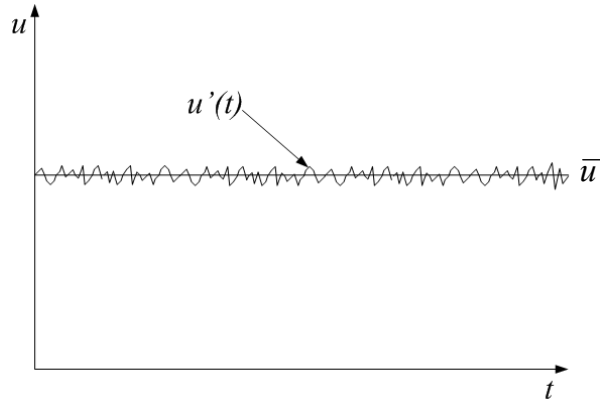
$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \Delta \vec{V} \right) = -\vec{\nabla} p + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho \vec{g} \quad (3.4)$$

โดยที่  $p$  คือความดันสถิต,  $\mu$  คือสัมประสิทธิ์ความหนืดของของไหล และ  $\vec{g}$  คือค่าความเร่งของแรงโน้มถ่วง

สมการที่กล่าวมานี้รวมทั้งสมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการที่หาผลเฉลยยากทางคณิตศาสตร์ ไม่ว่าจะเขียนระบบสมการย่อยเหล่านี้ในรูปแบบใดก็ตาม เนื่องจากเป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Coupled partial differential equations) ผลลัพธ์ที่หาได้ เช่น  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$  ต้องสอดคล้อง (Satisfy) กันทั้งระบบสมการ และความยากอีกส่วนหนึ่งคือ สมการเหล่านี้อยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear equations) เป็นการยากที่จะหาผลเฉลยแม่นยำตรงถึงแม้ว่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) และลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของปัญหาจะง่ายก็ตาม จึงทำให้มีวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) และใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

#### 3.1.2 สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลที่ของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีความเร็วไม่สม่ำเสมอและมีทิศทางการเคลื่อนที่ไม่แน่นอน โดยธรรมชาติของการไหลแบบปั่นป่วนความเร็วของของไหลจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัเวลาและตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน [23]

สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$u(x, t) = \bar{u}(x) + u'(x, t) \quad (3.5)$$

โดยที่  $\bar{u}(x)$  คือความเร็วเฉลี่ย (Time average velocity) และ  $u'(x, t)$  คือความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด (Velocity fluctuation)

จากสมการ (3.5) สามารถอธิบายได้ว่าความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่าเท่ากับความเร็วเฉลี่ย (Time-average velocity) บวกกับความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด (Velocity fluctuation) จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงคาบเวลาหนึ่ง ( $T$ ) จะได้ว่า

$$\bar{u}(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(x, t) dt \quad (3.6)$$

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยแล้วจะทำให้ค่าเฉลี่ยของ Fluctuation นั้นมีค่าเป็นศูนย์ ( $\overline{u'(x, t)} = 0$ ) เช่นเดียวกันเมื่อทำการเฉลี่ยในช่วงคาบเวลาหนึ่งให้กับสมการอนุพันธ์เชิงมวลและโมเมนตัม จะได้ว่า

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.7)$$

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (3.8)$$

สมการที่ (3.7) และ (3.8) นี้เรียกว่า Reynold-Averaged Navier-Stokes (RANS) สังเกตได้ว่าสมการ (3.8) มีเทอมของ  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  คือความเค้นเรย์โนลด์ ซึ่งเทอมนี้เป็นผลของการไหลปั่นป่วน ทำให้ไม่สามารถแก้สมการเชิงอนุพันธ์ได้

เนื่องจากจำนวนตัวแปรที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองกึ่งทดลอง (Semi-empirical model) ความปั่นป่วนมาช่วยในการคำนวณ ซึ่งในการเลือกใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนนี้ต้องขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะทางกายภาพของการไหล ประเภทของปัญหาและระดับของความแม่นยำที่ต้องการ

ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน Standard  $k-\varepsilon$  เนื่องจากเป็นแบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่สามารถทำนายคำตอบของปัญหาได้ค่อนข้างถูกต้อง และใช้หน่วยความจำและประมวลผลของคอมพิวเตอร์น้อย สำหรับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน Standard  $k-\varepsilon$  ในส่วนของเทอมความเค้นเรย์โนลด์์สถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราความเค้นเฉลี่ย โดย Eddy-viscosity จะถูกกำหนดให้เป็นความสัมพันธ์กับพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy,  $k$ ) และอัตราการสูญเสียสลาย (Dissipation rate,  $\varepsilon$ ) โดยใช้สมมติฐานของ Boussinesq คือ

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_i \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.9)$$

$$\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.10)$$

โดยที่  $\mu_i$  คือความหนืดปั่นป่วน (Eddy viscosity),  $k$  คือค่าของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน และ  $\varepsilon$  คืออัตราการสูญเสียสลายแบบปั่นป่วน เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.12)$$

โดยที่  $\mu_{eff} = \mu + \mu_i$ ,  $G$  คือ อัตราการเกิดของการไหลแบบปั่นป่วน (Production rate of turbulence) และ  $\sigma_\varepsilon$  คือ Prandtl/Schmidt number ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

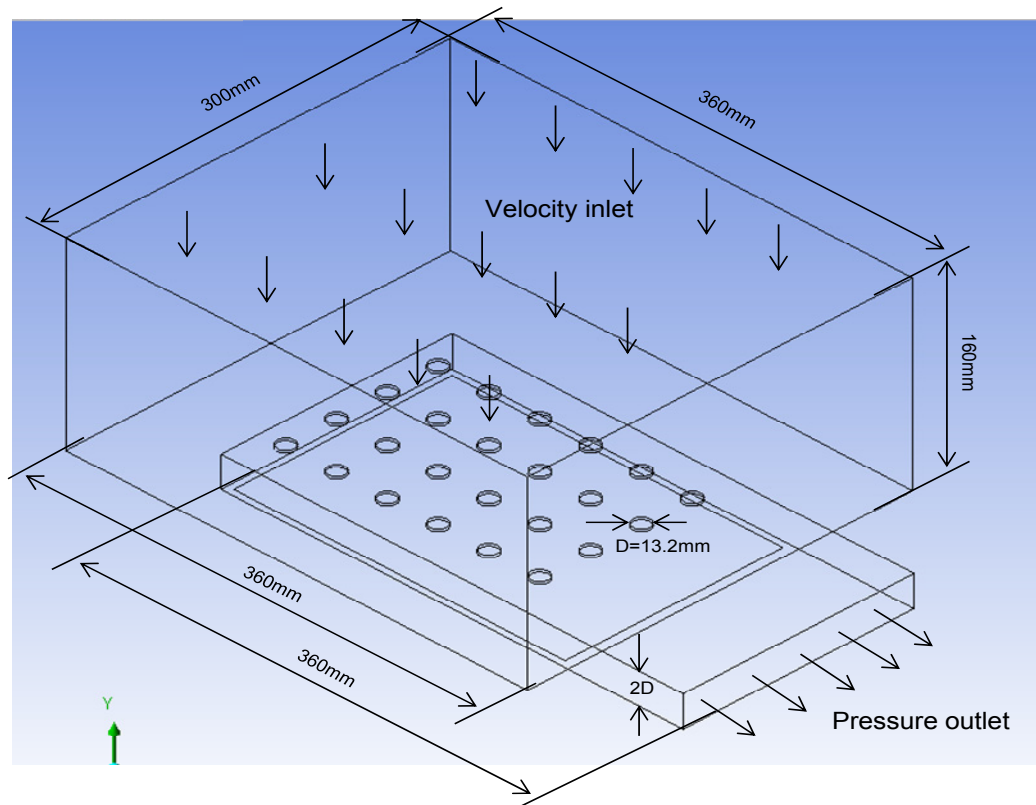
$$G = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \right] \quad (3.13)$$

โดยที่ค่า  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  เป็นค่าคงที่ มีค่าดังนี้  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.00$  และ  $\sigma_\varepsilon = 1.30$



### 3.2 โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล CFD

รูปที่ 3.2 แสดงโมเดลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการไหลในกรณี AR=1 ที่มีการจัดเรียงเป็นแบบ inline จากรูปโมเดลถูกสร้างขึ้นให้มีขนาดและสภาพเหมือนส่วนที่เป็น test section และห้องพักอากาศ (Jet chamber) ของชุดทดลอง สำหรับห้องพักอากาศถูกสร้างขึ้นมาให้มีความสูง 160 mm กว้าง 300 mm และยาว 360 mm และในส่วนของ test section มีขนาด ความสูง 2 mm กว้าง 180 mm และยาว 360 mm โดยห้องพักอากาศและ test section มีระยะห่าง 2 mm ซึ่งระยะดังกล่าวคือความหนาของแผ่นออริฟิส สำหรับทางเข้าของอากาศเป็นช่องเปิดด้านบนของห้องพักอากาศ และทางออกของอากาศอยู่ที่ตำแหน่งปลายด้านหนึ่งของ Test section ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงโมเดลที่ใช้ในการออกแบบสำหรับการจำลองการไหล

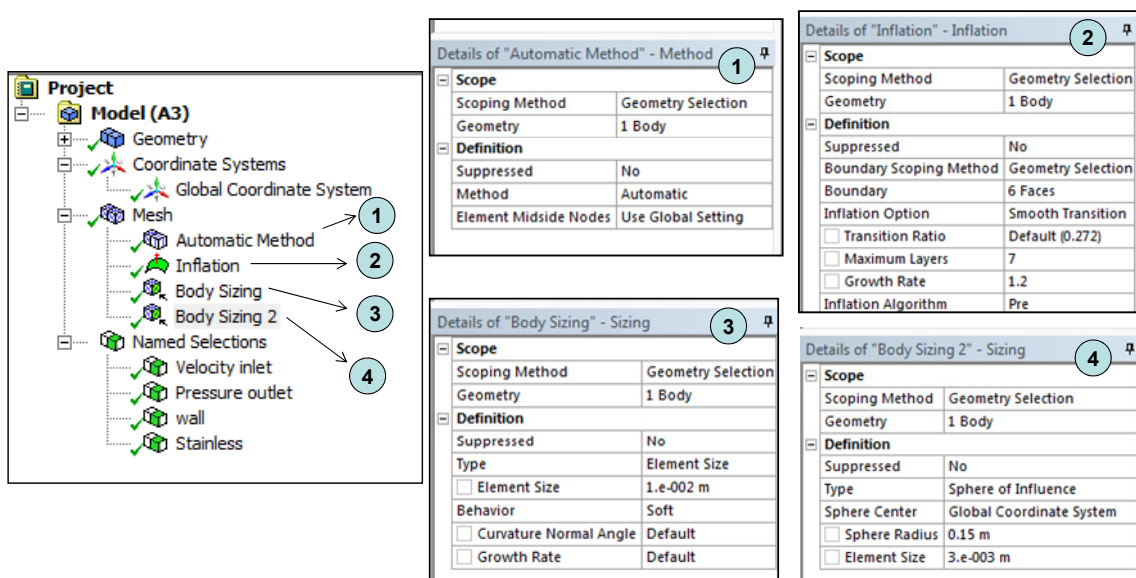
ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ที่ใช้ในการทดลอง ได้กำหนดให้ปากทางเข้าห้องพักอากาศเป็นแบบ Velocity inlet ในการกำหนดความเร็วเริ่มต้นจะขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ท สำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของลำเจ็ทที่ออกจากแต่ละรูของออริฟิสกำหนดให้เท่ากับที่ใช้ในการทดลอง ( $Re=13,400$ ) โดยความเร็วเริ่มต้นของเจ็ทแต่ละรูจะต้องอยู่ในช่วง  $V_j=15$  m/s จากกฎอนุรักษ์มวล อัตราการไหลของอากาศที่ปากทางเข้าห้องพักจะต้องเท่ากับผลรวมที่ผ่านออริฟิสแต่ละรู ในที่นี้ ได้กำหนดให้อากาศที่ไหลเข้าที่ปากทางเข้าห้องพักอากาศให้มีความเร็ว 0.36 m/s เพื่อให้ได้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทตามที่ต้องการ

### 3.3 วิธีการและขั้นตอนการใช้โปรแกรม Fluent ในการจำลองการไหล

สำหรับวิธีการและขั้นตอนการใช้โปรแกรม Fluent ในการจำลองการไหลนั้น ได้เริ่มจากการกำหนดโดเมนการไหลของอากาศให้เหมือนกับลักษณะที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นจะทำการสร้างกริดและกำหนดขอบเขตเงื่อนไขต่างๆ โดยจะแสดงในรายละเอียดต่อไป

#### 3.3.1 การสร้างกริด (Meshing)

ในการสร้างกริด (Meshing) ของโมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล ได้กำหนดให้รูปแบบกริดเป็นแบบ Automatic (Element Midside Nodes=Use Global) โดยรายละเอียดในการกำหนดค่าต่างๆแสดงในรูปที่ 3.3 สำหรับในส่วนที่เป็นผนังทั้งหมดของ Test section ได้ใช้คำสั่ง Inflation function แบบ Smooth transition ซึ่งคำสั่งดังกล่าวจะทำการสร้างกริดชั้นย่อยในบริเวณที่ติดกับผนังทั้งหมด โดยกริดย่อยมีทั้งหมด 7 ชั้นก่อนจะเข้าสู่กริดหลัก สำหรับรายละเอียดต่างๆในการกำหนด Inflation function ได้แสดงในตารางที่ 3.1



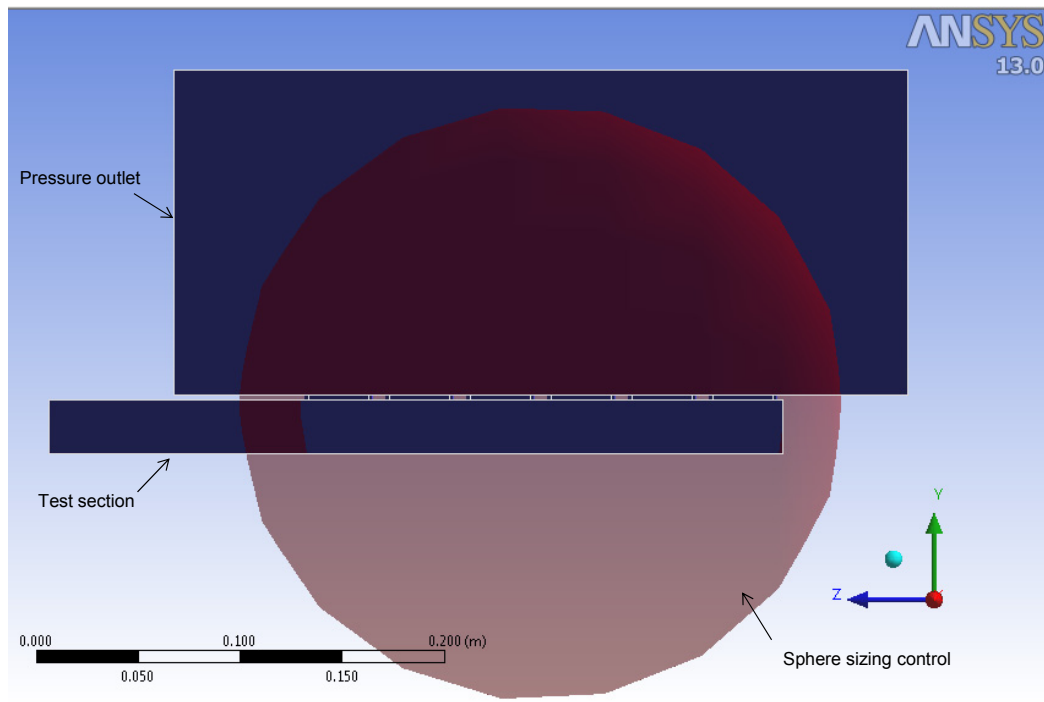
รูปที่ 3.3 แสดงรายละเอียดในการสร้างกริด

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดในการกำหนด Inflation function

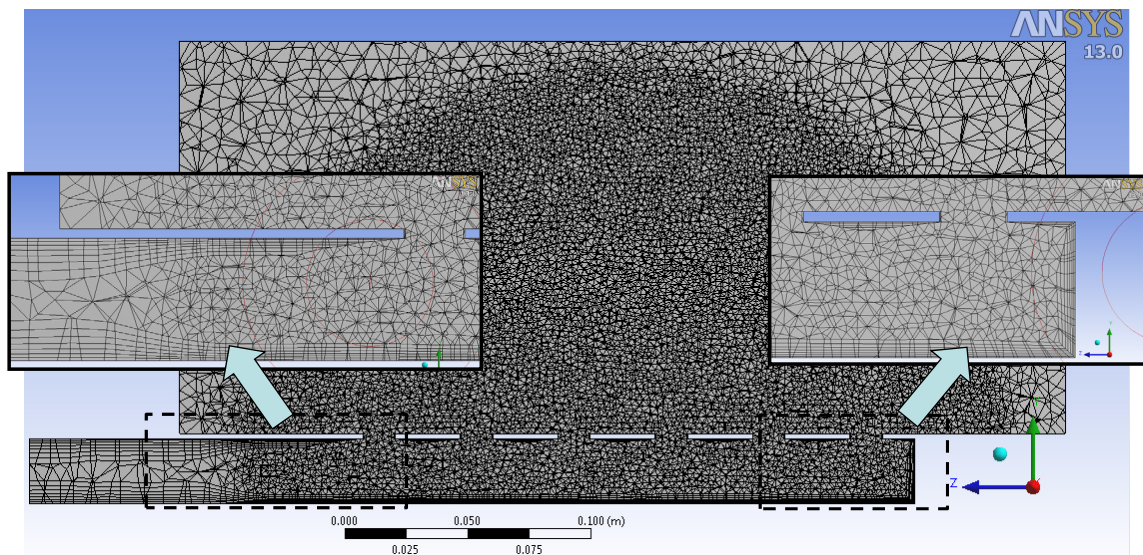
|                     |       |
|---------------------|-------|
| Transition ratio    | 0.272 |
| Maximum layer       | 7     |
| Growth rate         | 1.2   |
| Inflation algorithm | Pre   |

นอกจากนี้ได้กำหนดให้กริดมีขนาดเล็กเป็นพิเศษเฉพาะบริเวณในทรงกลมตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.4 โดยขอบเขตของทรงกลมจะครอบคลุมบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนทั้งหมดและปากทางทางเข้าของออริฟิส รูปที่ 3.5 และ 3.6 แสดง

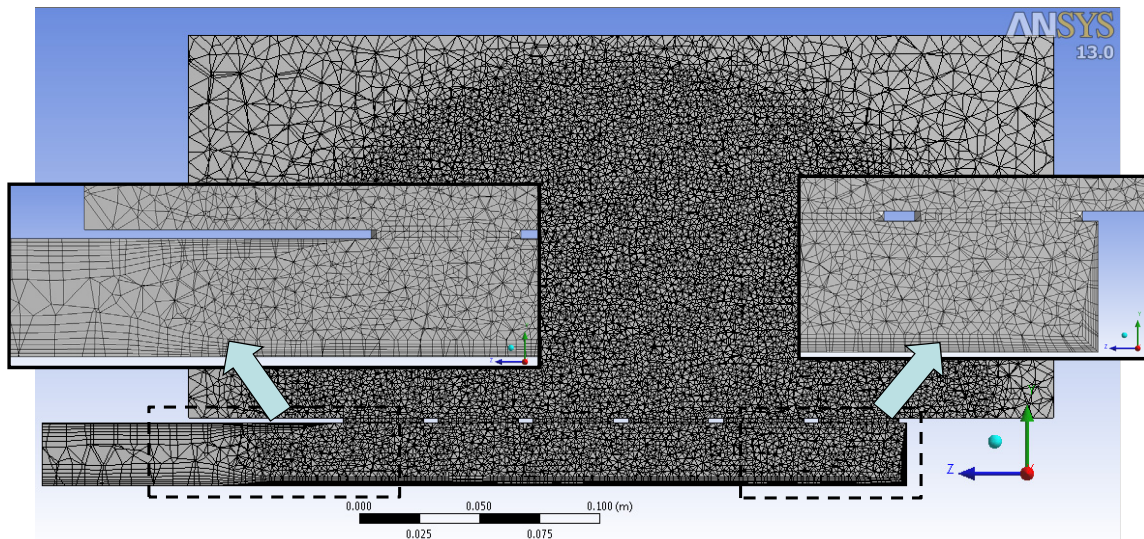
รายละเอียดของกริดที่ระนาบตัดผ่านรูออริฟิสในกรณี AR=1 การจัดเรียงแบบ Inline และ AR=8,  $\theta=0^\circ$  การจัดเรียงแบบ Inline ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แสดงการกำหนดขนาดของกริดแบบจำกัดขอบเขต (ขอบเขตอยู่ในบริเวณที่เป็นทรงกลม)



รูปที่ 3.5 แสดงรายละเอียดของกริดที่ระนาบตัดผ่านรูออริฟิสในกรณี AR=1  
การจัดเรียงแบบ Inline



รูปที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของกริดที่ระนาบตัดผ่านรูออริฟิสในกรณี AR=8,  $\theta=0^\circ$   
การจัดเรียงแบบ Inline

3.3.2 ข้อสมมุติฐานที่ใช้ในการคำนวณ

ในการจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชน ได้ทำการวิเคราะห์การไหลเป็นแบบคงตัว (Steady flow) ไม่พิจารณาผลจากการถ่ายเทความร้อนและไม่คิดการสูญเสียความร้อน โดยกำหนดให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ไม่คิดผลของแรงโน้มถ่วง สำหรับโมเดลของความปั่นป่วนใช้แบบ Standard  $k - \epsilon$  โดยบริเวณที่ใกล้พื้นผิวใช้แบบ Standard wall Functions

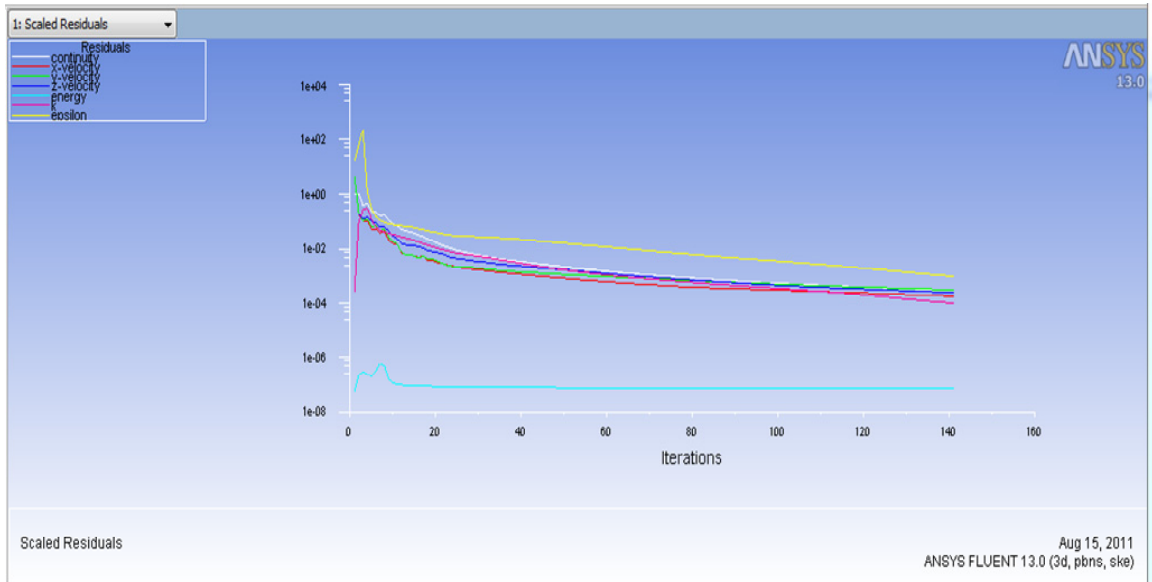
3.3.3 วิธีกรคำนวณ

สำหรับการคำนวณจะใช้วิธีแบบ SIMPLE โดยรายละเอียดของ Spatial discretization กำหนดตามตารางที่ 3.2 โดยรายละเอียดในการกำหนดค่าต่างๆแสดงในภาคผนวก ค.

ตารางที่ 3.2 แสดงการกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไข Spatial discretization

|                            |                          |
|----------------------------|--------------------------|
| Gradient                   | Least Squares Cell Based |
| Pressure                   | Standard                 |
| Momentum                   | Second Oder Upwind       |
| Turbulent Kinetic Energy   | Second Oder Upwind       |
| Turbulent Dissipation Rate | Second Oder Upwind       |

รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างของกราฟการลดลงของค่าความผิดพลาด จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาในการคำนวณมากขึ้น (Time step) ค่าความผิดพลาดลดลงเรื่อยๆ จนกว่าจะถึงค่าที่กำหนด สำหรับงานวิจัยนี้ค่าความผิดพลาดต่ำสุดกำหนดที่  $1 \times 10^{-4}$



รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างของกราฟการลดลงของค่าความผิดพลาด

## บทที่ 4 ผลการศึกษา

ในการอธิบายผลการทดลองแบ่งออกเป็นสี่ส่วนดังนี้ (1) ลักษณะการไหลของเจ็ทโดยใช้ CFD (2) ลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวที่ได้จากการทดลองโดยใช้ฟิล์มน้ำมัน (3) ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแบบเฉพาะจุด (Local heat transfer) และ (4) อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ในการอธิบายผลการทดลองครั้งนี้บริเวณต้นทางการไหล (Upstream) หมายถึงตำแหน่งของเจ็ทคอลัมน์ 1-3 ( $0 < X/D < 9$ ) และบริเวณปลายทางการไหล (Downstream) หมายถึงตำแหน่งของเจ็ทคอลัมน์ 4-6 ( $X/D > 9$ )

### 4.1 ลักษณะการไหลของเจ็ท

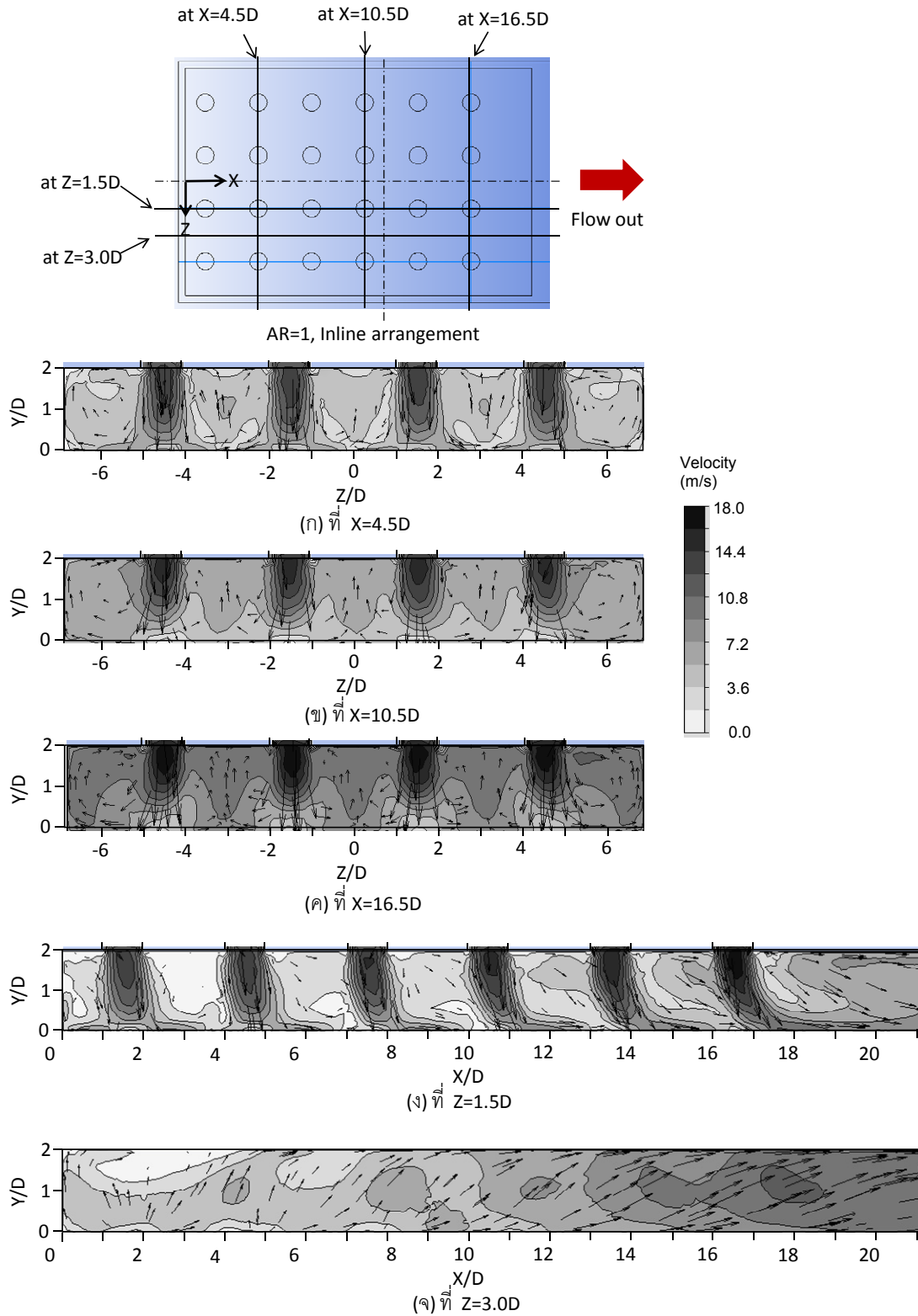
สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทโดยใช้ CFD โดยในส่วนแรกจะอธิบายถึงสนามการไหลของเจ็ทที่ระนาบต่างๆ โดยเปรียบเทียบผลของการจัดเรียงของเจ็ทแบบ Inline และ Staggered ในกรณี  $AR=1$  และเปรียบเทียบผลของรูปร่างของเจ็ท  $AR=1, 4$  และ  $8$  ในกรณีของการจัดเรียงแบบ Inline เพื่อให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์ไหลระหว่างกระแสเจ็ทและกระแสไหลตัด (Crossflow) จากนั้นจะอธิบายถึงสนามการไหลในระนาบที่ใกล้พื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยพิจารณาผลของตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (ผลของรูปร่างออริฟิส, การจัดเรียงของเจ็ทและมุมปะทะ) เพื่อใช้ในการอธิบายลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ได้จากการทดลอง

#### 4.1.1 ลักษณะการไหลของเจ็ทที่ระนาบต่างๆ โดยพิจารณาผลของรูปร่างปากทางออกเจ็ทและลักษณะการจัดเรียงของเจ็ทกรณีที่ไม่พิจารณามุมปะทะ

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทที่ระนาบต่างๆกรณีของ  $AR=1$  ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline จากรูปพบว่าเจ็ทหลังจากที่ไหลออกจากออริฟิสพุ่งชนพื้นผิวด้านล่าง หลังจากนั้นเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะไหลรวมตัวกันเป็นกระแสไหลตัด (Crossflow) ไหลปะทะกับเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหล โดยความเร็วของกระแสไหลตัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นจากระยะต้นทางการไหลสู่ปลายทางการไหล ดังนั้นเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหลจะได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดมากกว่าเจ็ทที่อยู่ต้นทางการไหลตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 (ง) ทำให้บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหลเลื่อนตำแหน่งตามทิศทางการไหลของกระแสไหลตัด โดยบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทแต่ละลำเลื่อนไปตามการไหลของกระแสไหลตัดมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากต้นทางการไหลสู่ปลายทางการไหล

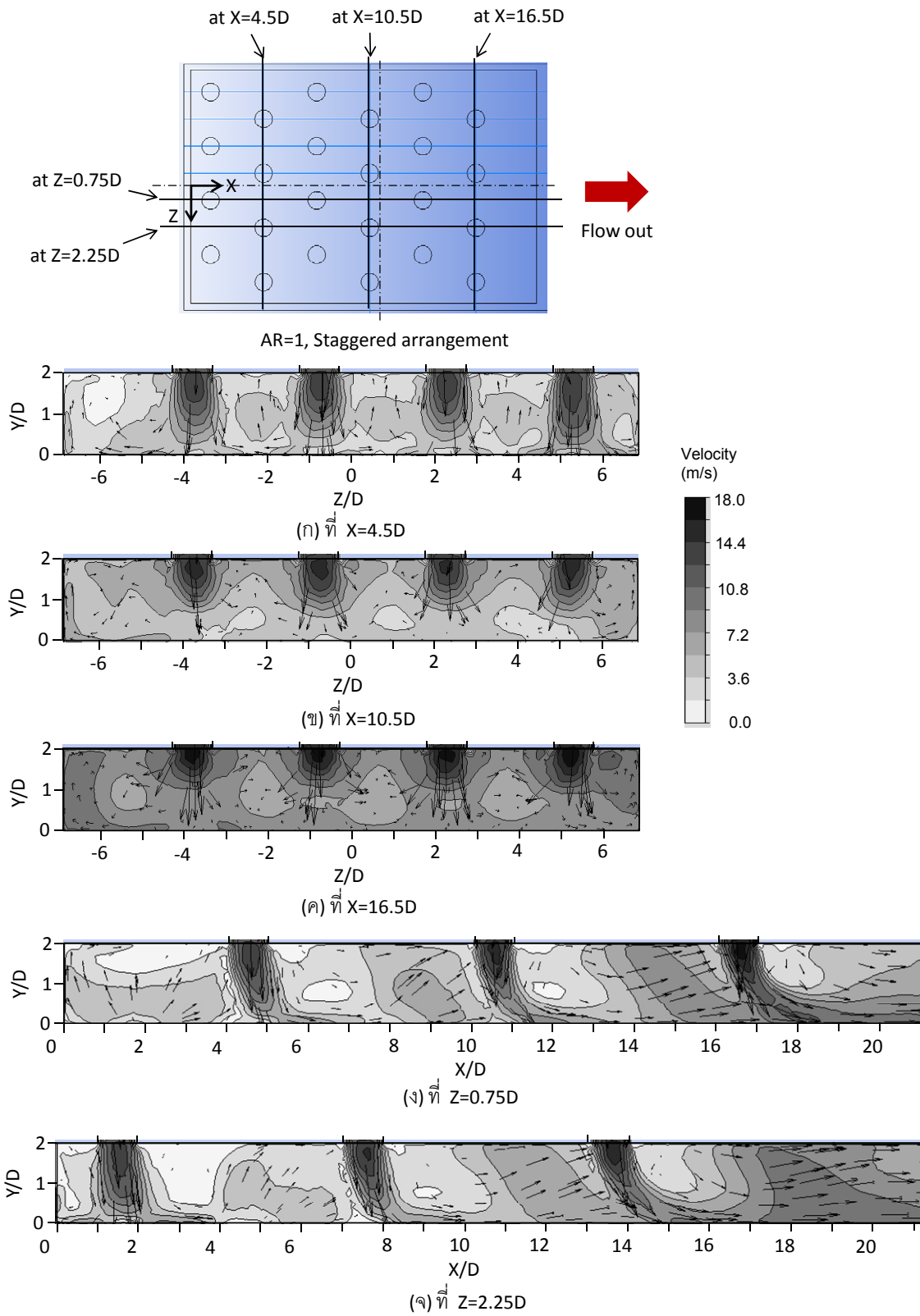
รูปที่ 4.1 (ก)-(ค) แสดง Contour ความเร็วบนระนาบ Y-Z ตามแนวแกน X และ Z ต่างๆ จากรูปแสดงเจ็ทที่อยู่ในบริเวณต้นทางการไหล (รูปที่ 4.1 (ก)) พุ่งชนพื้นผิวอย่างรุนแรงเนื่องจากเป็นบริเวณที่กระแสไหลตัดมีความเร็วต่ำ สำหรับในกรณีเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งห่างจากต้นทางการไหล (รูปที่ 4.1 (ข) และ (ค)) ความรุนแรงในการพุ่งชนพื้นผิวดลดลง ซึ่งความรุนแรงในการพุ่งชนพื้นผิวที่ลดลงสามารถสังเกตได้จากบริเวณที่มีสีเข้ม (เจ็ทมีความเร็วสูง) ที่ปากทางออกเจ็ทมีขนาดสั้นลง โดยความเร็วเจ็ทบริเวณใกล้พื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนลดลงอย่างมาก และนอกจากนี้ยังพบว่า กระแสไหลตัดที่อยู่ระหว่างเจ็ทแต่ละลำมีความเร็วสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากต้นทางการไหลสู่ปลายทางการไหล (สังเกตได้จากสีที่อยู่ระหว่างกระแสเจ็ทเข้มขึ้นเป็นลำดับจากรูปที่ 4.1 (ก) จนถึง 4.1 (ค))

สำหรับเวกเตอร์ความเร็วที่แสดงในรูปที่ 4.1 (ก)-(ค) พบว่าทิศทางการไหลของเจ็ทหลังจากที่พุ่งชนพื้นผิวได้ย้อนกลับขึ้นสู่ผนังด้านบน (ผนังออริฟิส) โดยบางส่วนของเจ็ทที่ย้อนกลับขึ้นสู่ผนังด้านบนได้ไหลวนเข้าผสมกับการไหลของเจ็ท และบางส่วนได้ผสมกับกระแสไหลตัดทำให้กระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้นตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 (ง) และ (จ)



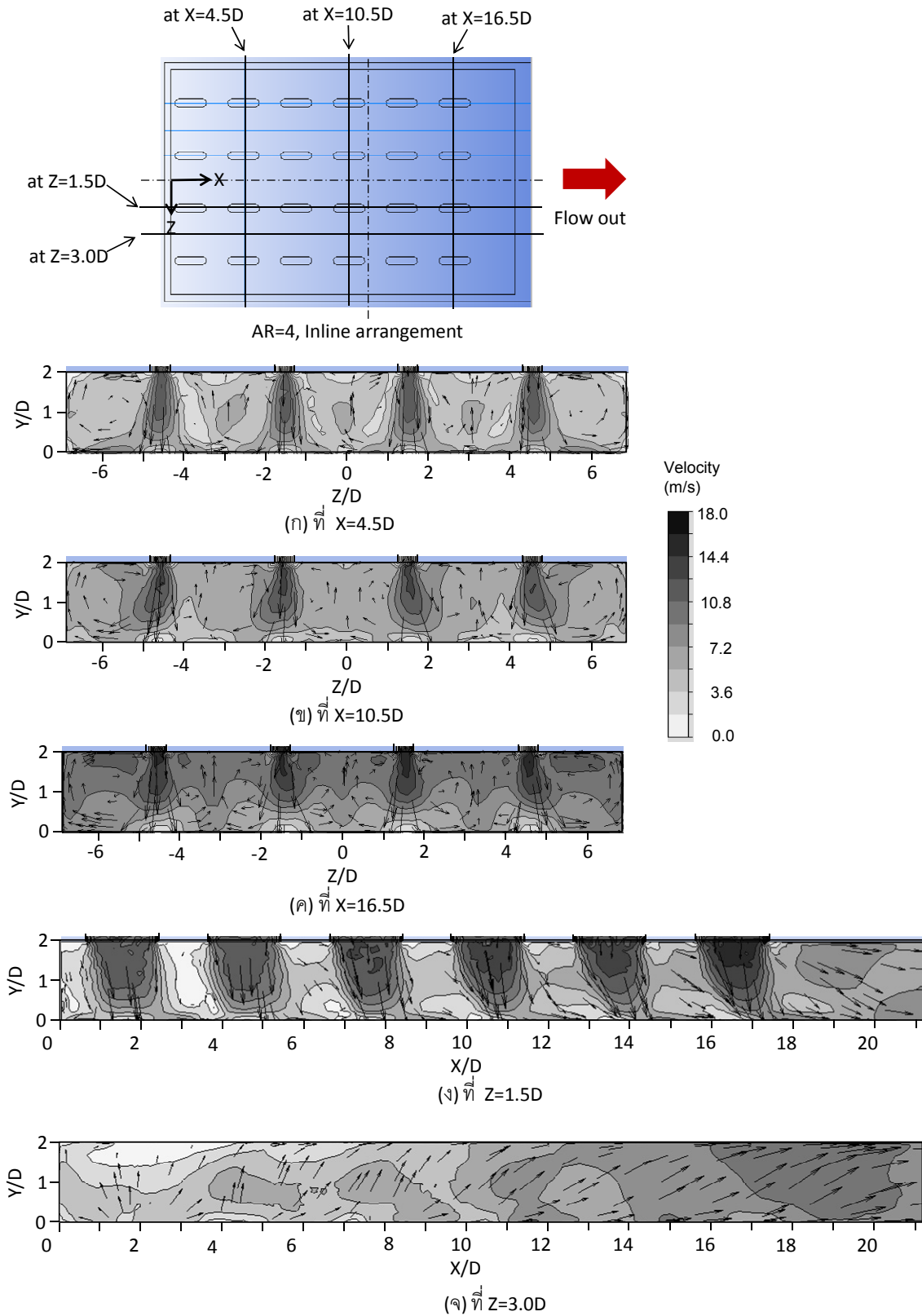
รูปที่ 4.1 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบต่างๆกรณีของเจ็ท AR=1 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline

( $Re_E=13,400$ )

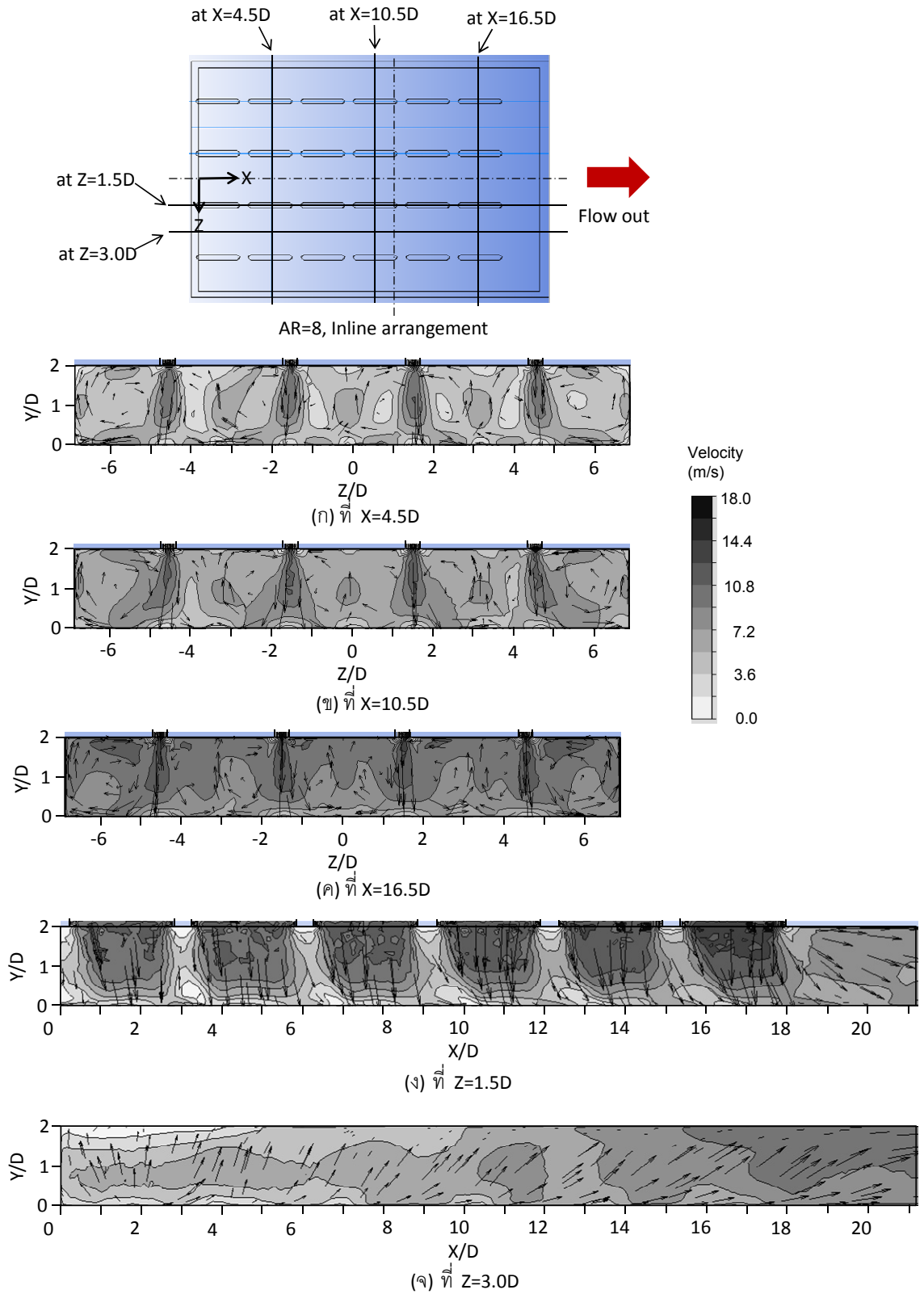


รูปที่ 4.2 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบต่างๆกรณีของเจ็ท AR=1 ที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered ( $Re_E=13,400$ )





รูปที่ 4.3 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบต่างๆกรณีของเจ็ท AR=4 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline  
( $Re_E=13,400$ )



รูปที่ 4.4 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบต่างๆกรณีของเจ็ท AR=4 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_E=13,400$ )

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทที่ระนาบต่างๆกรณีของ  $AR=1$  ที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered จากรูปพบว่าเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหลจะได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีการจัดเรียงแบบ Inline (เปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.1 (ง) และ 4.2 (ง)) โดยเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหลของการจัดเรียงแบบ Staggered มีการโน้มเอียงไปทางปลายทางการไหลมากกว่าเมื่อเทียบกับการจัดเรียงแบบ Inline ที่ตำแหน่งคอลัมน์เดียวกัน เนื่องจากลักษณะการจัดเรียงแบบ Staggered การไหลของเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหลจะขวางการไหลของกระแสไหลตัด ทำให้เกิดการปะทะโดยตรงระหว่างกระแสไหลตัดและกระแสเจ็ท ซึ่งจะแตกต่างกับการจัดเรียงแบบ Inline ที่กระแสไหลตัดสามารถไหลผ่านระหว่างแถวของเจ็ทโดยตลอดจนถึงปากทางออก

รูปที่ 4.2 (ก)-(ค) แสดงสนามการไหลของเจ็ท  $AR=1$  บนระนาบ YZ ที่ระยะ X ต่างๆของการจัดเรียงแบบ Staggered จากรูปเมื่อเปรียบเทียบกับ การจัดเรียงแบบ Inline พบว่าความรุนแรงในการพุ่งชนพื้นผิวของการจัดเรียงแบบ Staggered ลดลงอย่างมาก ซึ่งสังเกตได้จากบริเวณของลำเจ็ทจากปากทางออกเจ็ทแต่ละรูมีความยาวสั้นลงอย่างมากเมื่อเทียบกับรูป 4.1 (ก)-(ค)

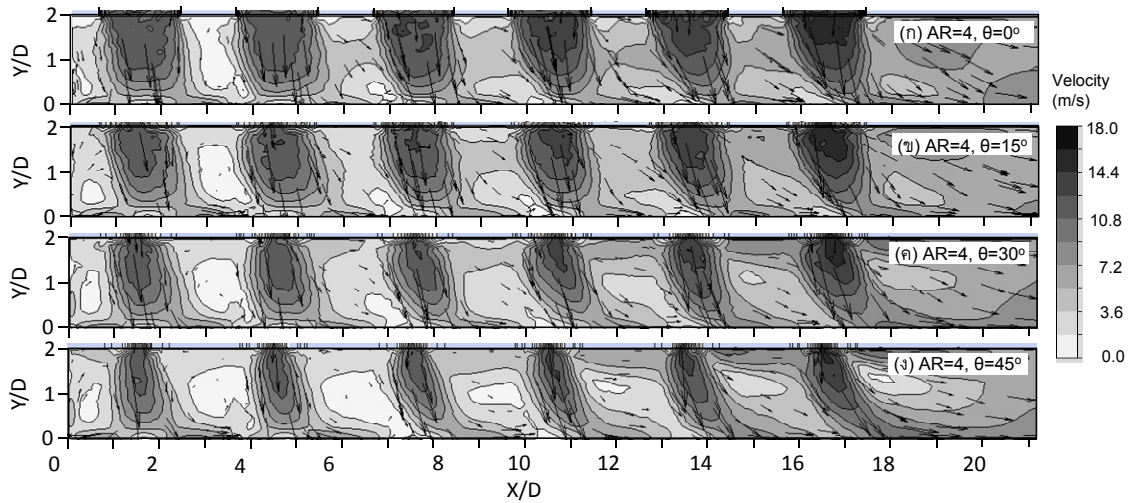
รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทที่ระนาบต่างๆกรณีที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ของเจ็ท  $AR=4$  และ 8 ตามลำดับ จากรูปพบว่าบริเวณที่มีความเร็วสูงขยายในแนวแกน X และมีขนาดแคบลงตามแนวแกน Z ตามลักษณะรูปร่างของปากทางออกเจ็ทเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี  $AR=1$  ในรูปที่ 4.1 นอกจากนี้ยังพบว่า การโน้มเอียงของเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหลลดลงเมื่อเพิ่มจาก  $AR=4$  เป็น  $AR=8$  ซึ่งปรากฏการณ์การไหลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การออกแบบปากทางออกเจ็ทให้เป็นแบบวงกลมยาวสามารถลดผลกระทบจากการไหลของกระแสไหลตัดได้ เนื่องจากผลของหน้าตัดเจ็ทที่เป็นแบบยาวตามการไหลของกระแสไหลตัด ทำให้สามารถทะลุผ่านการไหลของกระแสไหลตัดได้ดีกว่ากรณีของเจ็ทที่มีหน้าตัดวงกลม

#### 4.1.2 ลักษณะการไหลของเจ็ทที่ระนาบต่างๆ โดยพิจารณาผลของรูปร่างปากทางออกเจ็ทและลักษณะการจัดเรียงของเจ็ทกรณีศึกษา

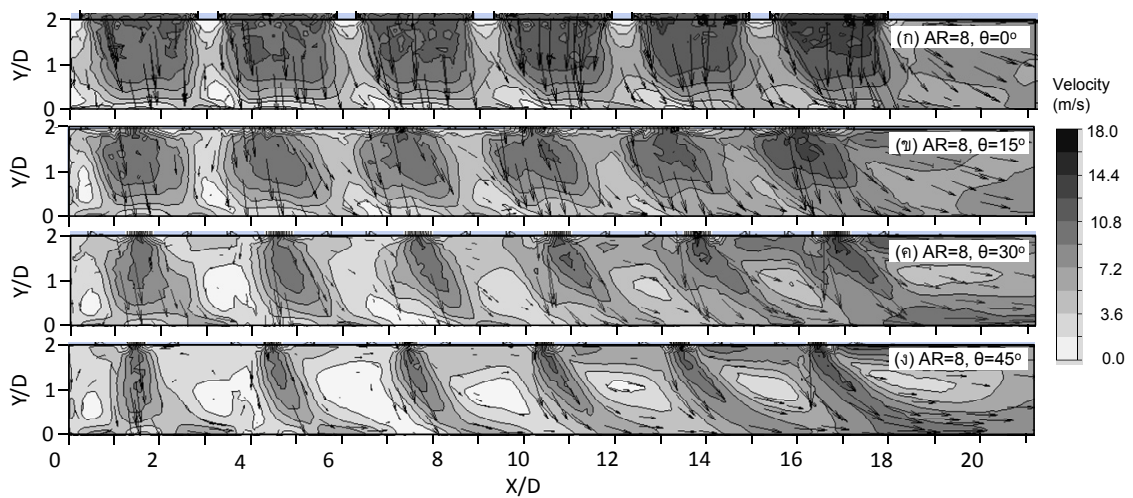
รูปที่ 4.5-4.9 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วในระนาบ Y-X กรณีที่พิจารณามุมปะทะ จากรูปพบว่ามุมปะทะเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เจ็ทโน้มเอียงไปทางปลายทางการไหลมากขึ้น เนื่องจากมุมปะทะที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่การปะทะระหว่างกระแสเจ็ทและกระแสไหลตัด โดยเฉพาะเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหลได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง

ในกรณีที่เปรียบเทียบระหว่าง  $AR=4$  และ  $AR=8$  ของการจัดเรียงแบบ Inline (เปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.5 และ 4.6) พบว่ากรณี  $AR=8$  (รูปที่ 4.6) การเพิ่มขึ้นของมุมปะทะส่งผลทำให้เจ็ทโน้มเอียงไปทางปลายทางการไหลมากกว่ากรณี  $AR=4$  (รูปที่ 4.5) เนื่องจากความยาวของพื้นที่หน้าตัดเจ็ทเงื่อนไข  $AR=8$  ยาวกว่า  $AR=4$  ทำให้พื้นที่การปะทะระหว่างกระแสเจ็ทและกระแสไหลตัดของเจ็ทที่เงื่อนไข  $AR=8$  มากกว่า  $AR=4$  เมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้น

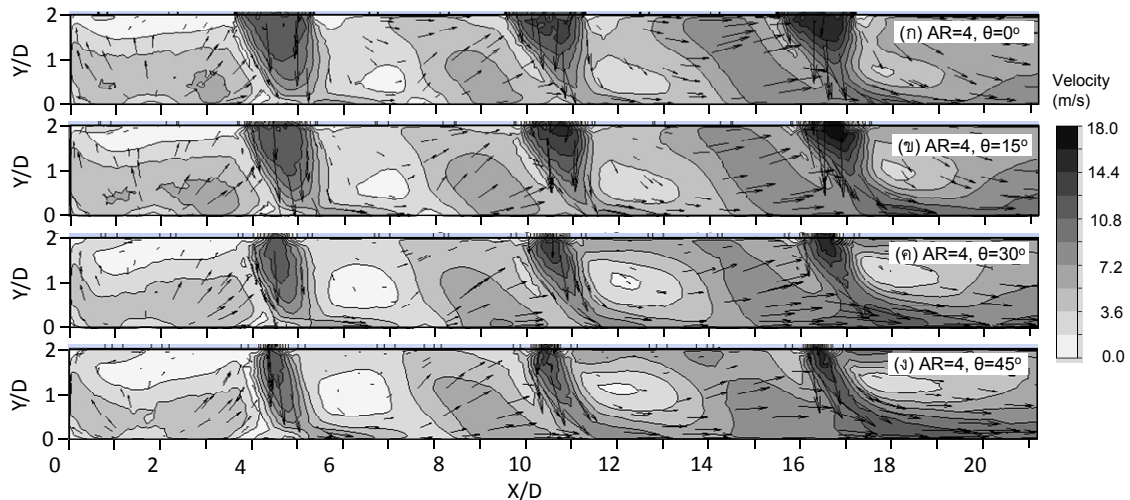
เมื่อพิจารณาผลของการจัดเรียงของเจ็ทแบบ Inline และ Staggered กรณี  $AR=4$  (เปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.5 และ 4.7) และ  $AR=8$  (เปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.6 และ 4.8) พบว่าการจัดเรียงของเจ็ทแบบ Staggered มีผลทำให้เจ็ทโน้มเอียงไปทางปลายทางการไหลมากกว่าของการจัดเรียงแบบ Inline โดยเฉพาะกรณี  $AR=8$  (รูปที่ 4.8) เจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหลจะไม่มี การพุ่งชนพื้นผิว เจ็ทหลังจากไหลออกจากออร์บิทัลจะถูกกระแสไหลตัดพัดพาอย่างรุนแรงไปตามปลายทางการไหล เนื่องจากอยู่ในช่วงเงื่อนไขที่ได้อิทธิพลของกระแสไหลตัดมากที่สุด



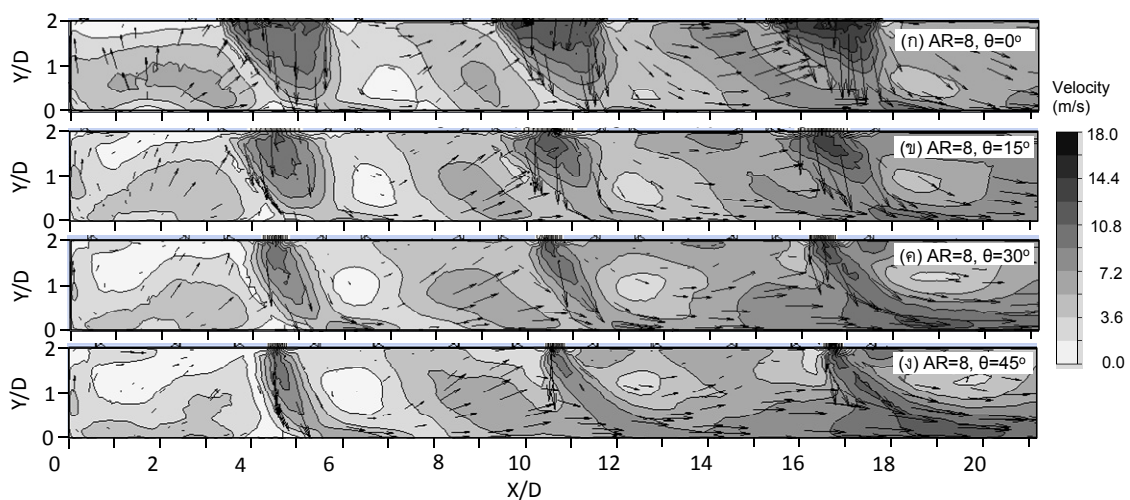
รูปที่ 4.5 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วในระนาบ Y-X ที่  $Z=1.5D$  กรณีของเจ็ท  $AR=4$  ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_E=13,400$ )



รูปที่ 4.6 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วในระนาบ Y-X ที่  $Z=1.5D$  กรณีของเจ็ท  $AR=8$  ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_E=13,400$ )



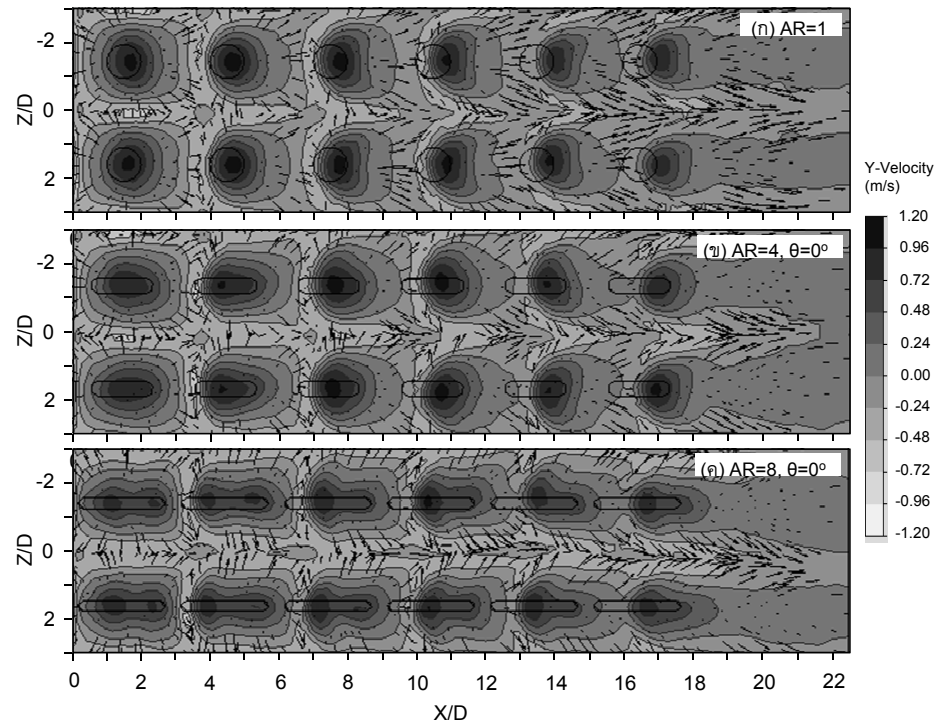
รูปที่ 4.7 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วในระนาบ Y-X ที่  $Z=0.75D$  กรณีของเจ็ท AR=4 ที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered ( $Re_E=13,400$ )



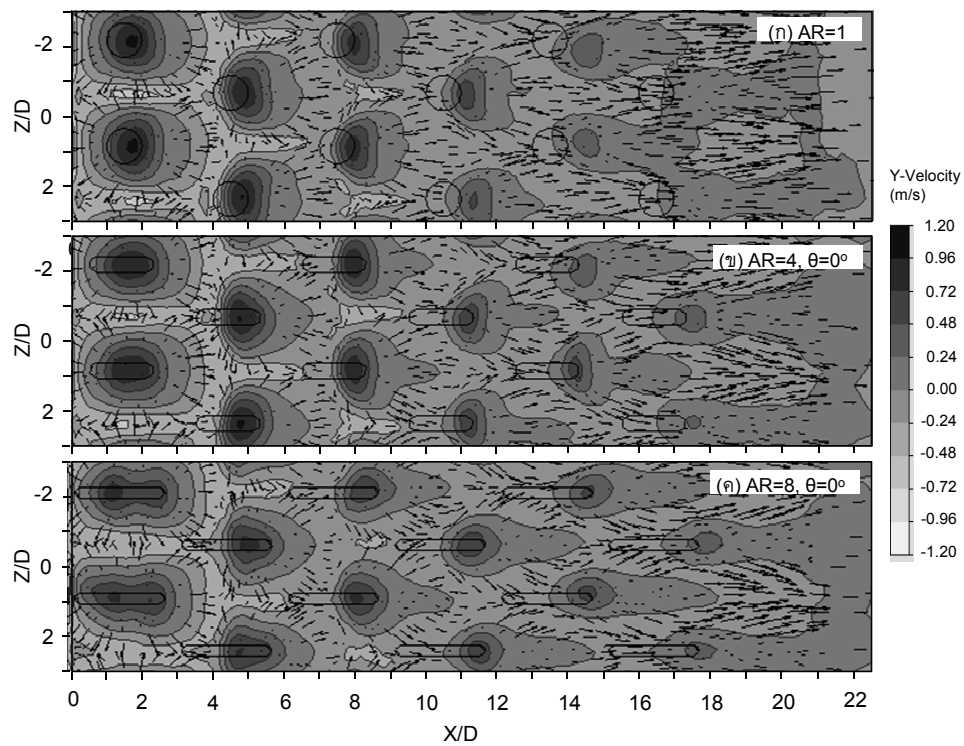
รูปที่ 4.8 แสดง Contour และเวกเตอร์ความเร็วในระนาบ Y-X ที่  $Z=0.75D$  กรณีของเจ็ท AR=8 ที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered ( $Re_E=13,400$ )

#### 4.1.3 สนามความเร็วบนระนาบ Z-X ใกล้บริเวณพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกรณีที่ไม่พิจารณามุมปะทะ

รูปที่ 4.9-4.14 แสดงการกระจายของความเร็วในแนวแกน Y ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm จากรูปค่าความเร็วที่เป็นบวกแสดงถึงทิศทางของความเร็วเจ็ทที่พุ่งลงกระทบพื้นผิว และค่าที่เป็นลบแสดงถึงทิศทางของความเร็วพุ่งขึ้นมาจากพื้นผิว ซึ่งเกิดจากการปะทะระหว่างเจ็ทผนัง (Wall jet) ของเจ็ทแต่ละลำแล้วไหลขึ้นจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน นอกจากนี้ในรูปยังแสดงเวกเตอร์เพื่อแสดงทิศทางของการไหลบนระนาบ Z-X สำหรับบริเวณที่มีความเร็วในแนวแกน Y สูงสุดหมายถึงบริเวณที่เป็นจุดศูนย์กลางที่เจ็ทกระทบพื้นผิว (Stagnation point)



รูปที่ 4.9 แสดง Contours ความเร็วในแนวแกน Y และเวกเตอร์ความเร็ว ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_E=13,400$ )



รูปที่ 4.10 แสดง Contours ความเร็วในแนวแกน Y และเวกเตอร์ความเร็ว ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered ( $Re_E=13,400$ )

สำหรับรูปที่ 4.9(ก) กรณีของเจ็ท AR=1 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline พบว่าเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งห่างจากต้นทางการไหลยิ่งมาก ทำให้จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเลื่อนไปทางด้านปลายทางการไหลมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากต้นทางการไหลสู่ปลายทางการไหล สำหรับการเลื่อนตำแหน่งของจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมากขึ้น สอดคล้องกับความเร็วของกระแสไหลตัดที่เพิ่มขึ้นบริเวณปลายทางการไหล สำหรับเจ็ทคอลัมน์ที่ 3-6 (นับจากต้นทางการไหล) พบว่าบริเวณที่ความเร็วในแนวแกน Y มีค่าสูง ( $Y\text{-velocity} > 0.24 \text{ m/s}$ ) มีลักษณะเป็นรูปเกือบกลม เนื่องจากได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดมากกว่าเจ็ทคอลัมน์ที่ 1 และ 2

รูปที่ 4.10(ก) กรณีเจ็ท AR=1 ที่มีการจัดเรียงเป็นแบบ Staggered พบว่าเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งต้นทางการไหล (คอลัมน์ที่ 1-3) สามารถสังเกตจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนได้อย่างชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหล (คอลัมน์ที่ 4-5) ที่ไม่สามารถสังเกตตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนได้ เนื่องจากเกิดการชนกันระหว่างกระแสไหลตัดและกระแสเจ็ทกันอย่างรุนแรง ทำให้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวได้น้อย นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณที่มีทิศทางความเร็วเป็นลบ เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณต้นทางการไหลเท่านั้น เนื่องจากเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวได้น้อยทำให้ไม่มีการไหลของเจ็ทผนังที่พุ่งขึ้นมาจากพื้นผิว ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีของการจัดเรียงแบบ Inline ที่บริเวณที่มีทิศทางความเร็วเป็นลบยังคงเกิดขึ้นถึงแม้จะเป็นบริเวณปลายทางการไหล

รูปที่ 4.9(ข) และ 4.9(ค) แสดงการกระจายความเร็วกรณีที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ของเจ็ท AR=4 และ 8 ตามลำดับ จากกรณีของเจ็ท AR=4 (รูปที่ 4.9(ข)) พบว่าบริเวณที่ความเร็วในแนวแกน Y มีค่าสูง ( $Y\text{-velocity} > 0.24 \text{ m/s}$ ) มีลักษณะยาวเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยแนวความยาวขนานกับกระแสไหลตัด และเมื่อออริฟิสมีความยาวเพิ่มเป็น AR=8 (รูปที่ 4.9(ค)) พบว่าบริเวณที่ความเร็วในแนวแกน Y มีค่าสูงได้เพิ่มความยาวขึ้นตามแนวแกน X และได้ลดขนาดลงตามแนวแกน Y ตามลักษณะของรูปร่างออริฟิส นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณที่แสดงทิศทางความเร็วเป็นลบมีขนาดกว้างกว่าเมื่อเทียบกับกรณี AR=1 โดยเฉพาะเกิดขึ้นบริเวณที่อยู่ระหว่างแถวของเจ็ท

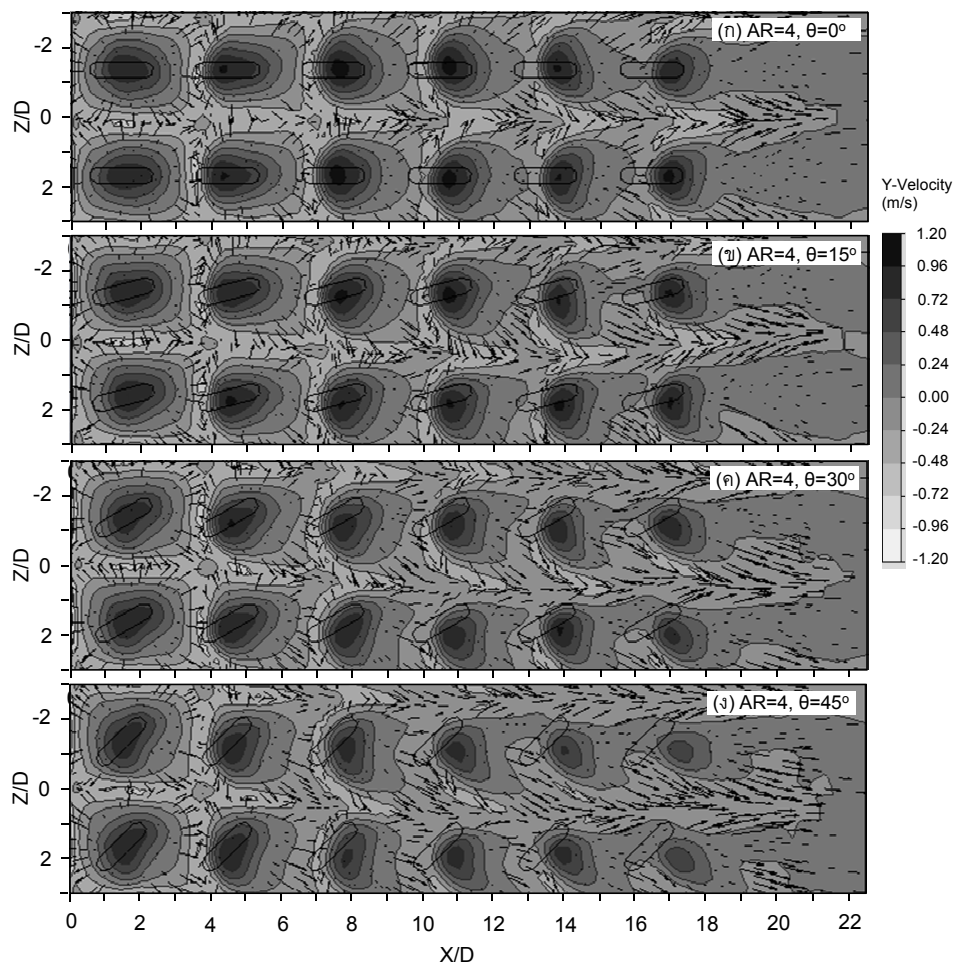
สำหรับบริเวณที่ความเร็วในแนวแกน Y มีค่าสูงสุด กรณีของ AR=4 (รูปที่ 4.9(ข)) เกิดขึ้นจุดเดียว ในขณะที่ AR=8 (รูปที่ 4.9(ค)) เกิดขึ้นสองจุด (เฉพาะบริเวณต้นทางการไหล) จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากรณีเจ็ทที่พุ่งออกมาจากออริฟิส AR=8 มีลักษณะรูปทรงของหน้าตัดยาวและแคบ ทำให้บริเวณส่วนกลางของหน้าตัดเจ็ทเกิดการผสมกับอากาศรอบๆ ได้ดีกว่าบริเวณปลายทั้งสองด้าน ดังนั้น Potential core ของเจ็ทที่ปลายทั้งสองข้างยาวกว่าบริเวณตรงกลาง ส่งผลทำให้ความเร็วสูงสุดที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวเกิดขึ้นสองตำแหน่งที่ปลายทั้งสองข้างของออริฟิส แต่อย่างไรก็ตาม บริเวณที่มีความเร็วในแนวแกน Y สูงสุดของเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหลเกิดขึ้นแค่จุดเดียว เนื่องจากเจ็ทได้รับอิทธิพลการไหลของกระแสไหลตัดอย่างรุนแรง

รูปที่ 4.10(ข) และ 4.10(ค) แสดงการกระจายความเร็วกรณีที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered ของเจ็ท AR=4 และ 8 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับกรณีที่มีการจัดเรียงแบบ Inline พบว่าบริเวณที่ความเร็วในแนวแกน Y มีค่าสูง ( $Y\text{-velocity} > 0.48 \text{ m/s}$ ) ลดขนาดลงอย่างมาก โดยเฉพาะเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งด้านปลายทางการไหล เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเจ็ทจะได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดอย่างรุนแรง ในกรณีที่พิจารณาความแตกต่างระหว่างเจ็ท AR=4 และ 8 ของการจัดเรียงแบบ Staggered (เปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.10(ข) และ 4.10(ค)) พบว่าบริเวณที่ความเร็วในแนวแกน Y มีค่าสูง ( $Y\text{-velocity} > 0.48 \text{ m/s}$ ) ของเจ็ท AR=4 มีขนาดกว้างกว่ากรณีของ AR=8 จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของออริฟิส มีผลต่อการไหลของเจ็ทในกระแสไหลตัด คือ อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของออริฟิสที่มีขนาด AR=4 สามารถลดผลกระทบจากกระแสไหลตัดได้ดีกว่าที่มีขนาด AR=8

#### 4.1.4 สนามความเร็วบนระนาบ Z-X ใกล้บริเวณพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกรณีที่พิจารณามุมปะทะ

รูปที่ 4.11-4.14 แสดงผลของมุมปะทะที่มีต่อสนามการไหลของเจ็ทในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ในกรณี AR=4 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline (รูปที่ 4.11) พบว่า เมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้นทำให้บริเวณที่ความเร็วในแนวแกน Y มีค่าสูงลดขนาดลง โดยเฉพาะบริเวณปลายทางการไหล ซึ่งไม่ปรากฏบริเวณที่มีความเร็วในแนวแกน Y สูงสุด ทำให้ไม่สามารถกำหนดตำแหน่งบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนได้ สำหรับในกรณี AR=8 (รูปที่ 4.12) พบว่า เมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้น เจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหลจะไม่สามารถระบุตำแหน่งบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนได้ เนื่องจากเจ็ทหลังจากที่พุ่งออกจากออริฟิสจะถูกกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูงพัดพาไปตามปลายทางการไหลตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.1.2

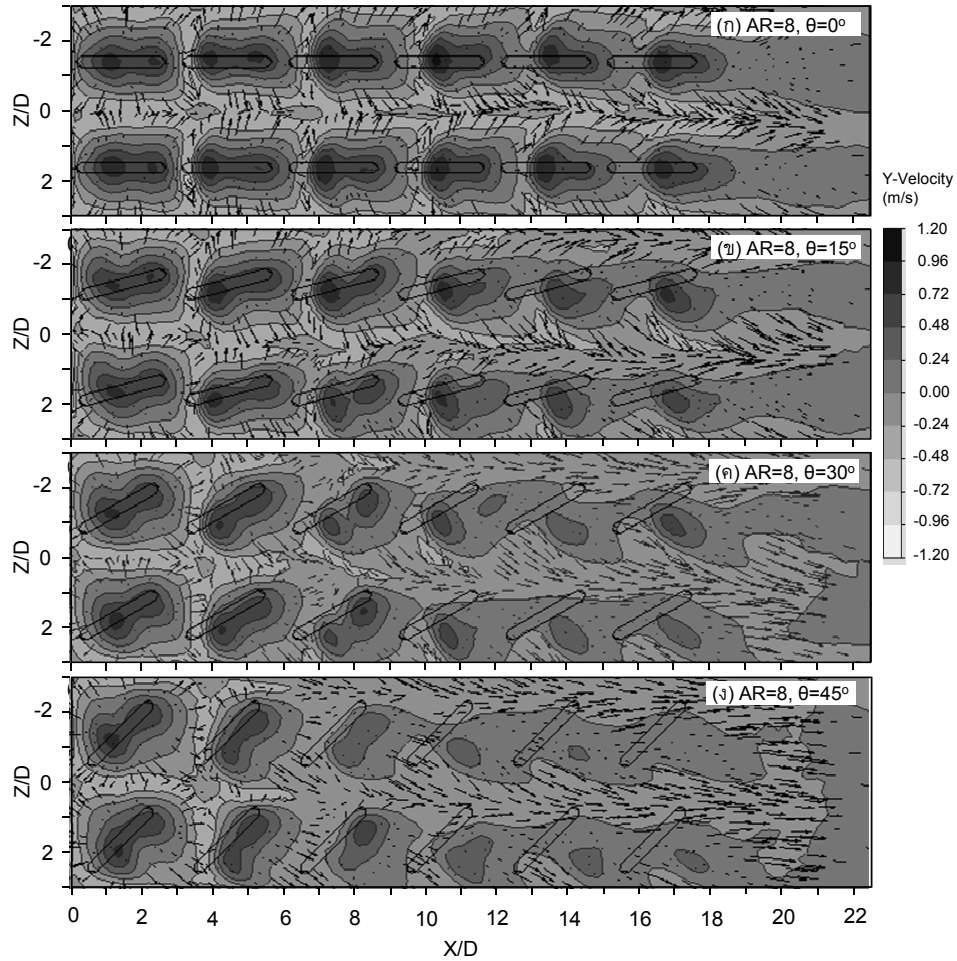
เมื่อพิจารณาการจัดเรียงแบบ Staggered (รูปที่ 4.13 และ 4.14) พบว่าบริเวณที่ความเร็วในแนวแกน Y มีค่าสูงลดขนาดลงกว่ากรณีของการจัดเรียงแบบ Inline (รูปที่ 4.11 และ 4.12) เจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหลจะไม่สามารถระบุตำแหน่งบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนได้ บริเวณที่ความเร็วในแนวแกน Y มีค่าสูงจะไม่เป็นระเบียบ



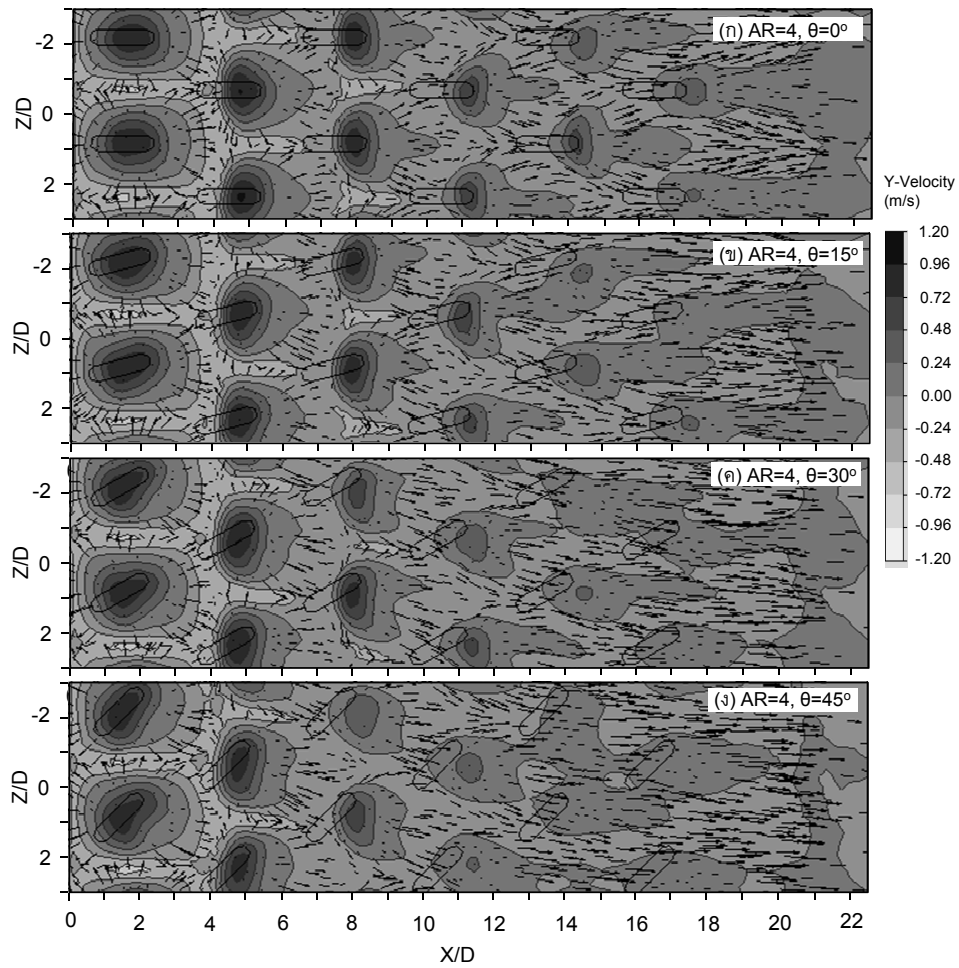
รูปที่ 4.11 แสดง Contours ความเร็วในแนวแกน Y และเวกเตอร์ความเร็ว ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ในกรณีของเจ็ท AR=4 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_E=13,400$ )



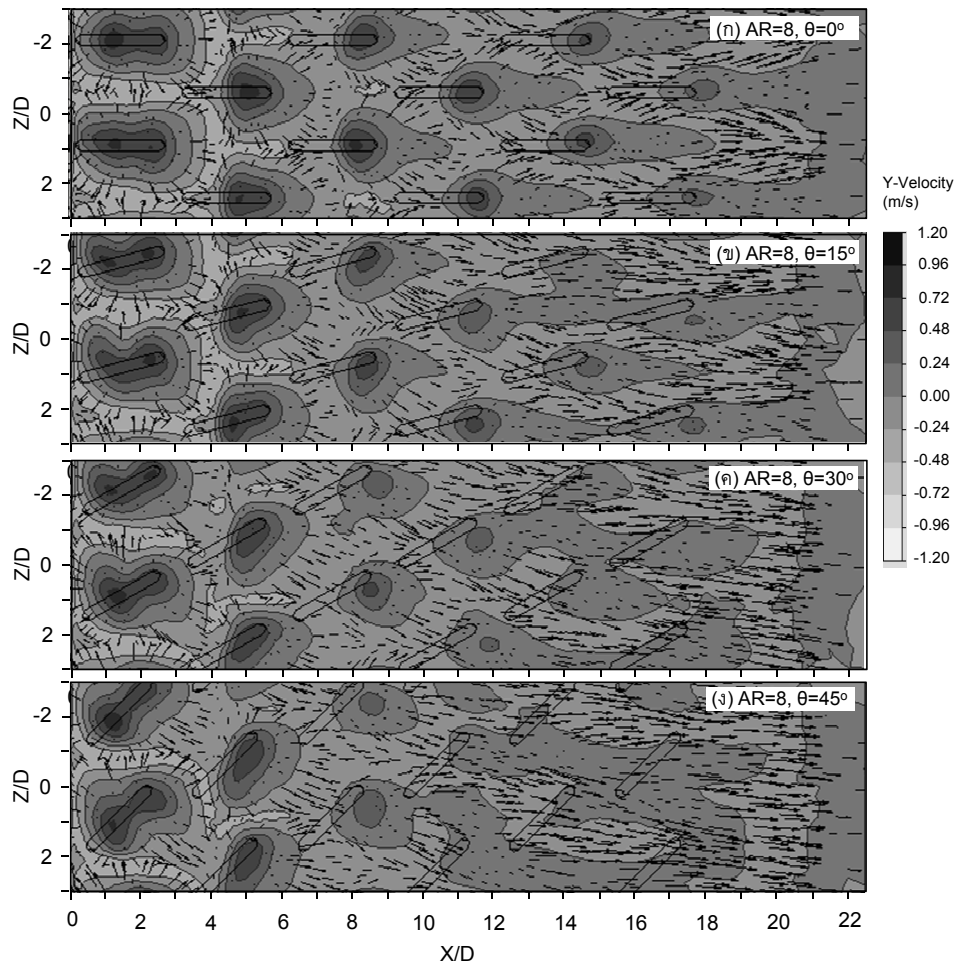
จากผลการทดลองกรณีที่มีมุมปะทะพบว่า การเพิ่มขึ้นของมุมปะทะทำให้เกิดบริเวณที่มีการปะทะระหว่างเจ็ทและกระแสไหลตัดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะบริเวณปลายทางการไหล เนื่องจากเป็นบริเวณที่ความเร็วของกระแสไหลตัดมีค่าสูง จะเกิดการปะทะระหว่างกระแสไหลตัดกับกระแสการไหลของเจ็ทอย่างรุนแรง ส่งผลทำให้เจ็ทเกิดการชนพื้นผิวได้น้อย



รูปที่ 4.12 แสดง Contours ความเร็วในแนวแกน Y และเวกเตอร์ความเร็ว ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ในกรณีของเจ็ท AR=8 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_E=13,400$ )



รูปที่ 4.13 แสดง Contours ความเร็วในแนวแกน Y และเวกเตอร์ความเร็ว ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ในกรณีของเจ็ท  $AR=4$  ที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered ( $Re_E=13,400$ )



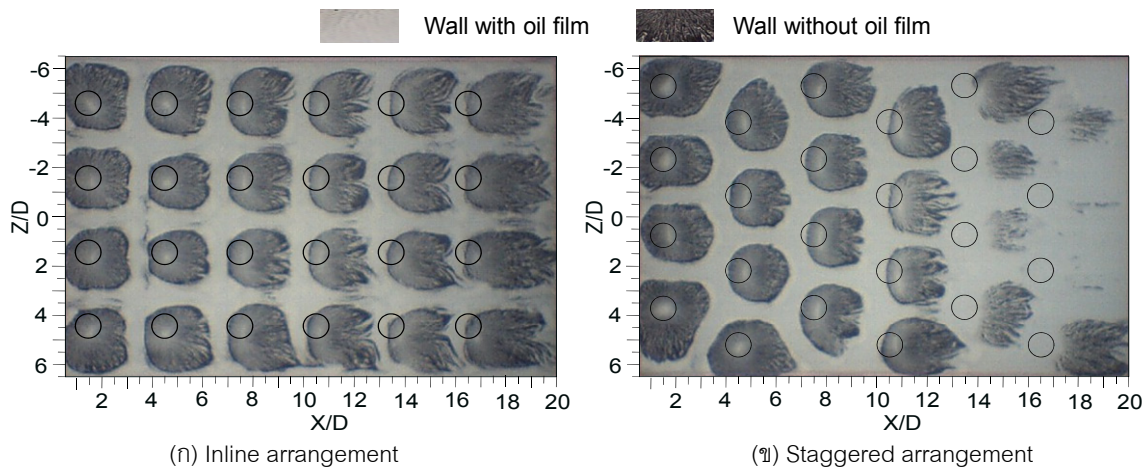
รูปที่ 4.14 แสดง Contours ความเร็วในแนวแกน Y และเวกเตอร์ความเร็ว ในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1 mm ในกรณีของเจ็ท AR=8 ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ( $Re_E=13,400$ )

#### 4.2 ลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว

รูปที่ 4.15, 4.17 และ 4.18 แสดงลักษณะการไหลพบพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้วิธีฟิล์มน้ำมัน โดยรูปบริเวณที่แสดงเป็นสีดำคือบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออก และบริเวณที่แสดงเป็นสีขาวคือบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสม สำหรับบริเวณที่เป็นเป็นจุดสีขาวตรงกลางบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนแสดงถึงตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) โดยภาพรวมของผลการทดลองพบว่า ลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวสอดคล้องกับการกระจายความเร็วที่มีทิศทางพุ่งชนพื้นผิวจากผลของ CFD ตามที่ได้แสดงในหัวข้อ 4.1.3 และ 4.1.4

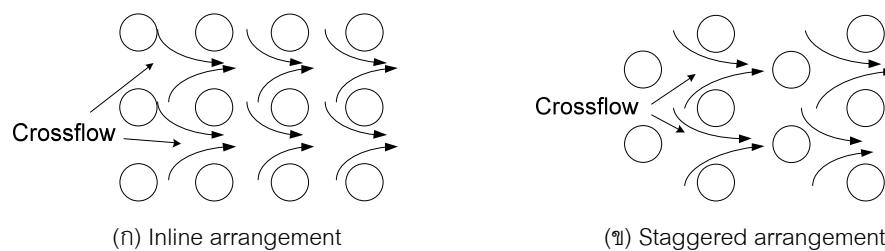
##### 4.2.1 ผลของการจัดเรียงของเจ็ทกรณี AR=1

รูปที่ 4.15 แสดงผลของการจัดเรียงของเจ็ทที่มีต่อการไหลบนพื้นผิวกรณี AR=1 จากรูปที่ 4.15 (ก) กรณีการจัดเรียงแบบ Inline พบว่าบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหล ( $9 < X/D < 20$ ) เลื่อนไปในทิศทางกระแสไหลตัดมากกว่าในกรณีเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งต้นทางการไหล ( $0 < X/D < 9$ ) จากผลการทดลองแสดงถึงปรากฏการณ์การไหลของเจ็ทบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหลจะได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดมากกว่าเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งต้นทางการไหล เนื่องจากกระแสไหลตัดมีความเร็วต่ำในบริเวณต้นทางการไหลและความเร็วจะเพิ่มขึ้นในบริเวณปลายทางการไหล (ดูรูป 4.1 (จ) ประกอบ)



รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวกรณี  $AR=1$  ( $Re=13,400$ )

สำหรับรูปที่ 4.15 (ข) แสดงผลของการจัดเรียงเป็นแบบ Staggered จากรูปพบว่าลักษณะการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทค่อนข้างแตกต่างกับกรณีการจัดเรียงเป็นแบบ Inline โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหลของการจัดเรียงแบบ Inline มีพื้นที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลของการจัดเรียงแบบ Staggered เนื่องจากการจัดเรียงแบบ Inline กระแสไหลตัดสามารถไหลผ่านช่องว่างระหว่างแถวของเจ็ทโดยไม่มีลำเจ็ทขวางตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.16 (ก) ซึ่งแตกต่างกับในกรณีการจัดเรียงของเจ็ทแบบ Staggered กระแสไหลตัดไหลชนกับกระแสการไหลของเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหลตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.16 (ข) ทำให้เจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหลได้รับผลของกระแสไหลตัดมากกว่าในกรณีการจัดเรียงแบบ Staggered



รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะการไหลของกระแสไหลตัดที่ไหลผ่านเจ็ทที่มีการจัดเรียงแบบ Inline และ Staggered

#### 4.2.2 ผลของรูปร่างออริฟิสและการจัดเรียงของเจ็ทกรณีที่ไม่พิจารณามุมปะทะ

รูปที่ 4.17 (ก), (ข) และ 4.18 (ก), (ข) แสดงผลของรูปร่างออริฟิสและการจัดเรียงของเจ็ทกรณีที่มีมุมปะทะ  $\theta=0^\circ$  จากรูปพบว่ากรณีที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ของเจ็ท  $AR=4$  และ  $8$  (รูปที่ 4.17 (ก) และ รูปที่ 4.18 (ก)) บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนขยายตามแนวแกน X และมีขนาดลดลงตามแนวแกน Z เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี  $AR=1$  นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหลของเจ็ท  $AR=4$  และ  $8$  เลื่อนไปในทิศทาง  $+X$  น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของ  $AR=1$  จากผลการทดลองแสดงถึงเจ็ทกรณี  $AR=4$  และ  $8$  สามารถลดผลของกระแสไหลตัดมากกว่ากรณีของเจ็ท  $AR=1$  ซึ่งสอดคล้องกับผลของการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (รูปที่ 4.1, 4.3 และ 4.4)

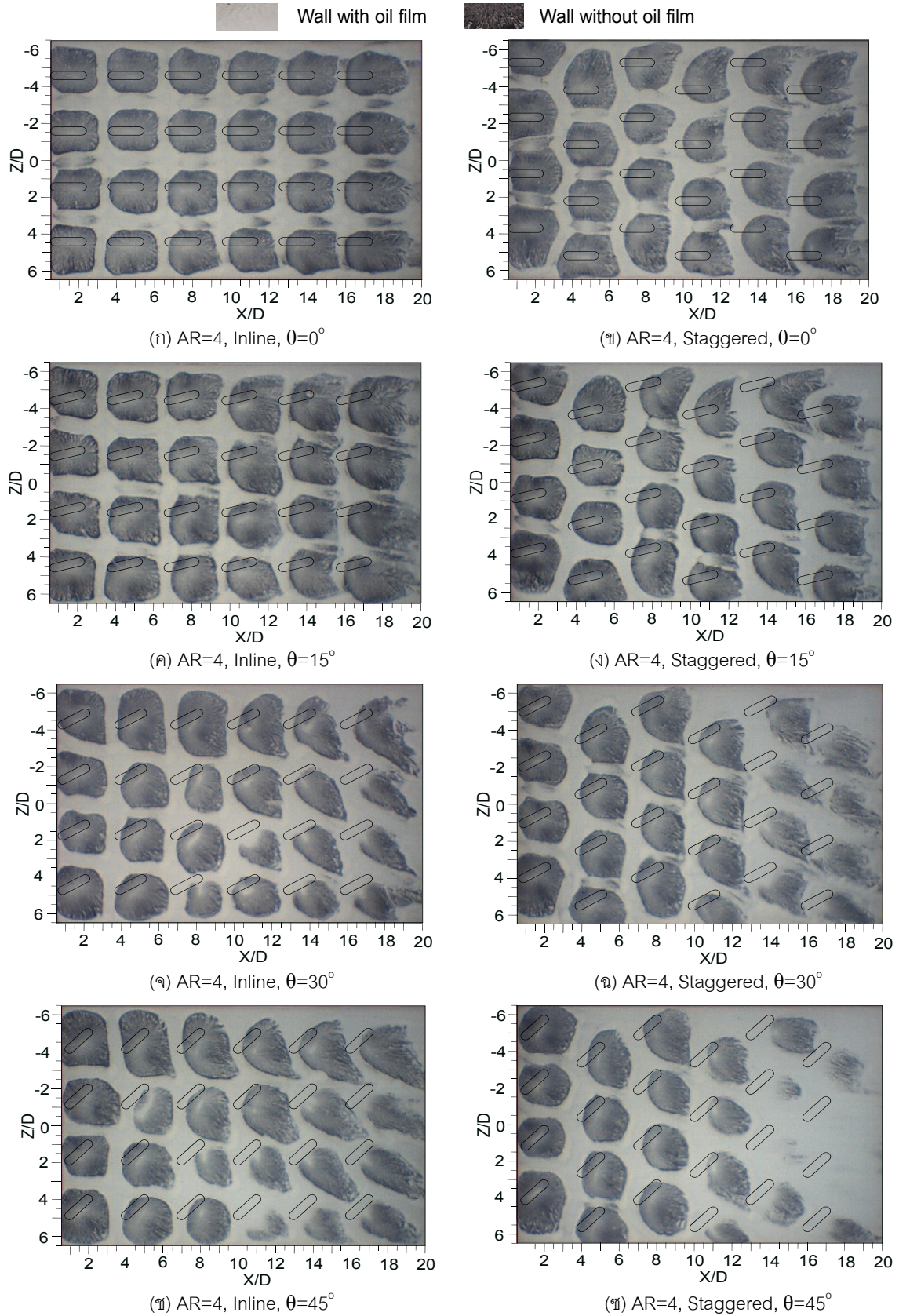
ในกรณีที่มีการจัดเรียงเป็นแบบ Staggered พบว่ากรณีของ  $AR=4$  (รูปที่ 4.18 (ก)) บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทแต่ละลำขยายกว้างในทิศทาง  $+Z$  เมื่อเทียบกับผลของเจ็ท  $AR=1$  (รูปที่ 4.15 (ก)) และบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทแต่ละลำมีพื้นที่ขนาดแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี  $AR=4$  ที่มีการจัดเรียงแบบ Inline (รูปที่ 4.17 (ก)) แต่อย่างไรก็ตามในกรณีของ  $AR=8$  ที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered (รูปที่ 4.18 (ข)) พบว่าบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนกลับมีพื้นที่แคบกว่ากรณีของ  $AR=1$  และ 4 โดยเฉพาะบริเวณปลายทางการไหล จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติของเจ็ท  $AR=4$  สามารถลดผลของกระแสไหลตัดได้ดีกว่า  $AR=1$  ในสภาพที่มีผลของกระแสไหลตัดอย่างมากเนื่องจากการจัดเรียงแบบ Staggered สำหรับกรณีของเจ็ท  $AR=8$  ที่บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนมีพื้นที่เล็กกว่ากรณีของ  $AR=4$  นั้น เนื่องจากเจ็ทมีคุณสมบัติยาวและบางกว่าเจ็ท  $AR=4$  ส่งผลทำให้เจ็ทเกิดการผสมกับกระแสไหลตัดได้มากกว่ากรณีของเจ็ท  $AR=4$  ดังนั้นโมเมนตัมที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจึงลดลง

#### 4.2.3 ผลของรูปร่างออรัลฟิสและการจัดเรียงของเจ็ทกรณีศึกษากรณีมุมปะทะ

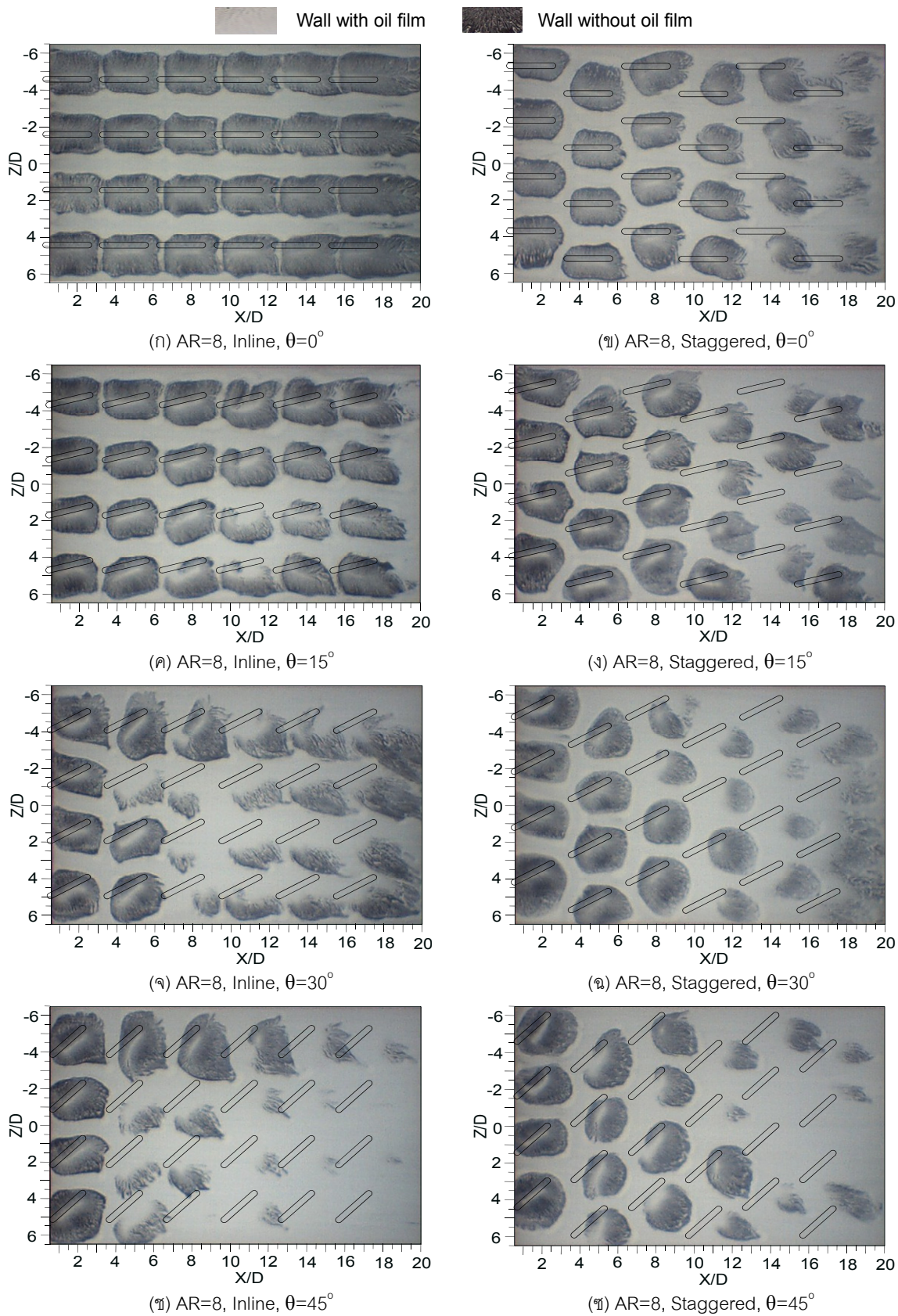
รูปที่ 4.17 (ก), (ค), (จ) และ (ช) แสดงผลของมุมปะทะ  $\theta=0^\circ-45^\circ$  ที่มีต่อการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวกรณี  $AR=4$  การจัดเรียงของเจ็ทเป็นแบบ Inline จากรูปพบว่าเมื่อมุมปะทะเพิ่มจากศูนย์เป็น  $\theta=15^\circ$  (รูปที่ 4.17 (ค)) ทำให้บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทแต่ละลำขยายกว้างในแนวทิศทาง  $+Z$  และเมื่อมุมปะทะเพิ่มเป็น  $\theta=30^\circ$  และ  $45^\circ$  (รูปที่ 4.17 (จ) และ (ช)) บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทแต่ละลำขยายกว้างในทิศทาง  $+Z$  และมีขนาดลดลงในทิศทาง  $-Z$  โดยบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหล ( $9 < X/D < 20$ ) มีขนาดลดลงกว่ากรณีที่ไม่มีมุมปะทะ  $\theta=0^\circ$  (รูปที่ 4.17 (ก)) จากการเพิ่มขึ้นของมุมปะทะมีผลทำให้กระแสไหลตัดไหลในแนวเฉียงทำมุมกับแนวการไหลหลัก ซึ่งจะส่งผลทำให้จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) ของเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหลจะเลื่อนมากไปทางทิศทาง  $+X$  และ  $+Z$  ซึ่งจะแตกต่างกันกับกรณีที่ไม่มีมุมปะทะ (รูปที่ 4.17 (ก)) ที่เลื่อนเพียงทิศทางเดียวคือ  $+X$  จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของมุมปะทะเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการปะทะระหว่างกระแสเจ็ทกับกระแสไหลตัด ซึ่งส่งผลทำให้เจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งปลายทางการไหลได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดในแนวเฉียงอย่างรุนแรง ทำให้บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนมีขนาดลดลง ยกเว้นกรณีที่มีมุมปะทะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย  $\theta=15^\circ$  ซึ่งส่งผลทำให้บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทแต่ละลำที่อยู่ในทิศทาง  $+Z$  ขยายกว้างกว่ากรณี  $AR=1$  และไม่ส่งผลต่อขนาดบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทแต่ละลำที่อยู่ในทิศทาง  $-Z$

ในกรณีเจ็ท  $AR=8$  ที่มีการจัดเรียงเป็นแบบ Inline (รูปที่ 4.18 (ก), (ค), (จ) และ (ช)) พบว่า เมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้นทำให้บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนลดพื้นที่ลงอย่างมากโดยเฉพาะบริเวณปลายทางการไหล เนื่องจากคุณสมบัติของเจ็ท  $AR=8$  มีพื้นที่หน้าตัดยาวกว่ากรณี  $AR=4$  ซึ่งการเพิ่มของมุมปะทะในสภาพที่เจ็ทมีพื้นที่หน้าตัดยาวมาก เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการปะทะระหว่างกระแสการไหลของเจ็ทและกระแสไหลตัด ส่งผลทำให้บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนกรณีของ  $AR=8$  มีพื้นที่ลดลงกว่ากรณี  $AR=4$  ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์

ในกรณีที่เปรียบเทียบระหว่างการจัดเรียงแบบ Inline และแบบ Staggered ของเจ็ท  $AR=4$  และ 8 (เปรียบเทียบระหว่างรูปด้านซ้ายและด้านขวาของรูป 4.17 และ 4.18 ที่มุมปะทะเดียวกัน) พบว่าการจัดเรียงของเจ็ทแบบ Staggered มีผลทำให้บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนมีพื้นที่ลดลงกว่าการจัดเรียงแบบ Inline ทุกกรณี โดยเฉพาะบริเวณปลายทางการไหลและที่มุมปะทะมากที่สุด ยกเว้นกรณีเจ็ท  $AR=8$  ที่มุม  $\theta=30^\circ$  และ  $45^\circ$  ซึ่งบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทที่อยู่ต้นทางการไหลกรณีการจัดเรียงแบบ Staggered มีขนาดกว้างกว่าเมื่อเทียบกับกรณีการจัดเรียงแบบ Inline (เปรียบเทียบระหว่างรูป 4.18 (จ) กับ (ค) สำหรับมุม  $\theta=30^\circ$  และ 4.18 (ช) กับ (ข) สำหรับมุม  $\theta=45^\circ$ )



รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิววงรี AR=4 ( $Re_E=13,400$ )



รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิววงรี AR=4 ( $Re_E=13,400$ )

#### 4.3 ลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว

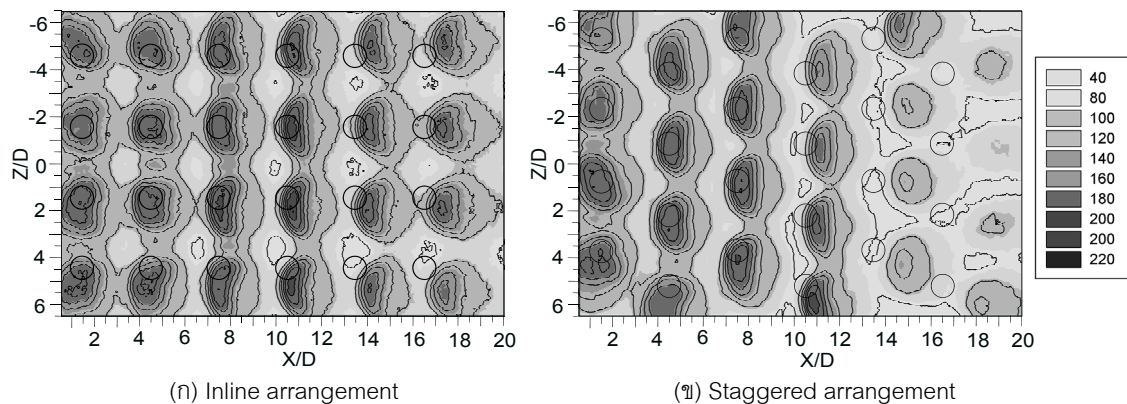
รูปที่ 4.19-4.21 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจากผลการทดลองโดยใช้เทอร์มิโคโรมิคัลลิควิดคริสตัล โดยภาพรวมของผลการทดลองพบว่า ลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์สอดคล้องกับลักษณะการไหลบนพื้นผิวที่ได้จากการทดลองโดยใช้ฟิล์มน้ำมัน และเหมือนกับลักษณะการกระจายความเร็วในแนวแกน Y ที่ได้จากการศึกษาลักษณะการไหลโดยใช้แบบจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ ในแต่ละรูป บริเวณที่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูง ( $Nu > 180$ ) เป็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง และบริเวณที่นัสเซิลต์นัมเบอร์ต่ำ ( $Nu < 180$ ) เป็นบริเวณที่เกิดการผสมระหว่างเจ็ทผนังและรวมตัวกันไหลเป็นกระแสไหลตัด

##### 4.3.1 ผลของการจัดเรียงของเจ็ทกรณี $AR=1$

ในกรณีที่มีการจัดเรียงแบบ Inline ของเจ็ทกรณี  $AR=1$  (รูปที่ 4.19 (ก)) พบว่านัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนและมีค่าต่ำในบริเวณที่เจ็ทไม่พุ่งชนโดยตรงและนัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณระหว่างแถวของเจ็ทมีค่าสูงกว่าบริเวณระหว่างคอลัมน์ สำหรับบริเวณต้นทางการไหล (เจ็ทคอลัมน์ 1-3 นับจากต้นทางการไหล) บริเวณที่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูง ( $Nu > 180$ ) เกิดขึ้นตรงกับตำแหน่งของรูหัวฉีดแต่ละรู แต่สำหรับบริเวณปลายทางการไหล (เจ็ทคอลัมน์ 4-6 นับจากต้นทางการไหล) บริเวณที่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงเลื่อนไปในทิศทางปลายทางการไหล ซึ่งเกิดจากผลของกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูงในบริเวณปลายทางการไหลและไหลตัดผ่านลำเจ็ทที่กำลังพุ่งชนพื้นผิวตามที่ได้อธิบายในผลของแบบจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์

ในกรณีที่พิจารณานัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนแต่ละคอลัมน์ (รูปที่ 4.19 (ก)) พบว่าบริเวณที่นัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงสุด (Peak) ของเจ็ทคอลัมน์ที่ 4 (นับจากต้นทางการไหล) มีค่าสูงกว่านัสเซิลต์นัมเบอร์ของคอลัมน์อื่นๆ เนื่องจากเจ็ทคอลัมน์ที่ 4 อยู่ในตำแหน่งที่ได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดในระดับปานกลาง ซึ่งทำให้เป็นการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในกระแสเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว แต่สำหรับเจ็ทในคอลัมน์ที่ 5 และ 6 ได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดอย่างมาก ทำให้เจ็ทสูญเสียโมเมนตัมก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว ส่งผลทำให้นัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณดังกล่าวมีค่าลดลงกว่าคอลัมน์อื่นๆ โดยเฉพาะคอลัมน์ที่ 6

ในกรณีที่มีการจัดเรียงเป็นแบบ Staggered (รูปที่ 4.19 (ข)) พบว่าค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนค่อนข้างแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างบริเวณต้นทางและปลายทางการไหล โดยบริเวณต้นทางการไหลมีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงกว่าปลายทางการไหล โดยเฉพาะเจ็ทคอลัมน์สุดท้ายมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำมากและไม่สามารถระบุบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนได้ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวที่ทดลองด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน (รูปที่ 4.15 (ข))



รูปที่ 4.19 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณี  $AR=1$  ( $T_j=27^\circ\text{C}$ ,  $Re_e=13,400$ )



ในกรณีนี้ที่เปรียบเทียบระหว่างการจัดเรียงแบบ Inline และ Staggered (รูปที่ 4.19) พบว่าค่าตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวบริเวณต้นทางการไหล (เจ็ทคอลัมน์ 1-3 นับจากต้นทางการไหล) ของการจัดเรียงทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันไม่มาก แต่สำหรับการกระจายของตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์บริเวณปลายทางการไหล (เจ็ทคอลัมน์ 4-6 นับจากต้นทางการไหล) ของการจัดเรียงทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันมาก โดยเฉพาะการจัดเรียงแบบ Staggered ตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์บริเวณปลายทางการไหลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากต้นทางการไหลสู่ปลายทางการไหล

#### 4.3.2 ผลของรูปร่างออริฟิสและการจัดเรียงของเจ็ทกรณีที่ไม่พิจารณามุมปะทะ

รูปที่ 4.20 (ก), (ข) และ 4.21 (ก), (ข) แสดงผลของรูปร่างออริฟิสและการจัดเรียงของเจ็ทกรณีที่ไม่พิจารณามุมปะทะ  $\theta=0^\circ$  ที่มีต่อลักษณะของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว จากผลการทดลองกรณีการจัดเรียงแบบ Inline พบว่า บริเวณที่มีค่าตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์สูง ( $Nu>180$ ) ของเจ็ท  $AR=4$  และ  $8$  (รูปที่ 4.20 (ก), (ข)) ขยายในแนวแกน X เมื่อเปรียบเทียบกับผลของ  $AR=1$  (รูปที่ 4.19 (ก)) อย่างไรก็ตามเฉพาะในกรณี  $AR=8$  บริเวณที่มีค่าตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์สูง ( $Nu>180$ ) มีขนาดแคบลงในแนวแกน Z เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี  $AR=1$  และ  $4$

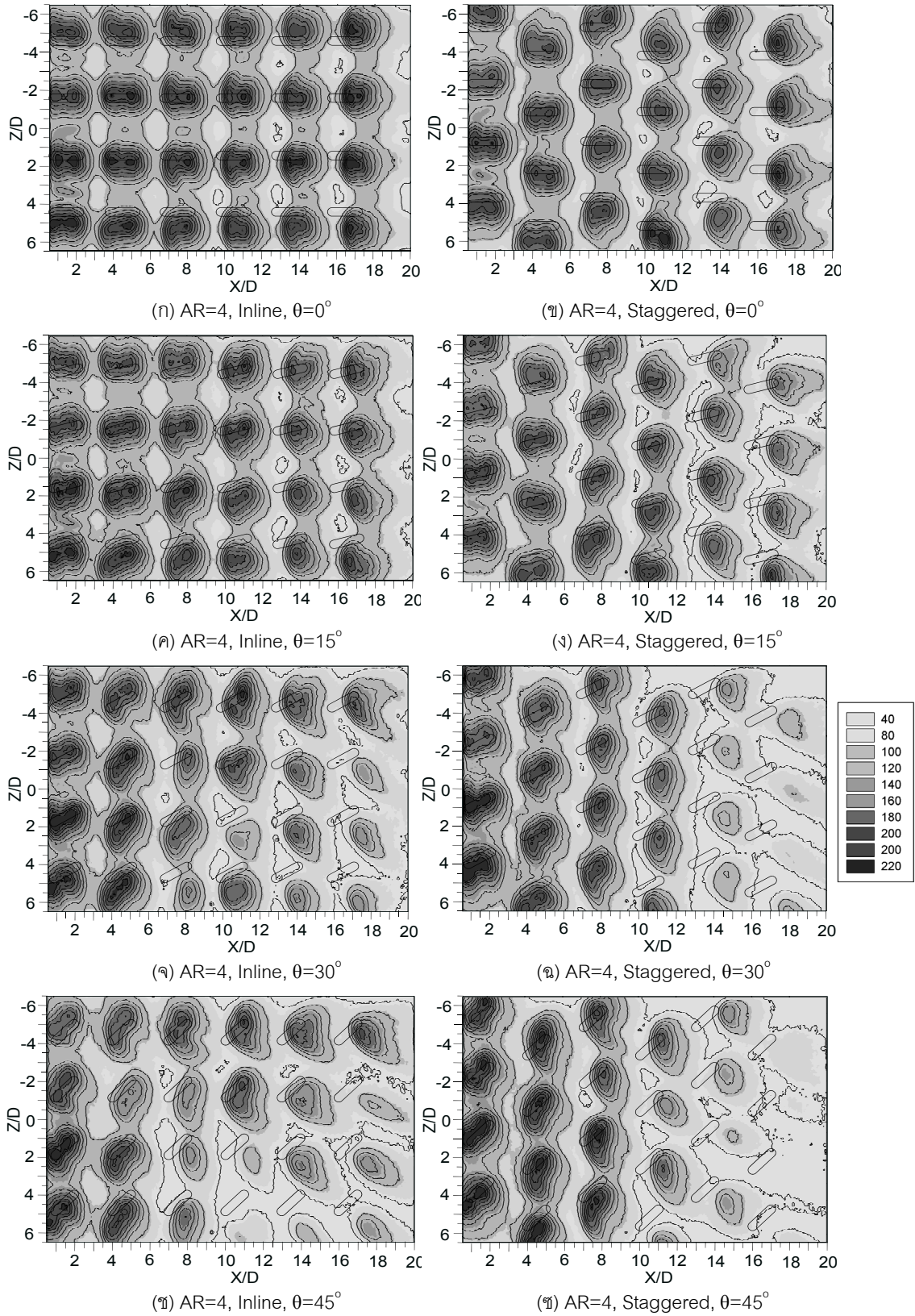
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เจ็ทกรณี  $AR=4$  สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนได้สูงกว่ากรณี  $AR=1$  เนื่องจากคุณสมบัติของเจ็ทสามารถลดอิทธิพลของกระแสไหลตัดตามที่ได้อธิบายในลักษณะการไหลจากผลของฟิล์มน้ำมันและ CFD แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความยาวของออริฟิสเป็น  $AR=8$  กลับพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนต่ำกว่า  $AR=4$  ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนลดลงสอดคล้องกับความเร็วที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวลดลงตามที่ได้แสดงลักษณะการไหลโดยใช้ CFD (เปรียบเทียบระหว่างรูป 4.9(ข) สำหรับ  $AR=4$  และ 4.9(ค) สำหรับ  $AR=8$ )

ในกรณีนี้ที่เปรียบเทียบระหว่างการจัดเรียงแบบ Inline และ Staggered โดยภาพรวมพบว่า การจัดเรียงแบบ Staggered ส่งผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงทุกกรณีเมื่อเปรียบเทียบกับ การจัดเรียงแบบ Inline ที่เงื่อนไขเดียวกัน โดยเฉพาะกรณี  $AR=8$  (รูปที่ 4.21 (ข)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณปลายทางการไหลลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเจ็ท  $AR=8$  ไม่สามารถพุ่งชนพื้นผิวได้อย่างรุนแรงในสภาพที่มีอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มากเนื่องจากการจัดเรียงแบบ Staggered ซึ่งแตกต่างกับกรณี  $AR=4$  (รูปที่ 4.20 (ข)) ที่สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนสูงถึงแม้ว่าเป็นการจัดเรียงแบบ Staggered

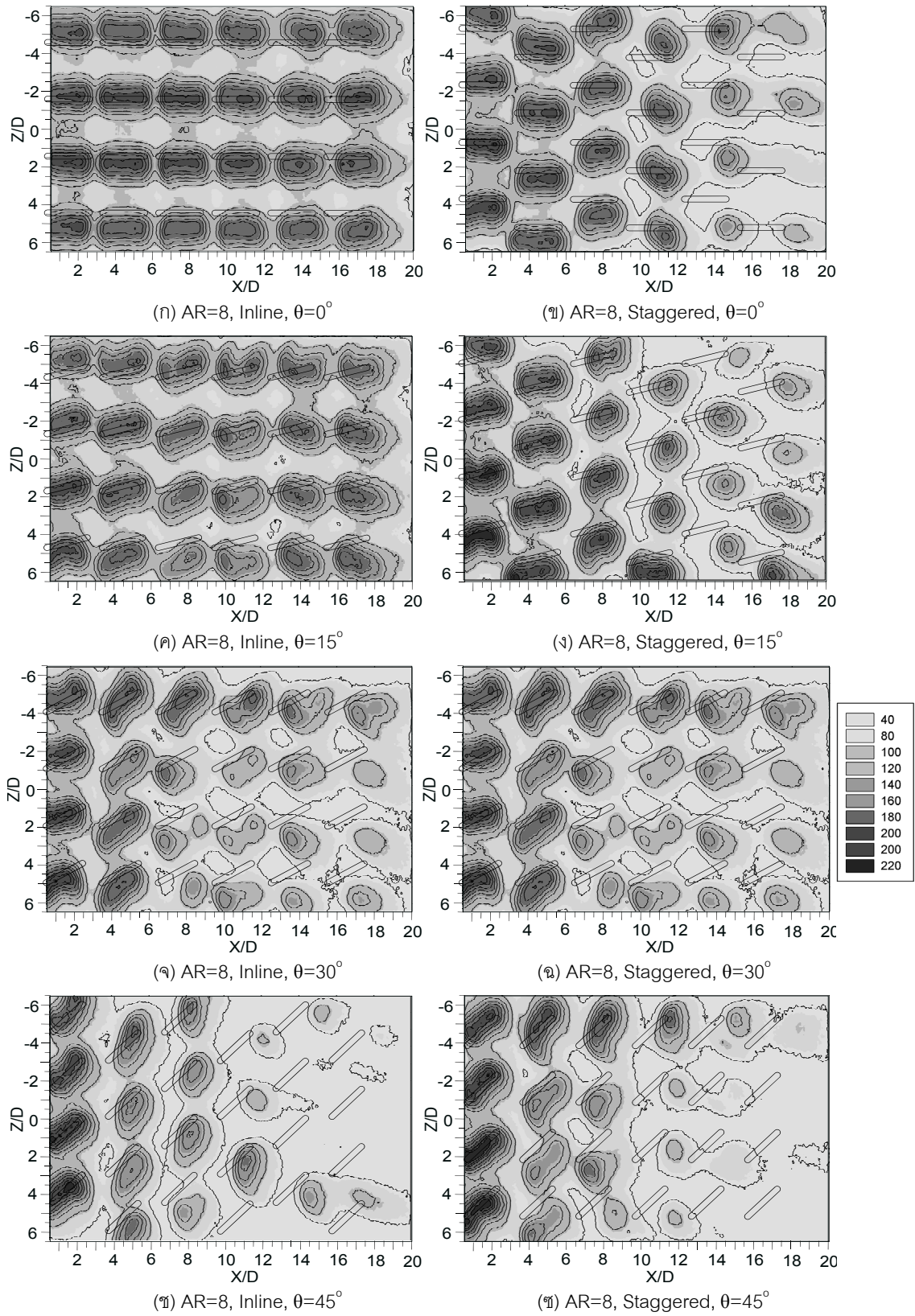
#### 4.3.3 ผลของรูปร่างออริฟิสและการจัดเรียงของเจ็ทกรณีพิจารณามุมปะทะ

รูปที่ 4.20-4.21 แสดงผลของรูปร่างออริฟิสและการจัดเรียงของเจ็ทที่มีมุมปะทะที่มีต่อการกระจายของตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์บนพื้นผิว จากรูปพบว่าตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์ที่กระจายในบริเวณปลายทางการไหล ( $9<X/D<20$ ) ของการจัดเรียงทั้งสองแบบมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของมุมปะทะ ซึ่งจะแตกต่างกับตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์ที่กระจายในบริเวณต้นทางการไหล ( $1>X/D>9$ ) ค่าตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์ของการจัดเรียงแบบ Staggered มีค่าสูงกว่าของการจัดเรียงแบบ Inline โดยสามารถเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.20 (ก) กับ 4.20 (ข) และ รูปที่ 4.20 (ข) กับ 4.20 (ค) สำหรับเจ็ท  $AR=4$  มุมปะทะ  $\theta=30^\circ$  และ  $45^\circ$  ตามลำดับ และเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.21 (ก) กับ 4.21 (ข) และ รูปที่ 4.21 (ข) กับ 4.21 (ค) สำหรับเจ็ท  $AR=8$  มุมปะทะ  $\theta=30^\circ$  และ  $45^\circ$  ตามลำดับ

สำหรับบริเวณที่มีค่าตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์สูง ( $Nu>180$ ) ในตำแหน่งที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทแต่ละลำขยายบริเวณกว้างในตำแหน่งปลายทางการไหล (แกน X) และเยื้องไปทางแกน +Z เมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้น สำหรับการขยายตัวของบริเวณที่มีค่าตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์สูงที่ขยายไปในทิศทางแกน X เกิดจากผลกระทบของกระแสไหลตัด และการขยายตัวของบริเวณที่มีค่าตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์สูงในแนวแกน +Z เกิดจากผลของมุมปะทะ โดยลักษณะการกระจายของตัวเลขดีเอ็นบีเบอร์บนพื้นผิวสอดคล้องกับลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวตามที่ได้อธิบายมาแล้ว



รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะการกระจายของน้ำเสียดันน์เบอร์บนพื้นผิวกรณี่ AR=4 ( $T_j=27^\circ\text{C}$ ,  $Re_E=13,400$ )

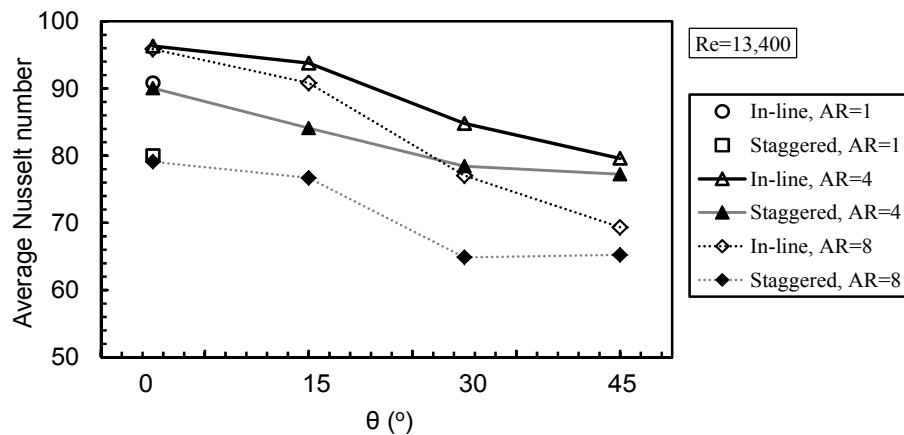


รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะการกระจายของน้สเคล็ดน้มเบอร์บนพื้นผิวกรณี AR=8 ( $T_j=27^\circ\text{C}$ ,  $Re_E=13,400$ )

#### 4.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว

รูปที่ 4.22 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่คำนวณได้จากสมการ 2.11 จากรูปพบว่ากรณี  $AR=1$  ของการจัดเรียงแบบ In-line ให้ค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่ากรณีที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered สำหรับการจัดเรียงแบบ In-line ของเจ็ทหน้าตัดวงกลมยาวที่ไม่มีมุมปะทะให้ค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวสูงกว่ากรณีอื่นๆ โดยที่  $AR=4$ ,  $\theta=0^\circ$  มีค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุด รองลงมาเป็นแบบ  $AR=8$ ,  $\theta=0^\circ$  สำหรับในกรณี  $AR=8$ ,  $\theta=30^\circ$  และ  $45^\circ$  มีค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยต่ำสุด โดยผลต่างของค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยของมุมทั้งสองแตกต่างกันไม่มาก

สำหรับผลของมุมปะทะที่มีต่อค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวพบว่า โดยภาพรวมแล้วค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวลดลงตามการเพิ่มขึ้นของมุมปะทะ โดยเฉพาะในกรณี  $AR=8$  ที่มีการจัดเรียงแบบ In-line ลักษณะการลดลงของเส้นกราฟค่อนข้างชันมากเมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้น แต่ค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยยังคงสูงกว่ากรณีการจัดเรียงแบบ Staggered



รูปที่ 4.22 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัมเบอร์ที่เฉลี่ยทั้งพื้นผิว

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ดังนี้

(1) ความเร็วของกระแสไหลตัดบริเวณปลายทางการไหลมีค่าสูงกว่าบริเวณต้นทางการไหล ดังนั้นเจ็ทที่อยู่ตำแหน่งบริเวณปลายทางการไหลจะได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดมากกว่าบริเวณต้นทางการไหล ส่งผลทำให้บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณที่น้ำสเชิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงเลื่อนไปในทิศทางปลายทางการไหลของกระแสไหลตัด นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณที่น้ำสเชิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงของเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหลขยายกว้างในแนวการไหลของกระแสไหลตัด สำหรับน้ำสเชิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวโดยภาพรวมพบว่า บริเวณต้นทางการไหลมีค่าสูงกว่าบริเวณปลายทางการไหล

(2) การกระจายของค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์ในกรณี  $AR=1$  ของการจัดเรียงแบบ Inline พบว่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์ที่มีค่าสูงสุด (Peak) ของเจ็ทคอลัมน์ที่ 4 (นับจากต้นทางการไหล) มีค่าสูงกว่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์ของคอลัมน์อื่นๆ เนื่องจากเจ็ทคอลัมน์ที่ 4 อยู่ในตำแหน่งที่ได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดในระดับปานกลาง ซึ่งเป็นการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในกระแสเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว แต่สำหรับเจ็ทในคอลัมน์ที่ 5 และ 6 ได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดอย่างมาก ทำให้เจ็ทสูญเสียโมเมนตัมก่อนที่พุ่งชนพื้นผิว ส่งผลทำให้ค่าสเชิลต์นัมเบอร์บริเวณดังกล่าวมีค่าลดลงกว่าคอลัมน์อื่นๆ โดยเฉพาะคอลัมน์ที่ 6

(3) การจัดเรียงของเจ็ทมีผลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวดังนี้ การจัดเรียงแบบ Inline ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณปลายทางการไหลสูงกว่าแบบ Staggered เนื่องจาก จัดเรียงแบบ Inline มีผลทำให้กระแสไหลตัดสามารถไหลผ่านช่องว่างระหว่างแถวของเจ็ทตลอดแนวจากต้นทางการไหลสู่ปลายทางการไหลโดยไม่มีกระแสเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหลกีดขวาง ซึ่งแตกต่างกับในกรณีการจัดเรียงของเจ็ทแบบ Staggered ที่กระแสไหลตัดไหลชนกับกระแสเจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหล ทำให้เจ็ทที่อยู่ปลายทางการไหลได้รับผลของกระแสไหลตัดมากกว่าในการจัดเรียงแบบ Inline

(4) ในการออกแบบออริฟิสที่มีลักษณะวงกลมยาว (Elongated round orifice) สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้สูงกว่าออริฟิสแบบวงกลม (Round orifice) เนื่องจากคุณสมบัติของออริฟิสวงกลมยาวสามารถลดพื้นที่ในการปะทะระหว่างเจ็ทและกระแสไหลตัด ทำให้เจ็ทที่พุ่งออกจากออริฟิสแบบวงกลมยาวสามารถปะทะพื้นผิวได้แรงกว่ากรณีออริฟิสแบบหน้าตัดวงกลม

(5) ผลของอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (AR) ของออริฟิสมีผลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนดังนี้ ความเร็วในการพุ่งชนพื้นผิวและอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ท  $AR=8$  ต่ำกว่ากรณี  $AR=4$  เนื่องจากเจ็ทที่พุ่งออกจากออริฟิส  $AR=8$  มีลักษณะพื้นที่หน้าตัดบางและยาว ทำให้เจ็ทเกิดการผสมกับอากาศรอบๆ ได้ดี ส่งผลทำให้ความเร็วของเจ็ทลดลงอย่างรวดเร็วก่อนพุ่งชนพื้นผิว

(6) มุมปะทะที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความเร็วในการพุ่งชนและอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงทุกกรณี เนื่องจากมุมปะทะที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการปะทะระหว่างเจ็ทและกระแสไหลตัด โดยเฉพาะเจ็ทที่อยู่ด้านปลายทางการไหลซึ่งจะได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ส่งผลทำให้ลำเจ็ทเกิดการโน้มเอียงไปทางการไหลของกระแสไหลตัดและเกิดการสูญเสียโมเมนตัมก่อนพุ่งชนพื้นผิว

(7) อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของเจ็ท AR=4 ของการจัดเรียงแบบ Inline ที่ไม่มีมุมปะทะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุด โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าเจ็ท AR=1 เป็นค่า 6.04% รองลงมาเป็นแบบ AR=8 ที่มีการจัดเรียงของเจ็ทและมุมปะทะแบบเดียวกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าเจ็ท AR=1 เป็นค่า 5.54% สำหรับในกรณีเจ็ท AR=8 ที่มีการจัดเรียงแบบ Staggered ที่มีมุมปะทะ  $\theta=30^\circ$  และ  $45^\circ$  ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยต่ำกว่ากรณีอื่นๆ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาผลของรูปร่างออริฟิส การจัดเรียงของเจ็ทและมุมปะทะที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในเบื้องต้น ในการศึกษาขั้นต่อไปอาจจะต้องปรับปรุงและเพิ่มขอบเขตในการทำวิจัยดังนี้

(1) ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของออริฟิสให้ละเอียดขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างอยู่ในช่วงที่กว้าง (AR=4 และ 8) ซึ่งไม่สามารถกำหนดตัวแปรที่ละเอียดว่าช่วง AR ใดที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

(2) ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างลำเจ็ท และระยะปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน เนื่องจากทั้งสองตัวแปรยังไม่มีการวิจัยที่ศึกษาในกรณีของเจ็ทแบบวงกลมยาว

(3) ศึกษาผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ เนื่องจากผลของมุมปะทะอาจจะมีส่วนช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นในกรณีที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ

## บรรณานุกรม

- [1] Viskanta R., 1993, Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, pp. 111-134.
- [2] Baughn, J. W. and Shimizu S., 1989, Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet, *Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 1096–1098.
- [3] Gardon R. and Akfirat J. C., 1965, The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, pp. 1261-1272.
- [4] San J.Y. and Lai M.D., 2001, Optimum jet-to-jet spacing of heat transfer for Staggered arrays of impinging air jets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.44, pp. 3997-4007.
- [5] Geers, L. F. G., Tummers, M. J., Bueninck, T. J. and Hanjalic, K., 2008, Heat transfer correlation for hexagonal and in-line arrays of impinging jets, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.51, pp. 5389-5399.
- [6] Esposito, E. I., 2006, Jet Impingement cooling configurations for gas turbine combustion, Thesis of the Department of Mechanical Engineering, Louisiana State University.
- [7] Nakabe, K., Inaoka, K., Ai, T. and Suzuki, K., 1997, Flow visualization of longitudinal vortices induced by an inclined impinging jet in a crossflow – Effective cooling of high temperature gas turbine blades, *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, pp. 1145-1153.
- [8] Barata, J. M. M. and Dur̃ao, G. F. G., 2004, Laser-Doppler measurements of impinging jet flows through a crossflow, *Experiments in Fluid*, Vol. 36, pp. 665-674.
- [9] Patent US5,533,864, 1994, Turbine cooling blade having inner hollow structure with improved cooling.
- [10] Patent US6,000,908, 1999, Cooling for double-wall structures.
- [11] Patent US5,329,994, 1994, Jet impingement heat exchanger.
- [12] Patent US4,494,171, 1985, Impingement cooling apparatus for heat deliberating device.
- [13] Ashforth-Frost, S., and Jambunathan, K., 1996, Effect of nozzle geometry and semi-confinement on the potential core of a turbulent axisymmetric free jet, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, No 2, pp 155–162.
- [14] Ashforth-Frost, S., Jambunathan, K., and Whitney, C.F., 1997, Velocity and turbulence characteristics of a semiconfined orthogonally impinging slot jet, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 14, pp 60–67.
- [15] Bouchez J.P. and Goldstein R.J., 1975, Impingement cooling from a circular jet in a crossflow, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.18, pp. 719-730.
- [16] Nakabe K., Suzuki K., Inaoka K., Higashio A., Acton J.S., and Chen W., 1998, Generation of longitudinal vortices in internal flows with an inclined impinging jet and enhancement of target plate heat transfer, *Int J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 19, pp. 573-581.

- [17] Nakabe K., Fornalik E., Eschenbacher J. F., Yamamoto Y., Ohta T. and Suzuki K., 2001, Interactions of longitudinal vortices generated by twin inclined jets and enhancement of impingement heat transfer, *Int J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 22, pp. 287-292.
- [18] Sparrow E.M., Goldstein R.J. and Rouf M.A., 1975, Effect of nozzle-surface separation distance on impingement heat transfer for a jet in a crossflow, *Heat Transfer*, pp. 528-533.
- [19] Seifert, A. and Shemer, L., 1995, Plume rise from a chimney with an elongated exit cross section, *Atmospheric Environment*, Vol. 29, pp. 709-713.
- [20] New, T. H., Lim, T. T. and Luo, S. C., 2004, A flow field study of an elliptic jet in cross flow using DPIV technique, *Experiments in Fluids*, Vol. 36, pp. 604-618.
- [21] Chiu, H.-C., Jang J.-H. and Yan W.-M., 2009, Experimental study on the heat transfer under impinging elliptic jet array along a film hole surface using liquid crystal thermograph, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 4435-4448.
- [22] Incropera, F. P., Dewitt, D. P, Bergman, T. L. and Lavine, A. S., 2007, *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.
- [23] Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M., 2006, *Fluid Mechanics: fundamentals and applications*. International edition, McGraw-Hill Education (Asia), Printed in Singapore.
- [24] Katti, V. and Prabhu, S.V., 2008, Influence of spanwise pitch local heat transfer distribution for inline arrays of circular jets with air flow in two opposite, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 33, pp. 84-95.
- [25] Brizzi, L.-E., Bernard, A., Bousgarbies, J.-L., Dorignac, E., Dorigna, E. and Vullierme, J.-J., 2000, Study of several impinging jets, *J. of Thermal Science*, Vol. 9, pp. 217-223.
- [26] Brevet, P., Dejeu, C., Dorignac, E., Jolly, M. and Vullierme, J.J., 2002, Heat transfer to a row of impinging jets in consideration of optimization, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.45, pp. 4191-4200.
- [27] Bernard, A., Brizzi, L.-E. and Bousgarbies, J.-L., 2000, A comparison of flow visualization and wall pressure measurements for a jet impinging on a plane surface, *Experiments in Fluids*, Vol. 29, pp. 23-29.



## ภาคผนวก ก

โปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า H และอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล

```

% crop size
p1=140;% position x
p2=198;% position y
p3=47;% colum
p4=47;% row
} กำหนดพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

% image file input
name=char(filename(i));
image=imread(name);
} ป้อนภาพแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเข้าโปรแกรม MATLAB

Hue2=imcrop(Hue1,rect);
} ทำการตัดภาพให้เหลือเฉพาะที่แสดงเป็นแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

Hue3=double(Hue2)/255;
r=Hue3(:,,1);
g=Hue3(:,,2);
b=Hue3(:,,3);
} ทำการแยกสี RGB ที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

r1=sum(r:)/numel(r);
g1=sum(g:)/numel(g);
b1=sum(b:)/numel(b);
} ทำการเฉลี่ยตัวประกอบสี RGB

Angle=acos((0.5*((r1-g1)+(r1-b1)))/((sqrt((r1-g1).^2
+(r1-b1).*(g1-b1))))); %angle
Hue4=Angle; %B<=G
Hue4(b1>g1)=2*pi-Hue4(b1>g1); %B>G
} ทำการแปลงค่าเฉลี่ยตัวประกอบสี RGB ให้อยู่
ในรูปตัวประกอบ HSI

H=Hue4/(2*pi);
S=1-3.*(min(min(r1,g1),b1))/(r1+g1+b1);
I=(r1+g1+b1)/3;

```

## ภาคผนวก ข

โปรแกรม MATLAB สำหรับหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

```
lelect=34; %electrical current
R=0.034975; % thermal resistance of stainless foil
Astainless=0.29*0.199; % m^2
qelec=(lelect^2)*R/Astainless; %heat flux
Tj=27; %jet temperature
D=0.0132; %jet diameter
Kj=0.02604; %conductivity of jet
```

กำหนดค่าคงที่ที่ใช้ในการทดลอง

```
G=5.67*(10^(-8));
Etlc=0.9;
Ts=23.5; % ambient temperature
Ts1=Ts+273;
```

กำหนดค่าคงที่ของการสูญเสียความร้อนแบบแผ่รังสี

```
Wtlc=0.18;
Ltlc=0.268;
L=(Wtlc*Ltlc)/((Wtlc^2)+(Ltlc^2)); % characteristic length
beta=1/Ts1;
nu=15.89*10^-6; % @ 25 C
alpha=22.5*10^-6; % @ 25 C
Ks=0.0263;
```

กำหนดค่าคงที่ของการสูญเสียความร้อนแบบพาใน  
แนวระนาบ

```
pb1=32;% position x
pb2=88;% position y
pb3=482;% colum
pb4=288;% row
rect=[pb1 pb2 pb3 pb4];
```

กำหนดพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

```
rsum=zeros(pb4+1,pb3+1);
gsum=zeros(pb4+1,pb3+1);
bsum=zeros(pb4+1,pb3+1);
```

สร้างแมตริกส์ rsum gsum และ bsum ที่มีเลขศูนย์ทั้งหมด ซึ่งมี  
ขนาดจำนวนพิกเซลด้านกว้างและด้านยาวเท่ากับขนาดของพิกัดที่  
แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

```

name=char(filename(i))
image=imread(name);

```

} โหลดภาพแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเข้าโปรแกรม MATLAB

```

imaged=imcrop(image,rect);

```

} ทำการตัดภาพให้เหลือเฉพาะที่แสดงเป็นแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```

Hue3=double(imaged)/255;
rm=Hue3(:,,1);
gm=Hue3(:,,2);
bm=Hue3(:,,3);

```

} ทำการแยกสี RGB ที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```

rsum=rm+rsum;
gsum=gm+gsum;
bsum=bm+bsum;

```

} ทำการบวก rm gm และ bm จากค่าล่าสุดจนถึงค่าปัจจุบัน ในกรณีที่วิเคราะห์มากกว่า 2 รูป

```

r=rsum/a1;
g=gsum/a1;
b=bsum/a1;

```

} ทำการเฉลี่ยตัวประกอบสี RGB ตามจำนวนรูปที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยที่ตัวแปร a1 แทนด้วยจำนวนรูป

```

% RGB to HSI
Angle=acos((0.5*((r-g)+(r-b))./(sqrt((r-g).^2
+(r-b).*(g-b))))); %angle
Hue4=Angle;          %B<=G
Hue4(b>g)=2*pi-Hue4(b>g); %B>G

H=Hue4/(2*pi);
S=1-3.*(min(min(r,g),b))./(r+g+b);
I=(r+g+b)/3;

```

} ทำการแปลงค่าเฉลี่ยตัวประกอบสี RGB ให้อยู่ในรูปตัวประกอบ HSI

```

[a,b]=size(H);
Tem=zeros(a,b);

```

} สร้างแมตริกซ์ Tem (Temperature) ที่มีเลขศูนย์ทั้งหมด ซึ่งมีขนาดจำนวนพิกเซลด้านกว้างและด้านยาวเท่ากับขนาดของพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```

for j=1:a;
    for k=1:b;
        if H(j,k)<0.60779
            T=(60.146*H(j,k)^3)-(35.224*H(j,k)^2)
              +(8.5288*H(j,k))+27.168;
            Tem(j,k)=T;
        end

        if H(j,k)>0.60779
            T=(91158*H(j,k)^4)-(209333*H(j,k)^3)
              +(180380*H(j,k)^2)-(69093*H(j,k))+9953.9;
            Tem(j,k)=T;
        end
    end
end
end

```

} อุณหภูมิที่อยู่ในช่วง  $27^{\circ}\text{C} < T < 31^{\circ}\text{C}$

} อุณหภูมิที่อยู่ในช่วง  $31^{\circ}\text{C} < T < 33^{\circ}\text{C}$

} ทำการแปลงค่า H จากสมการตามที่ได้สอบเทียบเป็นอุณหภูมิและแทนอุณหภูมิลงในแมตริกส์ Tem

```
Taverage=sum(Tem(:))/numel(Tem);
```

} คำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิว

```
TWradi=Taverage+273;
qradi=G*Etlc*((TWradi^4)-(Ts1^4));
```

} คำนวณฟลักซ์สูญเสียความร้อนแบบแผ่รังสี

```
RaL=(9.81*beta*(Taverage-Ts)*(L^3))/(nu*alpha);
NuL=0.54*RaL^0.25;
hc=NuL*Ks/L;
qconvec=hc*(Taverage-Ts);
```

} คำนวณฟลักซ์การสูญเสียความร้อนแบบพาในแนว

```
q=qelec-qradi-qconvec;
```

} คำนวณฟลักซ์ความร้อนรวมบนพื้นผิว

```
[a,b]=size(Tem);
Nu=zeros(a,b);
```

} สร้างแมตริกส์ Nu (Nusselt number) ที่มีเลขศูนย์ทั้งหมด ซึ่งมีขนาดจำนวนพิกเซลด้านกว้างและด้านยาวเท่ากับขนาดของพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัล

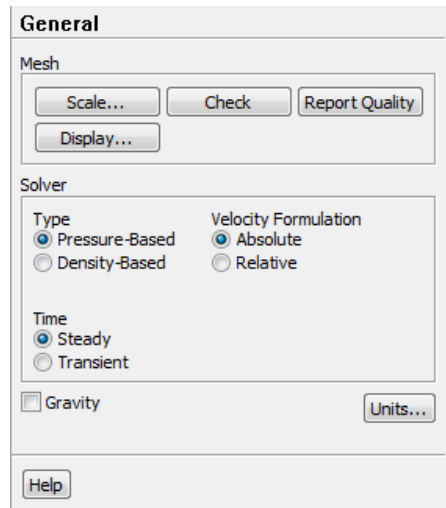
```
for j=1:a;
    for k=1:b;
        h=q/(Tem(j,k)-Tj);
        Nu1=h*D/Kj;
        Nu(j,k)=Nu1;
    end
end
```

คำนวณน้สเชิลต์น้มเบอร์ของแต่ละจุดภาพแล้วแทนลงในแมตริกส์  
Nu ซึ่งสามารถหาการกระจายของน้สเชิลต์น้มเบอร์บนพื้นผิว

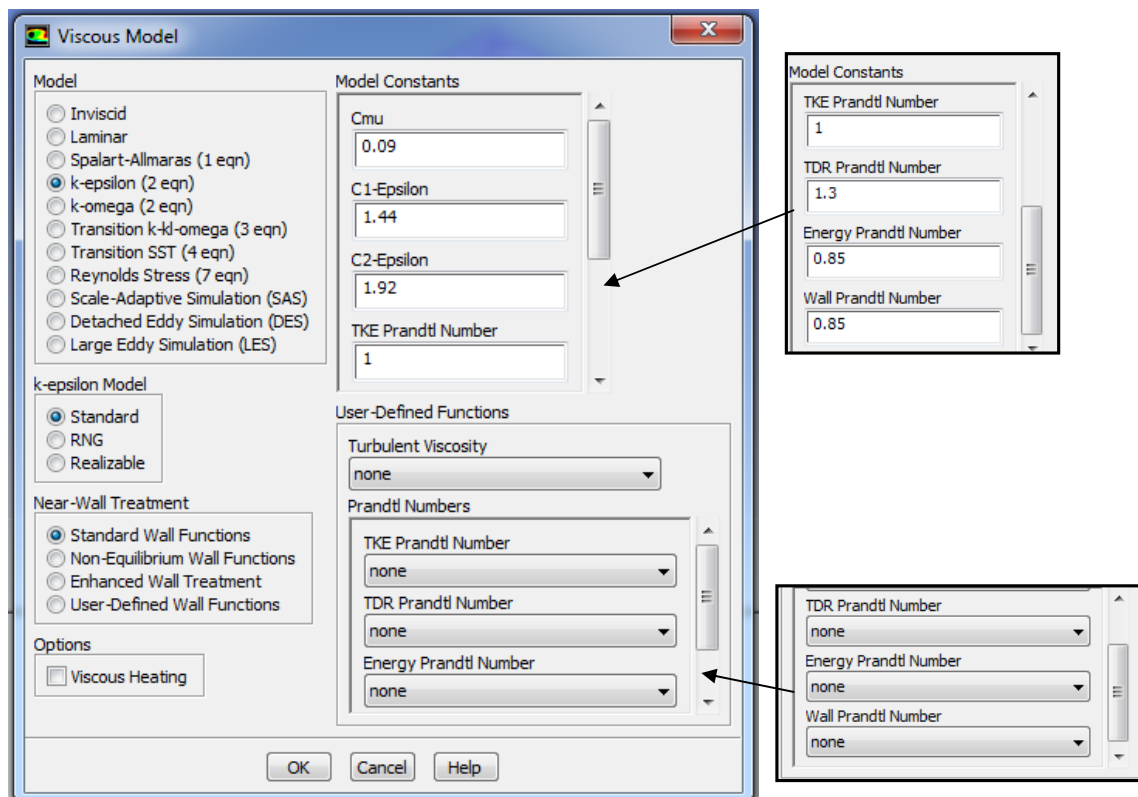
## ภาคผนวก ค

รายละเอียดของการใช้โปรแกรม Fluent ในการจำลองการไหล

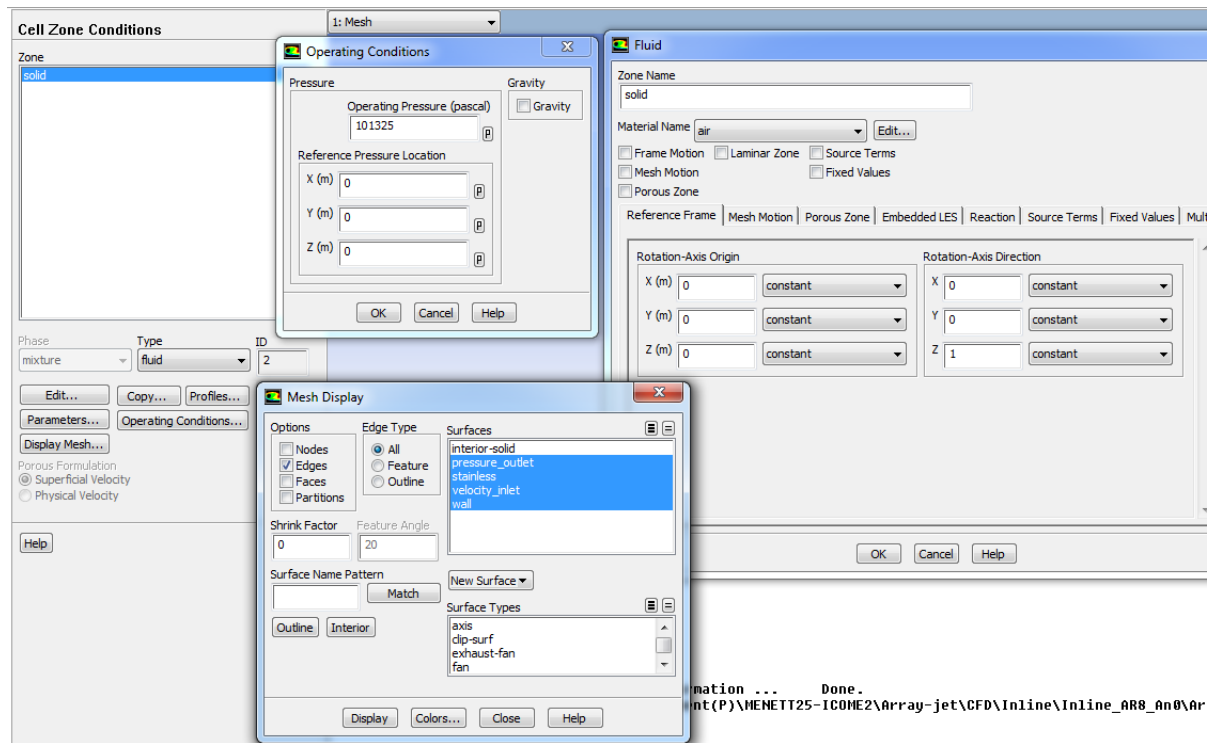
### 1. การกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ในหน้าต่าง General



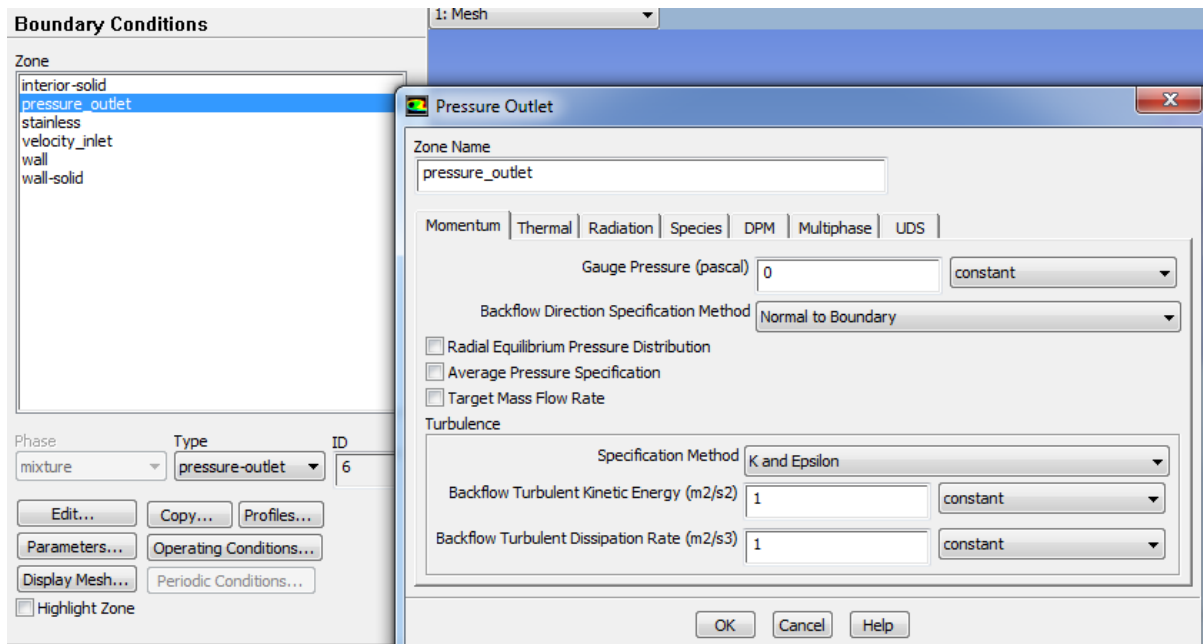
### 2. การกำหนดเงื่อนไขและค่าต่างๆ ในหน้าต่าง Model



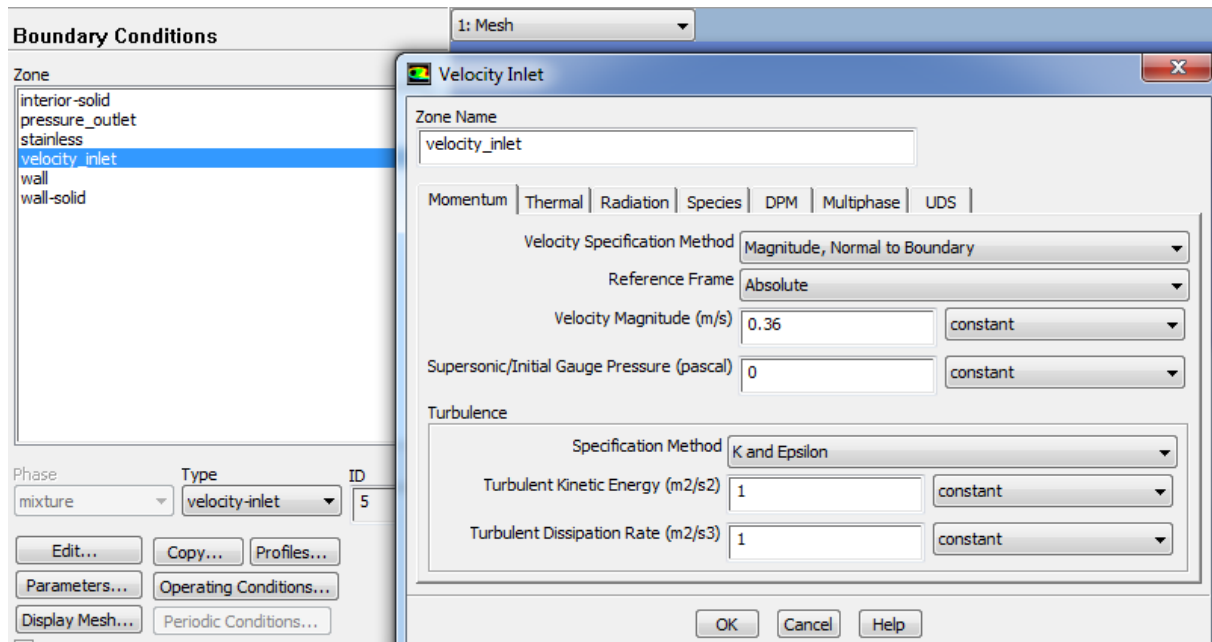
### 3. การกำหนดเงื่อนไขและค่าต่างๆในหน้าต่าง Cell Zone Conditions



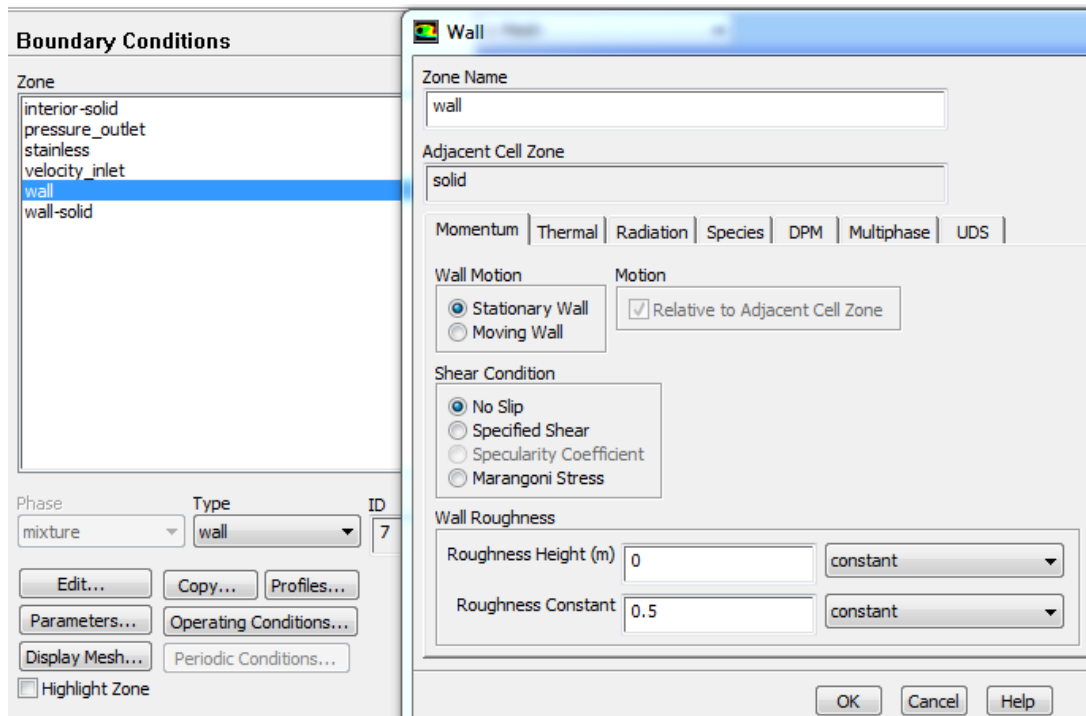
### 4. การกำหนดเงื่อนไขและค่าต่างๆในหน้าต่าง Boundary Conditions ในด้านของ Pressure outlet



5. การกำหนดเงื่อนไขและค่าต่างๆในหน้าต่าง Boundary Conditions ในด้านของ Velocity inlet



6. การกำหนดเงื่อนไขและค่าต่างๆในหน้าต่าง Boundary Conditions ในส่วนของ Wall





## 7. การกำหนดเงื่อนไขและค่าต่างๆในหน้าต่าง Reference Values

The image shows a dialog box titled "Reference Values". It contains a "Compute from" dropdown menu at the top. Below it is a section labeled "Reference Values" with several input fields: "Area (m2)" with value 1, "Density (kg/m3)" with value 1.225, "Enthalpy (j/kg)" with value 0, "Length (m)" with value 1, "Pressure (pascal)" with value 0, "Temperature (k)" with value 288.16, "Velocity (m/s)" with value 1, "Viscosity (kg/m-s)" with value 1.7894e-05, and "Ratio of Specific Heats" with value 1.4. At the bottom of this section is a "Reference Zone" dropdown menu. A "Help" button is located at the very bottom of the dialog box.

## 8. การกำหนดเงื่อนไขและค่าต่างๆในหน้าต่าง Solution Methods

The image shows a dialog box titled "Solution Methods". It has a "Pressure-Velocity Coupling" section with a "Scheme" dropdown menu set to "SIMPLE". Below that is a "Spatial Discretization" section with several dropdown menus: "Gradient" set to "Least Squares Cell Based", "Pressure" set to "Standard", "Momentum" set to "Second Order Upwind", "Turbulent Kinetic Energy" set to "Second Order Upwind", and "Turbulent Dissipation Rate" set to "Second Order Upwind". There is a "Transient Formulation" dropdown menu below that. At the bottom of this section are three checkboxes: "Non-Iterative Time Advancement", "Frozen Flux Formulation", and "Pseudo Transient", all of which are unchecked. A "Default" button is located below the checkboxes. A "Help" button is at the bottom of the dialog box.

## 9. การกำหนดเงื่อนไขและค่าต่างๆในหน้าต่าง Solution Controls

The image displays the ANSYS Fluent interface with the **Solution Controls** panel open. The **Solution Limits** dialog box is also open, showing various physical property limits. Below these, the **Advanced Solution Controls** dialog box is visible, detailing multigrid and algebraic multigrid parameters.

**Solution Limits Dialog:**

| Parameter                              | Value  |
|--|--------|
| Minimum Absolute Pressure (pascal)     | 1      |
| Maximum Absolute Pressure (pascal)     | 5e+10  |
| Minimum Static Temperature (k)         | 1      |
| Maximum Static Temperature (k)         | 5000   |
| Minimum Turb. Kinetic Energy (m2/s2)   | 1e-14  |
| Minimum Turb. Dissipation Rate (m2/s3) | 1e-20  |
| Maximum Turb. Viscosity Ratio          | 100000 |

**Advanced Solution Controls Dialog:**

**Multigrid | Multi-Stage | Expert**

| Variable   | Cycle Type | Termination | Restriction | AMG Method  | Stabilization Method |
|------------|------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|
| Pressure   | V-Cycle    | 0.1         |             | Aggregative | None                 |
| X-Momentum | Flexible   | 0.1         | 0.7         | Aggregative |                      |
| Y-Momentum | Flexible   | 0.1         | 0.7         | Aggregative |                      |

**Algebraic Multigrid Controls**

**Scalar Parameters**

| Parameter         | Value |
|-------------------|-------|
| Pre-Sweeps        | 0     |
| Post-Sweeps       | 1     |
| Max Cycles        | 30    |
| Max Coarse Levels | 20    |
| Coarsen by        | 2     |

**Flexible Cycle Parameters**

| Parameter              | Value |
|------------------------|-------|
| Sweeps                 | 2     |
| Max Fine Relaxations   | 30    |
| Max Coarse Relaxations | 50    |

**Options**

| Parameter | Value |
|-----------|-------|
| Verbosity | 0     |

**Smoother Type**

Gauss-Seidel  
 ILU

## 10. การกำหนดเงื่อนไขและค่าต่างๆในหน้าต่าง Solution Controls

**Solution Initialization**

Initialization Methods

Hybrid Initialization  
 Standard Initialization

Compute from  
▼

Reference Frame

Relative to Cell Zone  
 Absolute

Initial Values

Gauge Pressure (pascal)  
0

X Velocity (m/s)  
0

Y Velocity (m/s)  
0

Z Velocity (m/s)  
0

Turbulent Kinetic Energy (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)  
1

Turbulent Dissipation Rate (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>)  
1

Initialize   Reset   Patch...

Reset DPM Sources   Reset Statistics

Help

**ภาคผนวก ง.1**  
**การนำเสนอผลงานทางวิชาการ**

The 5<sup>th</sup> PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2011), Phuket, May 2-3,  
2011 Prince of Songkla University, Faculty of Engineering Hat Yai, Songkhla, Thailand



# EFFECT OF VELOCITY RATIO ON FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF AN IMPINGING JET IN CROSSFLOW

M. Wae-hayee<sup>1</sup>, C. Nuntadusit<sup>1\*</sup>, P. Tekasakul<sup>1</sup>

1. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, Thailand

\*Authors to correspondence should be addressed via email: chayut@me.psu.ac.th

**Abstract:** The effect of velocity ratio (VR, ratio of jet velocity to crossflow velocity) on flow and heat transfer characteristics on an impinging jet with crossflow was investigated. The air jet issued from circular orifice and then impinged normal to heated surface in wind tunnel. The jet-to-plate distance ( $H$ , wind tunnel height) was fixed at  $2D$  ( $D$  is orifice diameter). The velocity ratios were varied from  $VR=3, 5$  and  $7$ . The temperature distribution on an impinged surface was visualized by using thermochromic liquid crystal sheet (TLCs) and Nusselt number distribution was evaluated with image processing technique. The flow patterns on impinged surface were visualized by using oil film technique. The numerical simulation was also employed to gain insight into the fluid flow of jet impingement in the crossflow. The results show that the averaged Nusselt number was highest in case of  $VR=5$ . The heat transfer in jet impingement region was enhanced when increasing  $VR$  from  $0$  to  $5$  and the heat transfer was decreased again when increasing  $VR$  from  $5$  to  $7$ . The locations of maximum Nusselt number were shifted to downstream direction due to crossflow and the interaction between impinged jet and cross flow near the wall was revealed.

**Key Words:** Impinging jet, Crossflow, Thermochromic liquid crystal sheet, CFDs

## 1. INTRODUCTION

Jet impingement is a high-performance technique for heat transfer enhancement in thermal equipment. It has been also used in industrial process for a heating, cooling or drying. It provides for rapid cooling or heating on local heat transfer area. However, the heat transfer rate is very high on jet directly impinged area. Many of thermal industrial applications have large heat transfer area such as, a combustor wall chamber and gas turbine blade cooling, steel and glass quenching, textile and paper drying. A high and uniform heat transfer rate is required over entire that areas. Hence, multiple of impinging jets are applied.

Multiple of impinging jets are formed by number of individual jet impingements. The flow and heat transfer characteristics of multiple impinging jets are influenced by two interactions. First is an interaction between adjacent before impingement wall and secondly, the wall jets formed by the adjacent jets collide on the target surface [1]. Another parameter that influences multiple jet impingements in a confined space is the crossflow. The crossflow is defined as the fluid flow in the direction perpendicular to the jet impingement flow. The crossflow can be either due to external flow resource or due to accumulated spent jet fluid flow. The crossflow has been found to significantly reduce the heat transfer of impinging jet in downstream [2, 3].

Goldstein and Behbahani [4] studied the single jet impingement from a circular pipe orifice for case of with and without crossflow. The results show that a maximum Nusselt number decreases with increasing flux momentum of crossflow for jet-to-plate distance  $H=12D$  ( $D$  is orifice diameter) and the maximum Nusselt number increases, when decreased the jet-to-plate distance to  $H=6D$  with moderate flux momentum of crossflow. Bouchez and Goldstein [5] experimentally studied the local heat transfer on the impinged surface and flow visualization of the jet in the crossflow, the experiment carried out of the single jet impingement from a circular pipe orifice normal to a surface, the results show that the low velocity of crossflow can created a recirculation zone upstream of the stagnation point and the heat transfer coefficient for jet-to-plate distance  $H=6D$  has higher than  $H=12D$  for all flux momentum ratios.

Barata and Durao [6] investigated the flow characteristic of an impinging jet in crossflow. They found that the upstream side of wall jet interacted with the crossflow and formed a vertex close to the ground target plate which flow was similar to the horseshoe structure. Nakabe et al. [7] experimentally studied a single inclined impinging jet in the crossflow with jet to crossflow velocity  $VR=3, 5$  and  $7$  and showed the increasing heat transfer on the target surface in case of

high crossflow velocity  $VR=7$ . Yang and Wang [8] conducted the numerical simulation of an inclined impinging jet in crossflow with same experimental condition of Nakabe et al. [7]. The results indicated that for the case of the low velocity ratio ( $VR=3$ ), there appeared very strong circulation flow near the stagnation region when compare with other velocity ratio ( $VR=5$  and 7).

All literature reviews have been briefly discussed in above. It was found that the crossflow significantly reduced or enhanced the heat transfer of impinging jet according to the ratio of jet to crossflow velocity and jet-to-plate distance. Most of the previous works on impingement heat transfer under the crossflow are concerned with jet from a pipe nozzle [4, 5, and 6]. In practical industrial applications, the heat transfer surface is large and the multiple impinging jets were must applied with orifice type nozzle. Hence, the interacted characteristic between the jet and the crossflow are unlike for case of single and multiple impingements. Also, the flow and heat transfer characteristics in case of jet impingement from the pipe and orifice nozzle are difference.

In case of multiple of jet impingements, the maximum heat transfer on the target surface was 2D-3D of jet-to-plate spacing (according on the jet-to-jet spacing) [2, 3 and 9]. While, the maximum heat transfer on the target surface in case of single jet impingement was 5D-8D of the jet-to-plate distance, according on the nozzle type and confined or unconfined of the test section [10, 11 and 12]. From these reasons, the effect of crossflow on jet impingement from orifice nozzle with low jet-to-plate distance ( $H=2D-3D$ ) should be concerned than the jet impingement from the pipe nozzle with high jet-to-plate distance ( $H>6D$ ).

The aim of this research was to study the effect of velocity ratio on flow and heat transfer in case of impinging jet from orifice nozzle with low jet-to-plate distance  $H=2D$ . The experimental investigation was carried out of the jet to the crossflow velocity ratios  $VR=V_j/V_\infty=3, 5$  and 7. The temperature distribution on the impinged surface was investigated by using TLCs and Nusselt number distribution was evaluated by using image processing technique. The flow characteristics on the impinged surface were visualized by using oil film technique. The numerical simulation was employed to gain insight into the fluid flow of jet impingement in the crossflow by using commercial CFD software (ANSYS ver. 12.0).

## 2. EXPERIMENTAL MODEL AND PARAMETERS

The experimental model in this study, the jet was discharged from a circular orifice and then impinged normal to opposite heated surface in wind tunnel with rectangular cross section as show in Fig.1. The crossflow was generated by sucking air pass through the test section with centrifugal blower located downstream of wind tunnel. To consider the effect of jet to crossflow velocity ( $VR$ ) on flow and heat transfer characteristic on the impinged surface, the jet flow was fixed at a constant flow rate and the crossflow velocity was varied. An origin of the Cartesian coordinates was located on the

impinged surface as shows in Fig.1. The X-axis, Y-axis and Z-axis are the streamwise of crossflow, normal to streamwise and spanwise direction of wind tunnel, respectively.

The experiment was carried out at orifice diameter  $D=13.2$  mm and jet-to-plate distance  $H=2D$ . The comparisons for flow and heat transfer characteristics on the impinged surface were based on the constant jet velocity (at  $Re=V_j D/\nu=12,700$ ) and varied crossflow velocity, corresponding to velocity ratio between the jet and the crossflow  $VR=3, 5$  and 7.

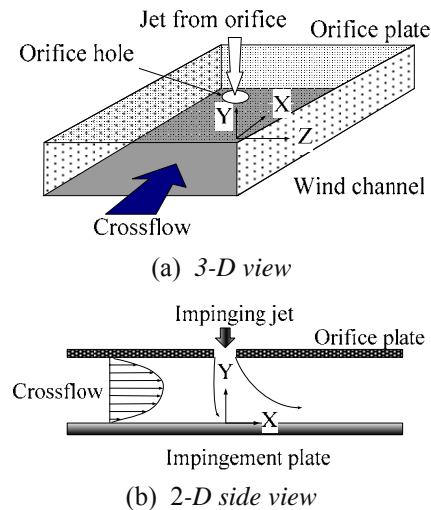


Fig. 1. Experimental model of an impinging jet in a crossflow

## 3. EXPERIMENTAL SETUP AND METHOD

### 3.1. Experimental setup

Fig.3. shows a schematic view of the experimental apparatus. The experimental apparatus composed of two parts: jet flow supplied part and crossflow supplied part. For the jet flow supplied part, the centrifugal blower (3HP) accelerates the air which then flows through a temperature controlled chamber and towards the orifice flow meter. The air subsequently passes through a jet chamber with constant cross-section 360-mm-wide, 360-mm-long and 850-mm-high. The jet chamber was equipped with two layers of perforated plates and two layers of mesh plates to ensure that a uniform flow field approaches to the orifice plate.

The crossflow in the wind tunnel was sucked through the inlet chamber, a flow straightener, two of mesh plates, the test section and an outlet chamber with centrifugal blower (3HP) located at downstream of wind tunnel. The wind tunnel has rectangular cross-section 300-mm-width and the height is 2D (Aspect ratio is 11.4.). The wind tunnel has sufficient length to ensure that the flow passes through the test section with a fully developed velocity profile. In addition, the inlet chamber and wind tunnel was assembled by convergent connection to reduce the effect from wind tunnel inlet.

The test section was mounted upon the jet chamber and its dimension was 139-mm-wide and 26.4-mm-high.

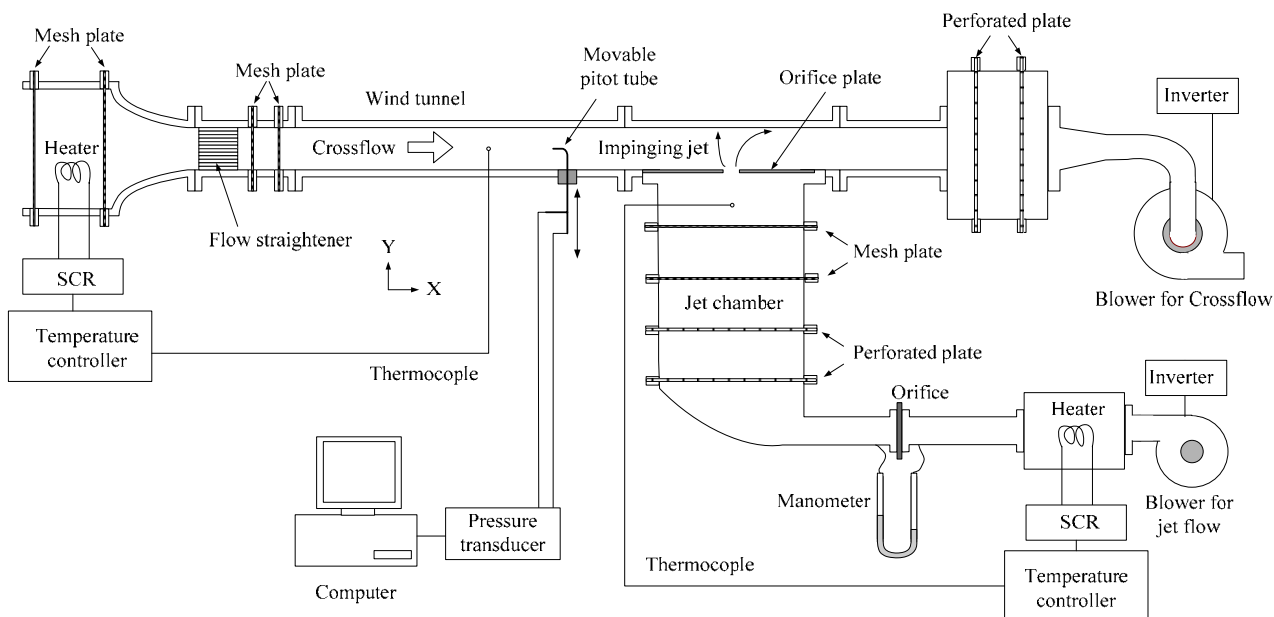


Fig.2. Schematic of the experimental apparatus

The surface of heat transfer measurement (Opposite site of jet plate) of test section was designed for replaceable with transparent acrylic plate for the flow visualization technique. As well as, the Pitot-static tube was mounted before test section for the crossflow velocity profile measurement. For all experimental conditions, the jet and crossflow were controlled with constant temperature at 27°C and temperature variation of the jet and the crossflow was controlled within 0.2°C.

### 3.2. Heat transfer measurement

Fig. 3 shows the detail of test section for heat transfer measurement. The air with constant temperature discharged from an orifice plate and impinged upon the heat transfer surface. The heat transfer surface was made of stainless steel foil (30- $\mu\text{m}$ -thicknesses) which attached with TLC sheet on the rear side of jet impinging surface. The stainless steel foil was stretched between couple of copper bus bars. The heat transfer surface was heated by DC power supply that can supply current up to 40A passes through copper bus bars. An amount of electrical energy was dissipated in the stainless steel foil and it can be calculated from equation

$$\dot{Q}_{input} = I^2 \cdot R \quad (1)$$

where here,  $I$  is the electrical current and  $R$  is the electric resistance of stainless steel foil.

The heated impinging surface was cooled with impinging jet. Hence, the local values of heat transfer coefficient ( $h$ ) by force convection of jet can be evaluated from equation

$$h = \frac{\dot{Q}_{input} - \dot{Q}_{losses}}{A(T_w - T_j)} = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_r - \dot{q}_c}{T_w - T_j} \quad (2)$$

where  $\dot{q}_r = \sigma \varepsilon_{TLC} (T_w - T_s)$  and  $\dot{q}_c = h_c (T_w - T_s)$  are the heat loss transferred to the environment by radiation and

convection, respectively. The  $T_w$  and  $T_j$  are the wall and jet temperature, the  $\sigma$  is a Stefan-Boltzman constant, the  $\varepsilon_{TLC}$  is a emissive coefficient of the black background paint and the TLCs that has been given in [9],  $T_s$  is a surrounding temperature and  $h_c$  is a natural heat transfer coefficient that was calculated from natural convective heat transfer from the horizontal plate orientation to the surrounding.

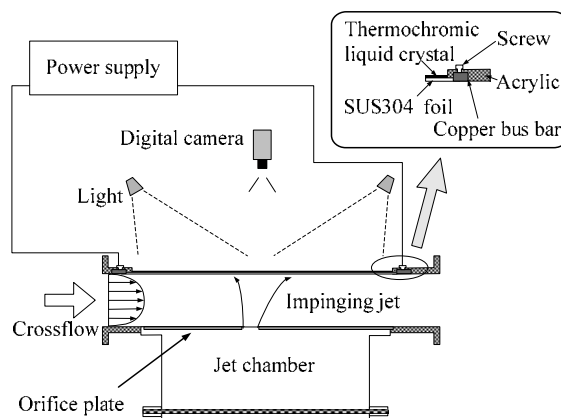


Fig.3. Detail of heat transfer measurement

The wall temperature ( $T_w$ ) on the impinging surface was measured by using TLCs that attached on the rear side of jet impinged surface. The CCD camera was used to capture colour on TLCs. The images of colour pattern on TLCs were then converted from the RGB (Red, Green and Blue) colour system to the HSI (Hue, Saturation and Intensity) colour system. The Hue (H) value provides a convenient way to correlate the colour of TLCs to their

temperature in range of 28-40°C. The TLCs was calibrated with same location on the test section to keep all external factors same with the heat transfer experiment. The local Nusselt number was calculated from

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3)$$

where  $D$  is the diameter of orifice and  $k$  is a conductivity of air jet. An average Nusselt number was calculated from

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}D}{k} \quad (4)$$

where here, the average heat transfer coefficient  $\overline{h}$  was calculated from Eq.(2) by replacing  $T_w$  to  $\overline{T}_w$  that is a averaged temperature on the impinged surface.

### 3.3. Flow visualization on the impinged surface

The flow visualization on the impinged surface was illustrated by using oil film technique. The oil film was prepared by liquid paraffin, titanium dioxide and oleic acid. A transparent plastic plate was replaced to the impinged surface and oil film was painted uniformly on jet impinged surface. The CCD camera was captured the oil film flow on the impinged surface at each different time (30 second/frame).

## 4. NUMERICAL SIMULATION (CFD)

The flow characteristic was illustrated by using 3-D numerical simulation (ANSYS ver.12.0). The model of numerical simulation is same with the experimental model; dimension, mass flow rate of jet and crossflow, boundary and experimental condition. The standard k- $\epsilon$  turbulent model with general wall-function mode was used for solving numerical simulation problems.

## 5. RESULTS AND DISCUSSION

### 5.1 Velocity profile of crossflow

Fig.4 shows the velocity profile of crossflow in Y-axis pass the center of wind tunnel(Y is wind tunnel height). The velocity profile shows a good agreement between the CFD and experimental data. The trend of both data illustrate that the flow before enter to the test section with fully developed flow. From this result, the flow characteristic of crossflow before enter to the test section of both experiment and CFD are almost matched.

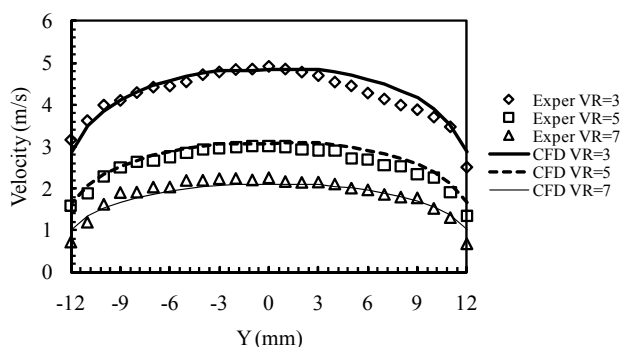


Fig.4. Velocity profile of crossflow (Y is wind tunnel height)

### 5.2 Flow characteristic of jet and crossflow

Fig.5 shows the velocity distribution in ZX-plane through the center of jet ( $Y=0$ ). The jet discharged from the nozzle and impinged upon the target surface. Before jet impinging on the wall, the crossflow deflected the jet to downstream side of crossflow. The tendency of deflection of jet depends on the crossflow velocity or VR. The jet was more deflected to the downstream of crossflow when the VR decreases.

In case of VR=5 and 7, the wall jet was appeared on both side of upstream and downstream of jet impingement region. This condition was different from the VR=3 which the wall jet was appeared only downstream.

Fig. 5 (b) and (c) show the point of velocity approach to zero which nearly located to the target surface in middle of jet impingement region for VR=5 and 7. This represented the stagnation point. It was found that the stagnation point was shifted to the downstream when the crossflow velocity was increased. However, the stagnation point in case of VR=3 was obscured.

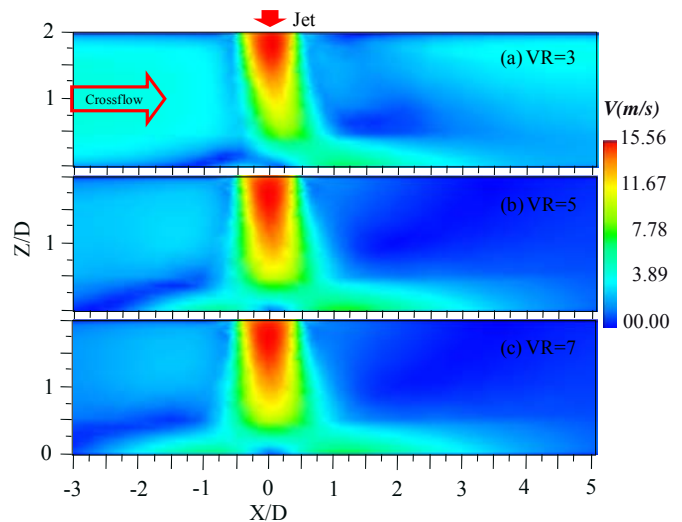


Fig. 5. Velocity contour in ZX-plane ( $Y=0$ ) at different VR

Fig.6 shows streamline in ZX-plane at  $Y=0$ . The results obviously illustrated the interaction between jet and crossflow. In case of VR=5 and 7 shows the ground vortex in the upstream of jet impingement region. The ground vortex of VR=7 is larger than VR=3, because of the wall jet can be penetrated in the upstream of crossflow about 3.3D then the wall jet collided with crossflow and turn to downstream as shows in Fig. 6 (c). Difference from in case of VR=5, the wall jet can penetrate in the crossflow about 2.5D as shows in Fig. 6 (b). The dimension of ground vortex depends on the distance of wall jet that can be penetrated as much as in the upstream direction.

In case of higher velocity of crossflow VR=3 (Fig. 6 (a)), the ground vortex was disappeared. But, the wall jet can be penetrated in the crossflow about 1.2D in the upstream and then rapidly turn to the downstream. In this case, the velocity of crossflow dominated the velocity of wall jet.



Fig. 7 shows the streamline in ZX-plane at  $Y=-6$  mm from the jet exit. The result shows that the crossflow passed through the jet flow with difference flow characteristics according to the VR. In case of  $VR=3$ , the circulation flow was appeared in downstream side of jet. This circulation flow can be promoted the turbulent flow inside the jet before impingement.

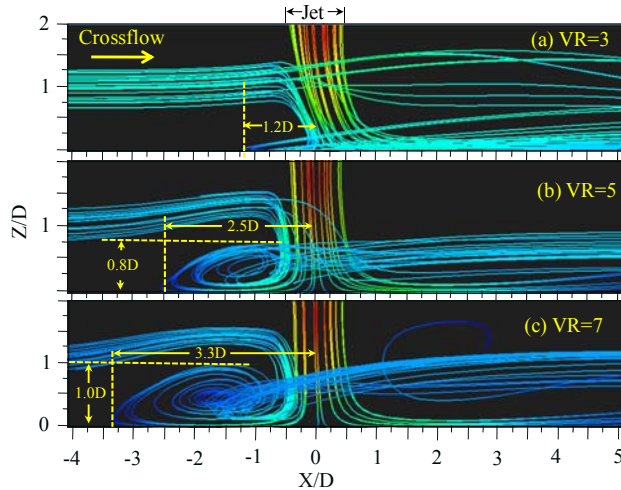


Fig.6. Streamline in ZX-plane ( $Y=0$ ) at different VR

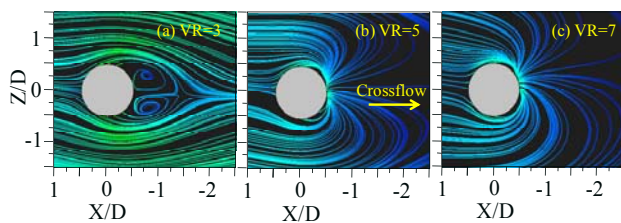


Fig.7. Streamline in ZX-plane at  $Y=-6$  mm from the jet exit (Solid circle are the position of orifice).

### 5.3 Flow and heat transfer on the impinged surface

Fig. 8 shows the flow visualization on the impinged surface by using Oil film technique. The black area represented oil film completely removed wall region and white area represented area of oil film. The impingement region has black area due to high shear stress on the surface. The oil film was removed from this region. Small white area in the middle of black area represents the stagnation point of jet with velocity almost zero. In case of without crossflow and case of  $VR=7$  with lowest crossflow velocity (Fig. 8 (a) and (d)), the stagnation point was clearly expressed. For case of  $VR=3$ , the stagnation point unclearly expressed as shown in Fig. 8 (b), because of highest velocity of crossflow (jet impinged on surface weakly).

From the Fig.8, the distance of stagnation point shifted far away from the center of orifice 0.15D, 0.25D and 0.5D for  $VR=7$ , 5 and 3, respectively. The distance from the stagnation point to the central orifice increased with decreasing the VR, corresponding to the numerical simulation model that shows in Fig.5 as has been discussed in above.

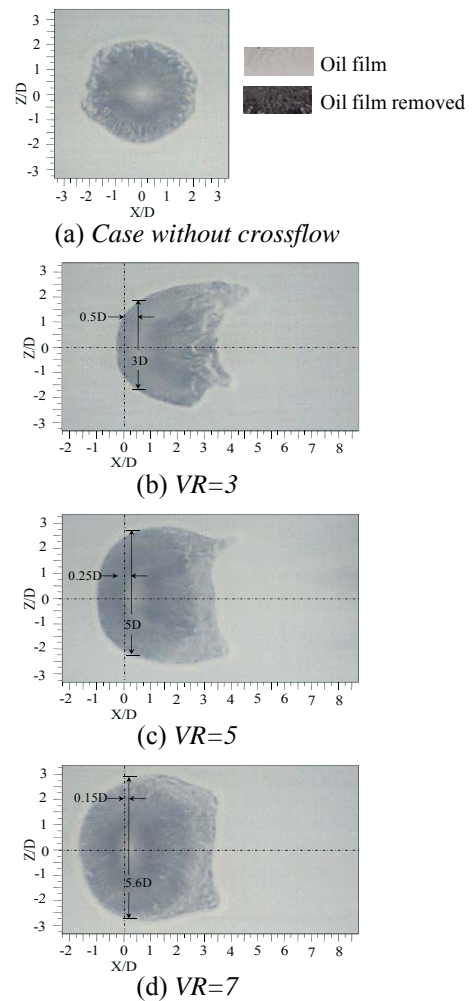


Fig. 8. Oil film patterns on an impinged surface at different VR

Fig. 9 shows the local Nusselt number distribution on the impinged surface. The area of high heat transfer in jet impingement region became smaller in spanwise direction for  $VR=3$  and become larger for  $VR=5$  and 7. This result is consist with the area of stagnation region that has been shown in Fig. 8. The distance of stagnation region in centerline in spanwise are 3D, 5D, and 5.6D for  $VR=3$ , 5 and 7, respectively. This results illustrated the area of stagnation region become smaller as the crossflow velocity increasing.

The heat transfer peak in stagnation region for case jet without crossflow is lower than other case of jet with crossflow. For case jet with crossflow, the peak of heat transfer increased with increasing velocity of crossflow. The variation of heat transfer peak was obviously as shown in Fig.10. This heat transfer enhancement is attributed to the interaction between the jet and the crossflow which increased turbulent intensity in the jet before impingement, corresponding to the numerical simulation model that shows in Fig.7.

Table 1 shows the variation of averaged Nusselt number on the impinged surface that calculated from the equation (4). The  $VR=5$  has highest averaged Nusselt number, because of the high local Nusselt number are appropriated between stagnation region and around it. So, difference from the  $VR=5$  that shows the peak of heat transfer only at stagnation point.

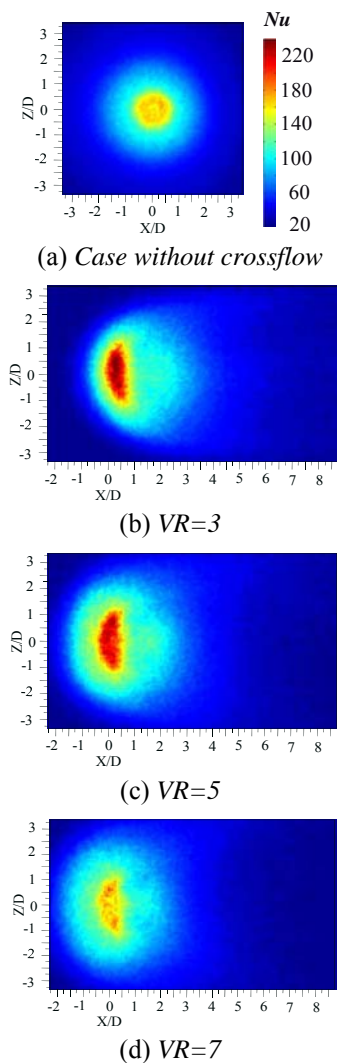


Fig. 9. Local Nusselt number on an impinging surface at different VR ( $T_j=27^\circ\text{C}$ )

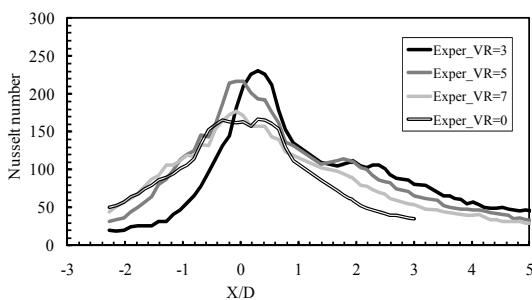


Fig. 10. Local Nusselt number distribution on impinging surface at different VR ( $T_j=27^\circ\text{C}$ ,  $Re_j=12,700$ ,  $Z/D=0$ )

Table 1. Averaged Nusselt number

| VR                      | 3    | 5    | 7    |
|-------------------------|------|------|------|
| Averaged Nusselt number | 72.7 | 78.1 | 72.9 |

## 5. CONCLUSION

The main results are shown as follows;

(1) The jet was more deflected to the downstream of crossflow when the crossflow velocity increasing and the ground vortex in upstream of VR=7 larger than in case of VR=3.

(2) The higher velocity crossflow can increase the peak of heat transfer in stagnation region. This is attributed to the interaction between the jet and the crossflow which increased turbulent intensity in jet before impingement.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was sponsored by Faculty of Engineering, Prince of Songkla University through grant No. ENG-53-2-7-02-0070-S.

## REFERENCES

- [1] J.Y., San, and M.D., Lai, "Optimum jet-to-jet spacing of heat transfer for staggered arrays of impinging air jets", *Heat Mass Transfer Int. J.*, Vol. 44, 2001, pp. 3997–4007.
- [2] R. Viskanta, "Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets", *Experimental Thermal and Fluid Science J.*, 1993, Vol.68, pp.111-134.
- [3] V. Katti and S. V. Prabhu, "Influence of spanwise pitch local heat transfer distribution for in-line arrays of circular jets with air flow in two opposite", *Experimental Thermal and Fluid Science. J.*, 2008, Vol. 33, pp 84-95.
- [4] R. J. Goldstein and I. Behbahan, "Impingement of a circular jet with and without cross flow", *Heat Mass Transfer Int. J.*, Vol. 25, 1982, pp. 1377–1382.
- [5] J.-P. Bouchez and R. J. Goldstein "Impingement cooling from a circular jet in a cross flow", *Heat Mass Transfer Int. J.*, Vol. 18, 1975, pp. 719–730.
- [6] J. M. M. Barata, and D. F. G. Durao, "Laser-Dropper measurements of impinging jet flows through a crossflow", *Experimental in Fluids J.*, 2004, Vol. 36, pp. 665-674.
- [7] K. Nakabe, K. Suzuki, K. Inaoka, A. Higashio, J.S. Acton, and W. Chen, "Generation of longitudinal vortices in internal flows with an inclined impinging jet and enhancement of target plate heat transfer", *Heat and Fluid Flow Int J.*, 1998, Vol. 19, pp. 573-581.
- [8] Y.-T. Yang and Y.-X. Wang "Three-Dimensional Numerical Simulation of an Inclined Jet with Cross-Flow", *Heat and Mass Transfer Int. J.*, 2005, Vol.48, pp.4019-402.
- [9] L.F.G. Geers, M.J. Tummers, T.J. Bueninck and K. Hanjalic, "Heat transfer correlation for hexagonal and in-line arrays of impinging jets", *Heat and Mass Transfer Int. J.*, 2008, Vol. 51, pp 5389-5399.
- [10] S. Ashforth-Frost and K. Jambunathan "Effect of nozzle geometry and semi-confinement on the potential core of a turbulent axisymmetric free jet", *Heat Mass Transfer Int. J.*, 1996, Vol.23, pp.155-162.
- [11] D. W. Colucci and R. Viskanta, "Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet", *Experimental Thermal and Fluid Science J.*, 1996, Vol.13, pp.71-80.
- [12] K. Jambunathan, E. Lai, M. A. Moss and B. L. Button, "A review of heat transfer data for single circular jet impingement", *Heat and Fluid flow Int. J.*, 1996, Vol.13, pp.106-115.

ภาคผนวก ง.2  
การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

The 5<sup>th</sup> PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2011), Phuket, May 2-3,  
2011 Prince of Songkla University, Faculty of Engineering Hat Yai, Songkhla, Thailand

# HEAT TRANSFER ENHANCEMENT ON A SURFACE UNDER ARRAYS OF IMPINGING JETS: EFFECT OF JET FLOW ARRANGEMENT

M. Wae-hayee<sup>1</sup>, C. Nuntadusit<sup>1\*</sup>, P. Tekasakul<sup>1</sup>

1. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
 Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, Thailand

\*Authors to correspondence should be addressed via email: chayut@me.psu.ac.th

**Abstract:** In this article, the effect of jet arrangement on flow and heat transfer patterns on a surface under multiple impinging jets were studied. An array of impinging jets with in-line and staggered arrangement were considered. The effect of crossflow exit orientations; a single and a double outlet were also investigated. The temperature distribution on an impinged surface was visualized by using thermochromic liquid crystal sheet (TLCs) and Nusselt number distribution was evaluated by using image processing method. The flow characteristic on the impinged surface was visualized by using oil film technique. The results show that an interaction between jet and crossflow can increase heat transfer at stagnation region with appropriated velocity ratios between jet velocity and crossflow velocity. The heat transfer rate of in-line arrangement was higher than the staggered arrangement 3.7 % for the single outlet and 25.7 % for double outlet.

**Key Words:** Array of impinging jets, Jet arrangement, Heat transfer enhancement, Liquid crystal sheet

## 1. INTRODUCTION

Impinging jets are widely used in many industries which required high heat transfer rate on surface like cooling of gas turbine blade, electronic device, combustion wall and compact high efficient heat exchanger. However, the heat transfer rate is high only in jet directly impinging region. When the high and uniform heat transfer distribution is required over a wide area for example: drying of film sheet, heating of steel sheet, multiple of impinging jets is usually used instead. An accumulated spent jet flow in a confined channel can be produced a crossflow. The crossflow is defined as the fluid flow in the direction perpendicular to the impingement flow [1].

Brizzi et al [2] illustrated the flow and temperature patterns on the impinged surface of array of jets with an

in-line arrangement. The results of the flow pattern corresponded to the temperature pattern. Katti and Prabhu [1] studied the heat transfer rate of in-line arrangement of the array jet. The results showed the jet-to-jet distance at 4D better than 2D and 6D (D is nozzle diameter) and jet-to-plate distance at 1D and 2D have higher heat transfer rate.

Previous studies have been investigated on impingement heat transfer with the crossflow. There found the crossflow significantly reduced the heat transfer on impingement surface [3, 4 and 5]. In this research, the effect of both the in-line and staggered arrangement and the outlet orientation of spent air were studied. The investigations carried out of the array of jet impingement with jet-to-plate spacing for two time of jet diameter. The characteristics of local heat transfer and flow visualization on the impinged surface were investigated.

## 2. EXPERIMENTAL MODEL AND PARAMETERS

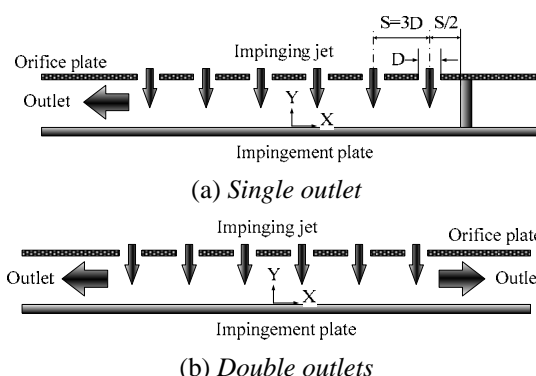


Fig. 1. Sketch of the confined channel with different crossflow exit orientations

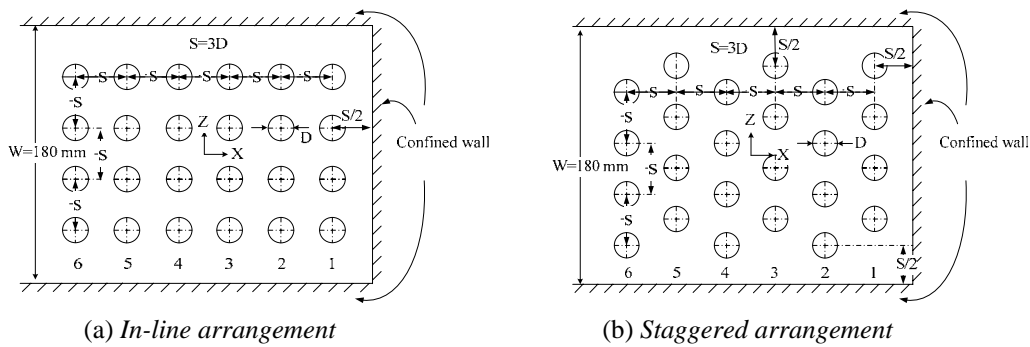


Fig. 2. Experimental model of jet arrangement (Number 1 to 6 represent the number of column)

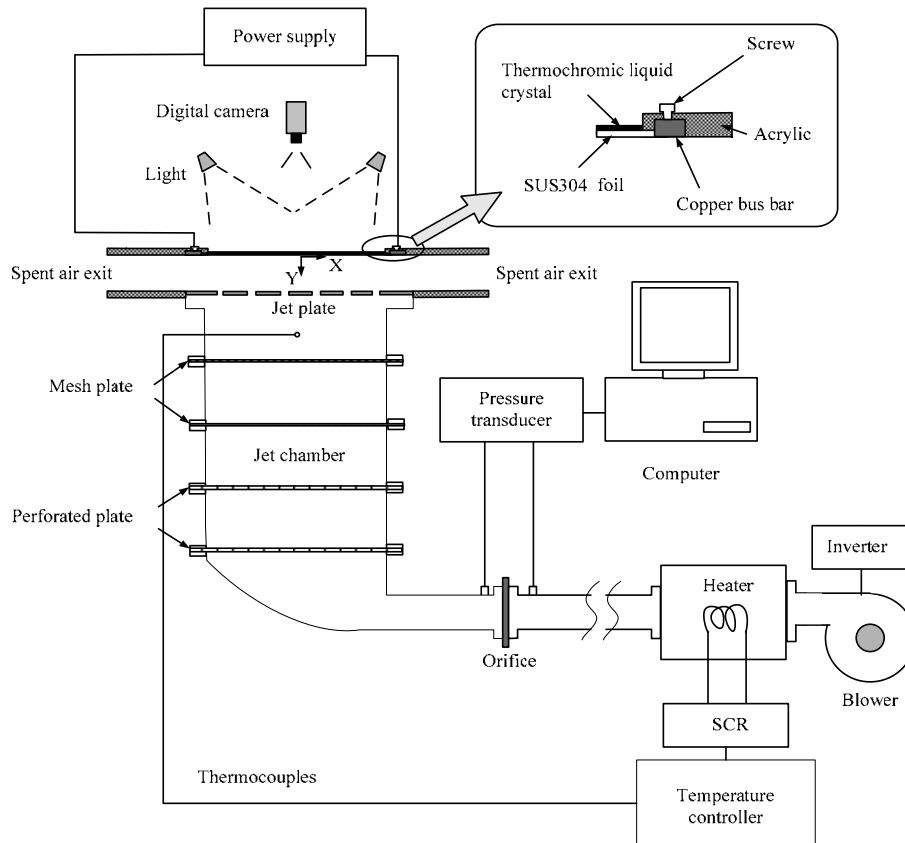


Fig. 3. Schematic view of the experimental setup

The model in this experiment, the jets were discharged from array of circular orifices and then impinged normal to heated surface on opposite surface of rectangular duct. Fig.1 presents the sketch of two different exit orientations; the first is the single outlet (Fig.1 (a)) and the second is the double outlets (Fig.1 (b)). For the single outlet, the spent air was allowed to flow out from the test section with only one direction. For double outlets, the spent air allowed to flow out from the test section with opposite direction. An origin of the Cartesian coordinates was located at the impinged surface as shows in Fig.1. The X, Y and Z-axis are the streamwise, normal to the impinged surface and spanwise direction of duct, respectively.

Fig.2 illustrates the array of jet arrangement are the in-line and staggered arrangement and both arrangement are same number of 6x4 jet holes. A diameter of nozzle was  $D=13.2$  mm. The jet-to-jet distance was fixed at

$S=3D$  and jet-to-plate distance was fixed at  $H=2D$ . All experiments were carried out at constant Reynolds number  $Re=12,700$ . In case of the staggered arrangement as shows in Fig. 2 (b), the confined wall of the lateral side was given jet-to-wall distance for  $S/2 (=1.5D)$  and this confined wall was given with same dimension for in case of the in-line arrangement as shows in Fig. 2 (a).

### 3. EXPERIMENTAL SETUP AND METHOD

#### 3.1. Experimental setup

Fig.3 shows schematic view of the experimental apparatus. The blower (3HP) is used for generated the air jet. The air flows through a temperature controlled chamber and towards the orifice flow meter. The air subsequently passes through a jet chamber with constant cross-section 360-mm-wide, 360-mm-long and 850-mm-high. The jet chamber was equipped with two of

perforated plates and two of mesh plates to ensure that uniform flow approached to the nozzle plate. For all experimental conditions, the jet flow was controlled with constant flow rate at  $Re = V_j D / \nu = 12,700$  and at constant temperature  $T_j = 27^\circ\text{C}$ . The test section was mounted upon the jet chamber. In case of single outlet, the test section was mounted by wall with space  $1.5D$  ( $S/2$ ) from the column 1 as shows in Fig. 1 (a).

### 3.2. Heat transfer measurement

Fig. 3 shows the detail of test section for heat transfer measurement. The air with constant temperature was discharged from an orifice plate and impinged upon the heat transfer surface. The heat transfer surface was made of stainless steel foil ( $30\text{-}\mu\text{m}$ -thicknesses) which attached with TLC sheet on the rear side of jet impinged surface. The stainless steel foil was stretched between couple of copper bus bars. The heat transfer surface was heated by DC power supply that can supply current up to 40A passes through copper bus bars. An amount of electrical energy is dissipated in the stainless steel foil and it can be calculated from equation

$$\dot{Q}_{input} = I^2 \cdot R \quad (1)$$

where here,  $I$  is the electrical current and  $R$  is the electric resistance of stainless steel foil.

Then, the heated impinged surface was cooled by impinging jets. Hence, the local values of heat transfer coefficient ( $h$ ) by force convection of jets can be evaluated from equation

$$h = \frac{\dot{Q}_{input} - \dot{Q}_{losses}}{A(T_w - T_j)} = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_r - \dot{q}_c}{T_w - T_j} \quad (2)$$

where  $\dot{q}_r = \sigma \varepsilon_{TLC} (T_w - T_s)$  and  $\dot{q}_c = h_c (T_w - T_s)$  are the heat loss transferred to the environment by radiation and convection, respectively. The  $T_w$  and  $T_j$  are the wall and jet temperature, the  $\sigma$  is a Stefan-Boltzman constant, the  $\varepsilon_{TLC}$  is a emissive coefficient of the black background paint and the TLCs that has been given in [6],  $T_s$  is a surrounding temperature and  $h_c$  is a natural heat transfer coefficient that was calculated from natural convective heat transfer from the horizontal plate orientation to the surrounding.

The wall temperature ( $T_w$ ) on the impinged surface was measured by using TLC sheet that attached on the rear side of jet impinged surface. The CCD camera was used to capture colour on TLC sheet. The images of colour pattern on TLC were converted from the RGB (Red, Green and Blue) colour system to the HSI (Hue, Saturation and Intensity) colour system. The Hue (H) value provides a convenient way to correlate the colour of TLC to their temperature in range of  $28\text{-}40^\circ\text{C}$ . The TLCs was calibrated with same location on the test section to keep all external factors constant. The local Nusselt number was calculated from

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3)$$

where  $D$  is the diameter of orifice and  $k$  is a conductivity of air jet. An average Nusselt number was calculated from

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}D}{k} \quad (4)$$

where here, the average heat transfer coefficient  $\overline{h}$  was calculated from Eq.(2) by replacing  $T_w$  to  $\overline{T_w}$  that is a averaged temperature on the impinged surface.

### 3.3. Flow visualization on the impinged surface

The flow visualization on the impinged surface was illustrated by using oil film technique. The oil film was mixed by liquid paraffin, titanium dioxide and oleic acid. A transparent plastic plate was coated by oil film and it was replaced to the impinged surface. The CCD camera was captured the oil film flow on the impinged surface at each different time (30 second/frame).

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

### 4.1 Flow patterns on an impinged surface

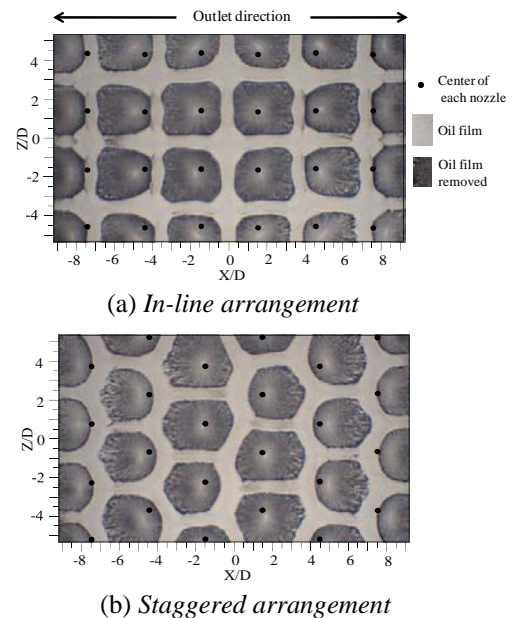


Fig. 4. Flow patterns on the impinged surface in case of double outlet ( $Re=12,700$ , After jet impinged 1200 second)

Fig. 4 and 5 show the flow visualization on the impinged surface by using oil film technique. The black area and white area represent an oil film completely removed wall region and area of oil film, respectively. The impingement area has a high shear stress on the surface, this effect on the oil film removed from this area. A white point in the middle of black area represents the stagnation point of jet and the black dots are the location of center of each orifice nozzle.

Fig. 4 shows the flow patterns on the impinged surface in case of the double outlet. The flow patterns of both different arrangement illustrate deflection of jet toward the crossflow direction. Deformation of impinged area depend on the location of orifice and jet arrangement.

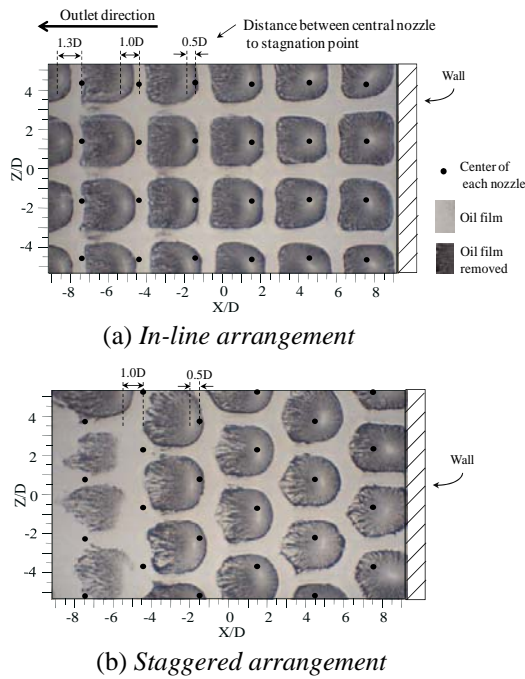


Fig. 5. Flow patterns on the impinged surface in case of single outlet ( $Re=12,700$ , After jet impinged 1200 second)

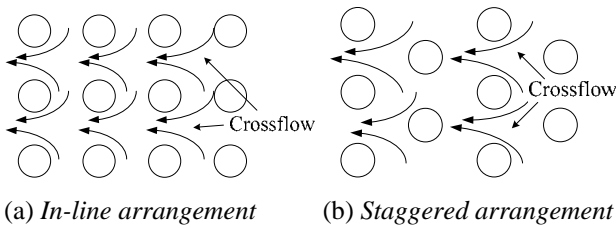


Fig. 6. Illustrate the crossflow passes through the array of jets with different nozzle arrangement

Fig. 5 shows the effect of nozzle arrangement on flow characteristics on the impinged surface in case of the single outlet. The flow pattern in case of in-line arrangement, the stagnation point (Small white point) of jet column 4-6 were shifted to the direction of crossflow. The distance between center of nozzle and stagnation point increased with increasing the number of column. For the column 4, 5 and 6, the shifted distance between center of nozzle to the stagnation point are  $0.5D$ ,  $1.0D$  and  $1.3D$ , respectively as shows in Fig. 5 (a). This deflection of jet can be illustrated the effect of crossflow on the jet flow, especially, the jet which located at last column (Column 6) near the outlet. The stagnation region was shifted far away from the center of jet. Moreover, the jets which located at last column (Column 6) in case of staggered arrangement (Fig.5 (b)), the stagnation region was located at over considered area (disappear on the considered area). The different characteristics of crossflow passes through the jets flow of the in-line and staggered arrangement were illustrate in Fig.6.

#### 4.2 The detail of Nusselt number on the impinged surface

Fig. 7 and 8 show the local Nusselt number distribution on the impinged surface. The heat transfer rate in jet impingement regions of each jets was higher than heat transfer rate in region between jet and around it. The characteristic of heat transfer corresponded to the flow pattern on the impinged surface with same experimental condition. Similarly, the peak of heat transfer occurred at the same location of the jet impinged region as show in Fig. 4 and 5.

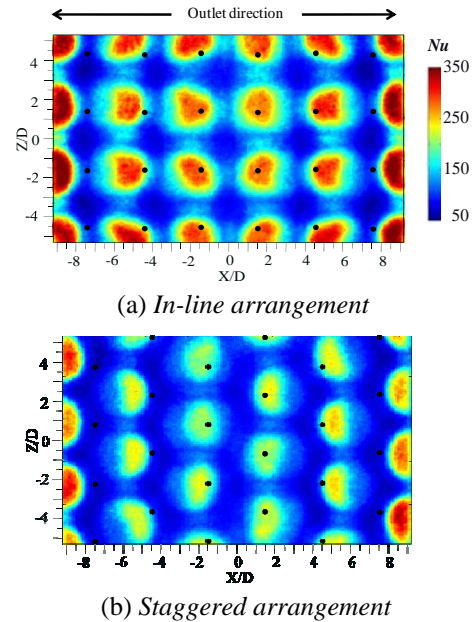


Fig. 7. Nusselt number distribution on the impinged surface in case of double outlet ( $T_j=27\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Re=12,700$ , black dots represent the center of the orifice jet)

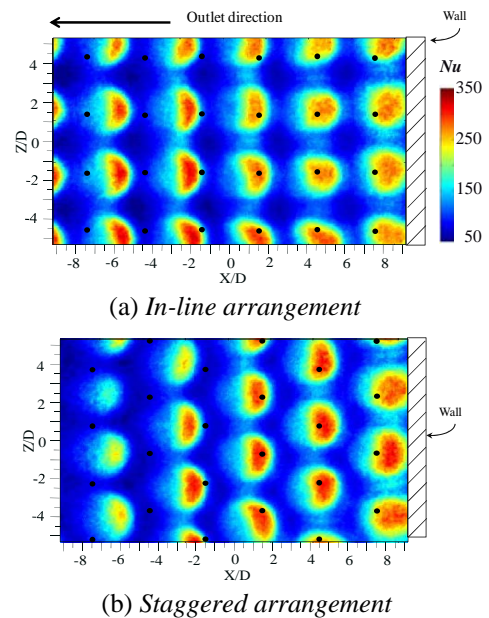


Fig. 8. Nusselt number distribution on the impinged surface in case of single outlet ( $T_j=27\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Re=12,700$ , black dots represent the center of the orifice jet)

Fig. 9 shows the spanwise averaged Nusselt number. In case of double outlet (Fig. 9 (a)), the peak of heat transfer of in-line arrangement dominated the peak from the staggered arrangement for all location of X-axis.

Otherwise, the location of peak of heat transfer of the single crossflow depended on the jet arrangement as show in Fig. 9 (b). The location of  $X>3D$ , the peak of heat transfer of the staggered arrangement dominated the peak from the in-line arrangement. Otherwise, the location of  $X<-1D$ , the peak of heat transfer of the in-line arrangement dominated the peak from the staggered arrangement.

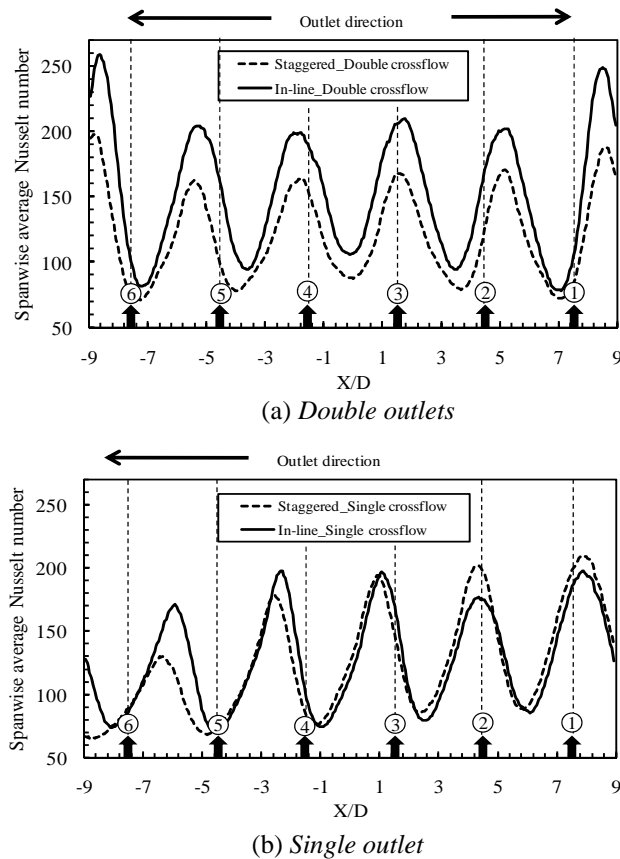


Fig. 9. Spanwise averaged Nusselt number ( $T_j=27^\circ\text{C}$ ,  $Re=12,700$ , Arrow represents the location of nozzle)

Fig.9 (b) shows the effect of crossflow on the impinged heat transfer for single outlet. In case of the in-line arrangement and location of  $X<-1D$ , an interaction between the jet and the crossflow can be increased heat transfer at each stagnation region with appropriated velocity jet and crossflow. However, increasing of heat transfer will be able only in case of small jet-to-plate distance. This heat transfer behavior corresponded to the results of Katti and Prabhu [1] that showed a range of the jet-to-plate distance  $H<2D$ .

However, in case of the staggered arrangement and location of  $X<-1D$  as shows in Fig. 9 (b), the flow characteristic of this condition has been shown in Fig. 6 (b). The crossflow with high velocity attacked the jet flow and the jet flow was more deflected toward a downstream of crossflow. Hence, crossflow decreased heat transfer on the impinged surface.

Table 1 shows the variation of averaged Nusselt number on the impinged surface that calculated from the equation (4). The averaged Nusselt number of the in-line arrangement with Double outlet has highest heat transfer than the other parameter. The averaged Nusselt number

shows that the heat transfer rate of the in-line arrangement was higher than the staggered arrangement 3.7 % for the single outlet and 25.7 % for the double outlets.

Table 1. Average Nusselt number

| Single crossflow |           | Double crossflow |           |
|------------------|-----------|------------------|-----------|
| In-line          | Staggered | In-line          | Staggered |
| 227.7            | 219.5     | 273.4            | 217.5     |

## 5. CONCLUSION

In present study, the effects of jet flow arrangement and outlet orientations were experimentally investigated. The main results were shown as follows;

- (1) The flow pattern on the impinged surface was corresponded to the heat transfer characteristic on the impinged surface with same experimental condition.
- (2) The interaction between the jet and the crossflow can increase heat transfer at stagnation region with appropriated velocity ratio between jet and crossflow, otherwise, very high velocity of crossflow can decrease heat transfer in jet impingement region.
- (3) The heat transfer rate of in-line arrangement was higher than the staggered arrangement 3.7 % for single outlet and 25.7 % for double outlets.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was sponsored by Faculty of Engineering, Prince of Songkla University through grant No. ENG-53-2-7-02-0070-S.

## REFERENCES

- [1] V. Katti and S. V. Prabhu, "Influence of spanwise pitch local heat transfer distribution for in-line arrays of circular jets with air flow in two opposite", *Experimental Thermal and Fluid Science. J.*, 2008, Vol. 33, pp 84-95.
- [2] L.E., Brizzi, A. Bernard, J. L. Bousgarbies, E. Dorignac and J. J. Vullierme "Study of several impinging jet", *Thermal Science, J.*, 2000, Vol. 9, No. 3, pp 217-223.
- [3] J.P. Bouchez and R.J. Goldstein "Impingement cooling from a circular jet in a crossflow", *Heat and Mass Transfer Int. J.*, 1975, Vol. 18, pp. 719-730.
- [4] R. J. Goldstein and I. Behbahan, "Impingement of a circular jet with and without cross flow", *Heat Mass Transfer Int. J.*, Vol. 25, 1982, pp. 1377-1382.
- [5] K. Nakabe, K. Suzuki, K. Inaoka, A. Higashio, J.S. Acton, and W. Chen, "Generation of longitudinal vortices in internal flows with an inclined impinging jet and enhancement of target plate heat transfer", *Heat and Fluid Flow Int J.*, 1998, Vol. 19, pp. 573-581.
- [6] L.F.G. Geers, M.J. Tummers, T.J. Bueninck and K. Hanjalic, "Heat transfer correlation for hexagonal and in-line arrays of impinging jets", *Heat and Mass Transfer Int. J.*, 2008, Vol. 51, pp 5389-5399.



ภาคผนวก ง.3  
การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

The 2<sup>nd</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2011),  
October 19-21, 2011, Krabi, Thailand



## **Heat Transfer Enhancement on Surface with Jets Impingement from Some Arrays of Elongated Round Orifices**

Makatar Wae-hayee<sup>1</sup>, Perapong Tekasakul<sup>1</sup>, Chayut Nuntadusit<sup>\*1</sup>

1. Energy Technology Research Center and Department of Mechanical Engineering,  
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, Thailand

\*Corresponding Author's E-mail: [chayut@me.psu.ac.th](mailto:chayut@me.psu.ac.th)

### **Abstract**

The aim of this research is to enhance the heat transfer on a target surface of an array of impinging jets by decreasing effect of crossflow. Conventional round orifices (Aspect Ratio, AR=1) were substituted by elongated round orifices with aspect ratio AR=4 and 8 in base on same jet exit area. Two types of orifices arrangement; in-line and staggered arrangement were considered. The experimental investigation was carried out at constant distance from orifice plate to impinged surface  $H=2D_E$  ( $D_E$  is equivalent diameter of orifice). The heat transfer characteristic was visualized using Thermochromic liquid crystal sheet (TLCs) and Nusselt number distribution was evaluated by image processing techniques. The flow characteristic on the impinged surface was also visualized by oil film technique. The results show that the elongated round orifices with AR=4 can increase average Nusselt number more than case of AR=1 for 6.04% and 12.52% in case of in-line and staggered arrangement, respectively. However, the heat transfer for case of AR=8 was enhanced only for in-line arrangement when compared with the case of AR=1. The results from flow visualization on jets impinged surface show that the jets from elongated round orifices with AR=4 were received crossflow effect smaller than jets from orifices with AR=1 and 8.

**Keywords:** Impinging jets, Crossflow, Heat transfer enhancement, Elongated round orifice, Orifices arrangement

### **1. Introduction**

Impinging jets are widely used in many industrial applications which required high heat transfer rate on surface such as cooling of gas turbine blade, electronic device or wall of combustion chamber. However, the heat transfer rate is high only in jet directly impinging region. When the high and uniform heat transfer distribution is required over a wide area for

example: drying of film sheet, heating of steel sheet, multiple or array of impinging jets is usually instead. An important parameter that influences on the multiple of jet impingements in a confined space is the crossflow. Here, the crossflow is defined as the fluid flow in the direction perpendicular to the jet impingement flow [1]. The crossflow was produced by

accumulating of spent jets from upstream to downstream of the confined space.

Katti and Prabhu [1] studied the effect of jet-to-jet distance and jet-to-plate distance on heat transfer rate in case of round impinging jets with in-line arrangement. They concluded that the jet-to-jet distance at  $S=4D$  give higher heat transfer rate than case of  $S=2D$  and  $6D$  ( $D$  is nozzle diameter). And jet-to-plate distance at  $H=1D$  and  $2D$  are better than case of  $H=3D$ .

Brizzi et al. [2] illustrated the flow and temperature patterns on the impinged surface of array of round jets with an in-line arrangement. The results of the flow pattern corresponded to the temperature pattern. And crossflow deforms significantly the impingement area that located at downstream in confined channel.

Previous studies [1-4] have been investigated heat transfer characteristics on jet impingement surface with crossflow. They concluded that the crossflow reduced significantly the heat transfer on impingement surface at downstream [3]. The aim of this research is to increase the heat transfer on the impinged surface by reducing the effect of crossflow in case of low jet-to-plate distance  $H=2D_E$ . Elongated round orifices with  $AR=4$  and  $8$  were studied compare with conventional round orifices ( $AR=1$ ). The jet Reynolds number for each orifice was kept constant at  $Re=13,400$ . Two type of jet flow arrangement; an in-line and staggered arrangement were also investigated. The comparisons of flow and heat transfer characteristics on the impinged surface are based on the constant jet mass flow rate.

## 2. Experimental Model

The experimental model is shown in Fig. 1. The multiple jets are discharged from array of orifices the round orifices, and impinge normal to opposite surface in a confined rectangular duct. The crossflow is then generated by accumulating the jets impinged air at upstream side and finally flow out to exit at one side of the duct. It should be noted that the velocity of crossflow increase as going downstream near the flow exit. The impinging jets in last column near the flow exit affected the strongest cross flow effect. The jet-to-plate distance is  $H=2D_E$ .

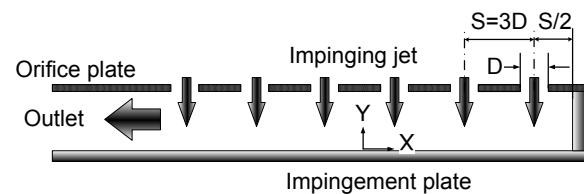
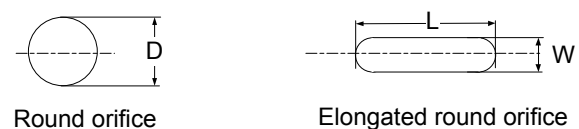


Fig. 1. Experimental model of array of jets impingement

The details of orifice geometry which used in this study are shown in Fig.2. All orifices have same exit area (about  $136.8 \text{ mm}^2$ ). In this study, the equivalent diameter  $D_E$  is defined as diameter of round orifice which has same exit area and  $D_E$  is equal to  $13.2 \text{ mm}$ .



|      | L (mm) | W (mm) |
|------|--------|--------|
| AR=1 | 13.2   | 13.2   |
| AR=4 | 24     | 6      |
| AR=8 | 33.6   | 4.2    |

Fig. 2. Orifice geometry with identical cross-section area

Fig.3 illustrates the arrangements of array of jets; the in-line and staggered arrangement. Both arrangements have same number of 6x4 jet holes. The jet-to-jet distance was fixed at  $S=3D$ . The confined walls for each arrangement were fixed at location as shown in Fig. 3.

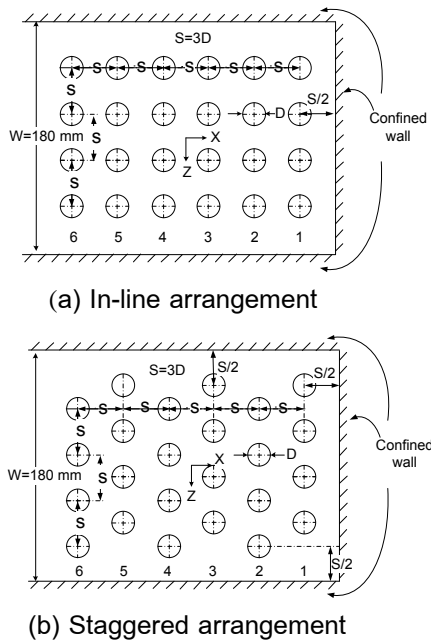


Fig. 3. Jet arrangement (No.1 to 6 represent the number of jets column)

### 3. Experimental Setup and Method

#### 3.1. Experimental setup

Fig.4 shows schematic diagram of the experimental apparatus. The blower (3HP) was used for generating the air jets. The air flows through a temperature controlled chamber and towards the orifice flow meter. The air subsequently passes through a jet chamber with constant cross-section 360 mm x 360 mm and 850mm in height. The jet chamber was equipped with two of perforated plates and two of mesh plates to ensure uniform flow approached to the orifice plate. For all experimental conditions, the air flow rate was controlled at constant flow. The

Reynolds number of each jet is constant at  $Re=V_j D/\nu=13,400$ . The jet temperature was measured in jet chamber and controlled at  $T_j=27.0^\circ\text{C}$  during experiment.

#### 3.2. Heat transfer measurement

Fig. 4 shows the detail of test section for heat transfer measurement. The test section was mounted upon the jet chamber. The air jets were discharged from orifice plate, and then impinged upon the electrical heated surface for cooling. The heat transfer surface was made of stainless steel foil (30- $\mu\text{m}$ -thickness) which attached with TLC sheet (Omega Engineering, LCS-95) on the rear side of jet impinging surface. The stainless steel foil was stretched between couple of copper bus bars. The heat transfer surface was heated by DC power supply that can supply current up to 50A passes through copper bus bars. An amount of electrical energy is dissipated in the stainless steel foil and is calculated from equation

$$\dot{Q}_{input} = I^2 \cdot R \quad (1)$$

where here,  $I$  is the electrical current and  $R$  is the electric resistance of stainless steel foil.

The local heat transfer coefficient ( $h$ ) can be evaluated from equation

$$h = \frac{\dot{Q}_{input} - \dot{Q}_{losses}}{A(T_w - T_j)} = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_r - \dot{q}_c}{T_w - T_j} \quad (2)$$

where  $\dot{q}_r = \sigma \epsilon_{TLC} (\overline{T_w}^4 - T_s^4)$  and  $\dot{q}_c = \overline{h}_c (\overline{T_w} - T_s)$  are the heat loss transferred to the environment by radiation and convection, respectively. Here,  $\overline{T_w}$  and  $T_j$  are average wall temperature and jet temperature,  $\sigma$  is a Stefan-Boltzman constant,  $\epsilon_{TLC}$  is an emissive coefficient of TLCs (=0.9) [4].  $T_s$  is surrounding temperature and  $\overline{h}_c$  is natural heat transfer coefficient for heat loss from the TLC to the surrounding air.

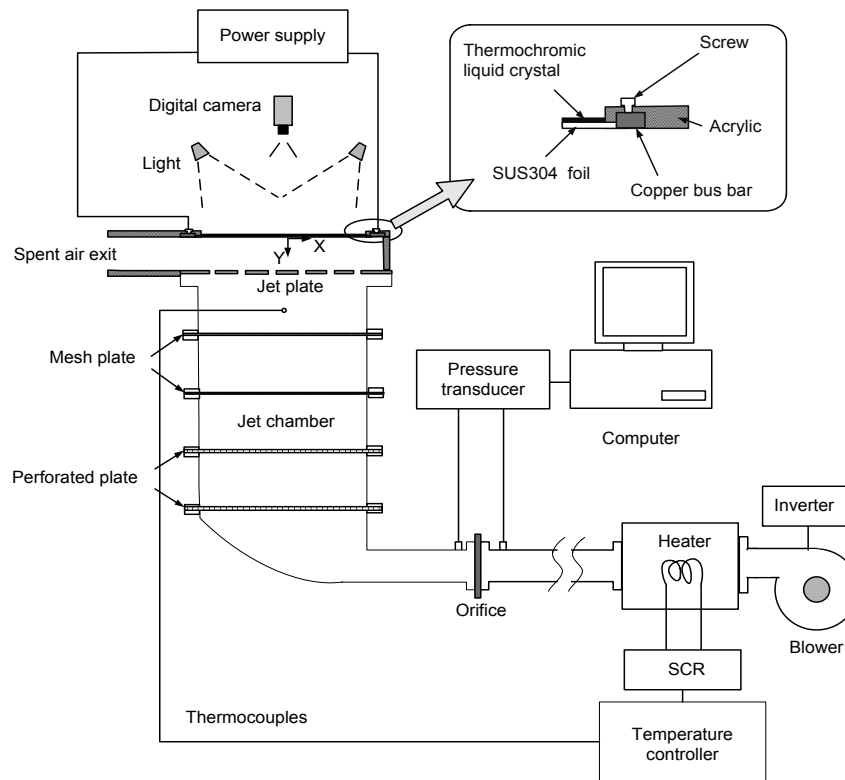


Fig. 4. Schematic diagram of the experimental setup

The wall temperature ( $T_w$ ) on the impinging surface was measured by using TLC sheet that attached on the rear side of jet impinging surface. The CCD camera was used to capture color patterns on TLC sheet. The images of color pattern were converted from the RGB (Red, Green and Blue) color system to the HSI (Hue, Saturation and Intensity) color system. The Hue (H) value was used to correlate the color of TLC to their temperature in range of 28-40°C via calibration experiments. The TLCs was calibrated with same conditions with experiment to keep all external factors constant. The local Nusselt number was calculated from

$$Nu = \frac{hD_E}{k} \quad (3)$$

where,  $D_E$  is the equivalent diameter of orifice and  $k$  is a conductivity of air jet.

An average Nusselt number was calculated from

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}D_E}{k} \quad (4)$$

where here, the average heat transfer coefficient  $\overline{h}$  was calculated from Eq.(2) by replacing  $T_w$  to  $\overline{T_w}$ .

### 3.3. Flow visualization on the impinged surface

The flow visualization on the impinged surface was illustrated by using oil film technique. The oil film was prepared by mixing liquid paraffin, titanium dioxide and oleic acid. A transparent plastic plate was used for jet impinging wall and painted by oil film uniformly. The CCD camera was used to record oil film pattern on the impinged surface every 30 seconds.

## 4. Results and Discussions

### 4.1 Flow patterns on an impinged surface

The flow visualization on the impinged surface is shown in Fig. 5. The black area and white area represent area of oil film removed completely from wall and area of wall with oil film coating, respectively. A white points in the middle of black areas represent the stagnation

point of jet bounded by jet impingement region. The black dots are the location of center of each orifices. The flow patterns of both in-line and staggered arrangement illustrated that the impingement region at downstream (column No. 4-6) moved to downstream by crossflow. Pattern in jet impingement regions depend on the location on jets and jet arrangement.

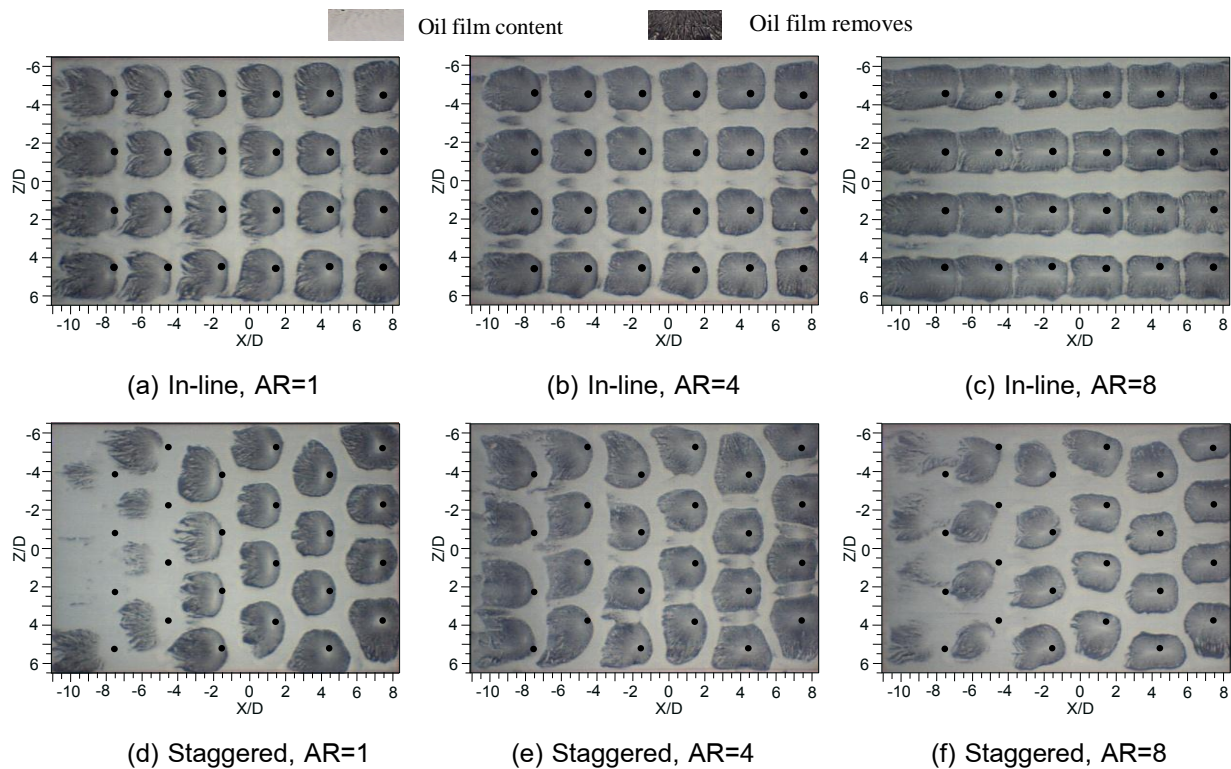


Fig. 5. Flow patterns on the impinged surface ( $Re=13,400$ , black dot represents the center of each orifice)

In the case of in-line arrangement (Fig. 5. (a)-(c)), the characteristic of stagnation regions are different depending on orifice geometry. The stagnation regions of elongated round orifice jet are more extended to crossflow direction, as increase AR, especially, in case of the AR=8. The stagnation regions for AR=1 (Fig.5 (a)) depends on location of jets, the stagnation regions more moved to the downstream for the jets that located far away from column No.1. However, the movement of

impingement region for elongated round orifices (Fig. 5. (b) and (c)) are smaller than case of AR=1 (Fig. 5. (a)). This means that the elongated round orifices for both AR=4 and 8 can decrease the effect of crossflow to impinging jets.

In case of AR=1 with staggered arrangement (Fig. 5. (d)), the stagnation regions of jets that located in upstream region (column No. 1-3) are more clearly expressed than of the jets that located in downstream region (column

No. 4-6). Due to the confined wall, the impinging jets in downstream area affected the strong crossflow by accumulating spent jets from upstream. So that, the jets that located at downstream region (column No. 4-6) are mixing strongly with crossflow and lose momentum for impinging on target surface. It is contrast from case of in-line arrangement (Fig. 5 (a)). It shows that the stagnation regions are slightly different between upstream and downstream region. Because, the spent jets can passes easily through the channel between the rows of jets. So, the crossflow effect on impinging jets becomes small.

In case of AR=4 with staggered arrangement (Fig. 5. (e)), the stagnation regions

at downstream region (column No. 4-6) are clearer than case of the AR=1 (Fig. 5. (d)). Because, the effect of crossflow on jets from orifices case of AR=4 is weaker than case of AR=1. However, the stagnation regions at downstream region for case of AR=8 are unclear as same as case of AR=1. Since, the orifice with AR=8 is slim and the circumference of this orifice jet which contact with crossflow is larger than case of AR=4, so the mixing between jet and crossflow is more than case of AR=4. The momentum of jet impinged on their target surface is smaller than case of AR=4.

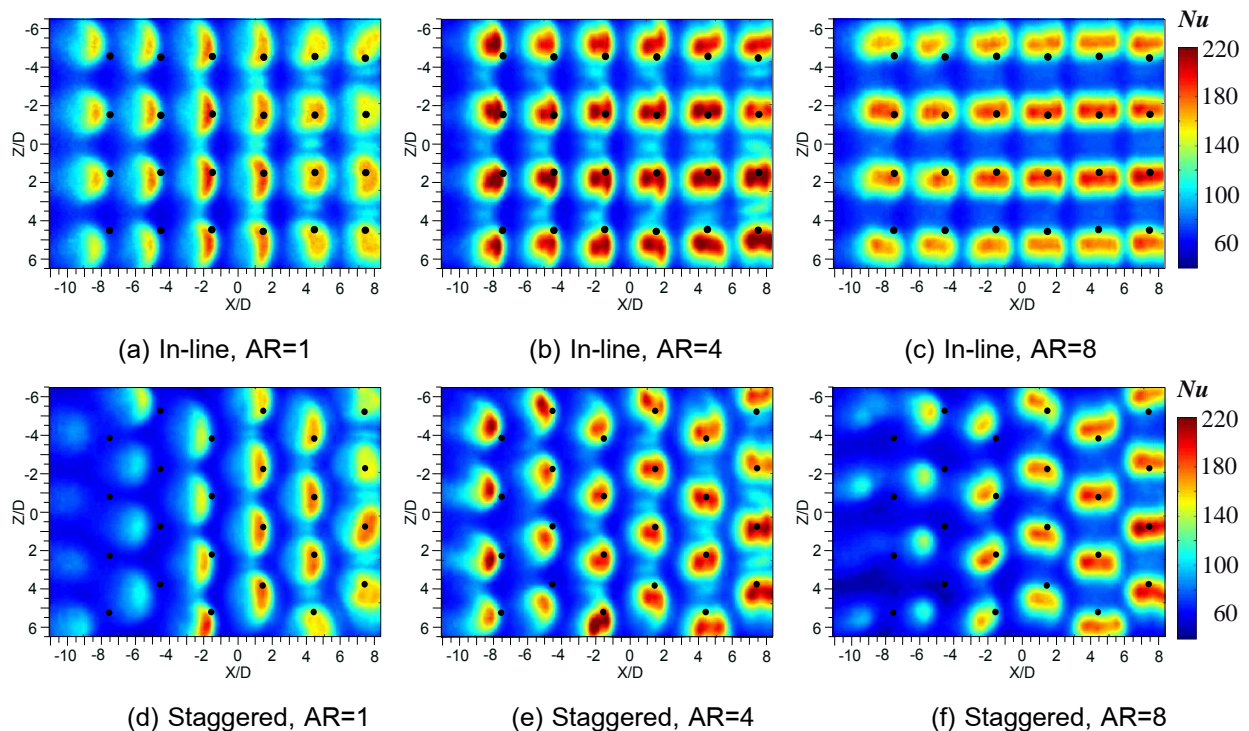


Fig. 6. Nusselt number distribution on the impinged surface ( $T_j=27^\circ\text{C}$ ,  $Re=13,400$ , black dot represents the center of orifice)



#### 4.2 The local Nusselt number on the impinged surface

The Nusselt number distributions on the impinged surface are shown in Fig. 6. The characteristic of heat transfer corresponded the flow pattern on the impinged surface (Fig.5) with same experimental condition. The Nusselt number in stagnation regions for case of AR=4 and 8 with in-line arrangement is higher than of AR=1. The area of high heat transfer for AR=4 and 8 are extended in crossflow direction corresponding to the orifice geometry.

The Nusselt number characteristic of the staggered arrangement is contrast with case of the in-line arrangement. The Nusselt number in upstream region (column No. 1-3) for case of staggered arrangement is high, but decrease rapidly as going downstream (column No. 4-5). Except for case of AR=4, the Nusselt number decreases gradually when compare with the upstream area of itself. The impinging jets from orifices case of AR=4 can increase heat transfer for both in-line and staggered arrangement. But, the impinging jets from orifices at AR=8 can

increase heat transfer only for in-line arrangement. The reason has been discussed in flow visualization results.

Fig. 7 (a) shows the local Nusselt number distribution along  $Z/D=0$  and 1.5 for the in-line arrangement. The results show that impinging jets from orifices at AR=4 give highest peak of Nusselt number. However, it is lower than case of AR=8 in area between the column of jet. The high heat transfer compensate from the stagnation region to area of between the column of jet for case of the AR=8, so the peak of Nusselt number at stagnation region for AR=4 is higher than of AR=8. In addition, the Nusselt number at area of between the rows of jet (dash line) for AR=8 are lowest.

Fig. 7 (b) shows the local Nusselt number distribution along  $Z/D=2.25$  for staggered arrangement. The peak of Nusselt number is only high in upstream region (column No. 1-3) and decrease as going downstream (column No. 5). Except for case of AR=4, the peak of Nusselt number is still high in downstream region.



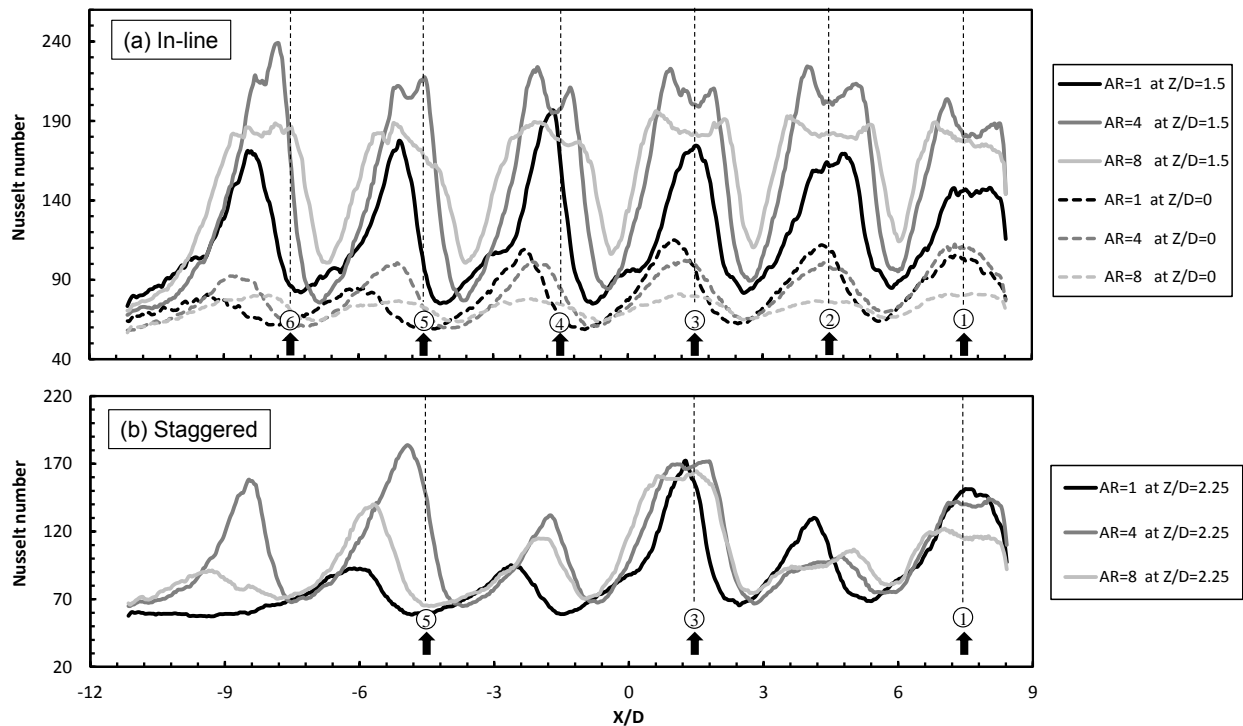


Fig. 7. Local Nusselt number distribution along crossflow direction ( $T_j=27^{\circ}\text{C}$ ,  $Re=13,400$ )

### 4.3 Average Nusselt number

The average Nusselt number on the impinging surface was calculated by using average temperature in area of  $-6.5 < Z/D < 6.5$  and  $-11.15 < X/D < 8.4$ . The results for each orifice geometry and arrangements are compared in Fig. 8. The elongated round orifice can increase heat transfer rate on impingement region. The average Nusselt number of the in-line arrangement is higher than case of staggered arrangement for all of AR. The average Nusselt number for AR=4 with in-line arrangement is highest and slightly higher than case of AR=8. In case of in-line arrangement, the average Nusselt number for both case of AR=4 and 8 are higher 6.04 % and 5.54 % than case of AR=1. However, for the staggered arrangement, only average Nusselt number for case of AR=4 is higher 12.52% than of AR=1, but for case of

AR=8, the average Nusselt number is smaller when compare with case of AR=1.

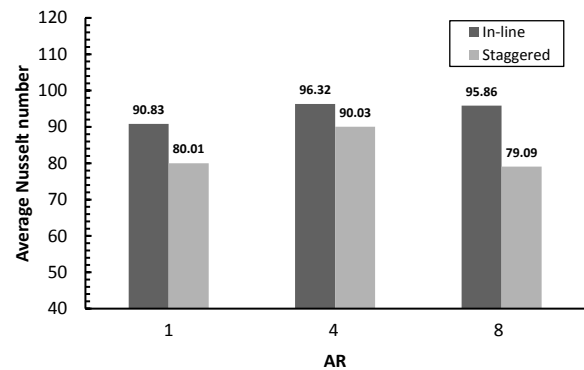


Fig. 8. Average Nusselt number

### 5. Conclusions

In present study, the effects of orifice geometry and jet flow arrangement were experimentally investigated. The main results were shown as follows;

- (1) The impinging jets from elongated round orifices AR=4 can decrease effect of crossflow for both in-line and staggered arrangement, so



the heat transfer rate for both jet arrangement is higher than case of AR=1 and 8.

(2) The AR=8 can increase the heat transfer in stagnation region and area between columns of jet for in-line arrangement, but it is rapidly decrease in downstream region for staggered arrangement.

(3) The average Nusselt number of the in-line arrangement are higher than of staggered arrangement for any AR, and the average Nusselt number for AR=4 is the highest.

#### **Acknowledgement**

This research was sponsored by Faculty of Engineering, Prince of Songkla University through grant No. ENG-53-2-7-02-0070-S.

#### **References**

- [1] Katti, V. and Prabhu, S. V. (2008), Influence of spanwise pitch local heat transfer distribution for in-line arrays of circular jets with air flow in two opposite, *Experimental Thermal and Fluid Science J.*, vol. 33, pp. 84 – 95.
- [2] Brizzi, L.E., Bernard, A., Bousgarbies, J. L., Dornnac, E. and Vullierme, J. J. (2000), Study of several impinging jet, *Thermal Science J.*, vol. 9 (3), pp. 217 – 223.
- [3] Bouchez, J.P. and Goldstein, R.J. (1975), Impingement cooling from a circular jet in a crossflow, *Heat and Mass Transfer Int. J.*, vol. 18, pp. 719 – 730.
- [4] Geers, L.F.G., Tummers, M.J., Bueninck, T.J. and Hanjalic, K. (2008), Heat transfer correlation for hexagonal and in-line arrays of impinging jets, *Heat and Mass Transfer Int. J.*, vol. 51, pp. 5389 – 5399.

**การพิจารณาถ่ายโอนความรับผิดชอบของกลุ่มฯ ให้บริษัทฯ จากกระแสเงินสดด้วยวิธีปรับปรุงรูปแบบปากทางออกเจ้า**

**ชยุต นันทกุลิต 2554**