

อภิธาน์นทาการ



สำนักหอสมุด



การศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของเจ็ท  
ของของไหลนาโนแบบสมมาตรตามแกนในสองมิติ  
NUMERICAL STUDY OF HEAT TRANSFER OF TWO-DIMENSIONALLY  
AXI-SYMMETRIC JET IMPINGEMENT OF NANOFLUID

|                                    |
|------------------------------------|
| สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| วันลงทะเบียน..... ๖ มี.ค. ๒๕๖๖     |
| เลขทะเบียน..... 19196363           |
| เลขเรียกหนังสือ.....               |

|                  |             |               |
|------------------|-------------|---------------|
| นางสาวธัญญารัตน์ | พลสี        | รหัส 55363230 |
| นางสาวรัชชรี     | พรประทุม    | รหัส 55363483 |
| นางสาวหทัยรัตน์  | กันทะอินทร์ | รหัส 55363667 |

ป/ร  
๙ ๕๘ ๓  
๒๕๖๘

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ปีการศึกษา 2558



### ใบรับรองปริญญาโท

|                   |  |           |          |
|-------------------|--|-----------|----------|
| ชื่อหัวข้อโครงการ | การศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของ<br>เจ็ทของของไหลนาโนแบบสมมาตรตามแกนในสองมิติ |           |          |
| ผู้ดำเนินโครงการ  | นางสาวธัญญารัตน์ พลสี  | รหัสนิสิต | 55363230 |
|                   | นางสาวรัชรี พรประทุม   | รหัสนิสิต | 55363483 |
|                   | นางสาวหทัยรัตน์ กันทะอินทร์  | รหัสนิสิต | 55363667 |
| ที่ปรึกษาโครงการ  | รองศาสตราจารย์ ดร. กุลยา กนกจรรูจิตร   |           |          |
| สาขาวิชา          | วิศวกรรมเครื่องกล  |           |          |
| ภาควิชา           | วิศวกรรมเครื่องกล  |           |          |
| ปีการศึกษา        | 2558   |           |          |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ

*Konfasa K. Vijit* .....ที่ปรึกษาโครงการ

(รศ.ดร.กุลยา กนกจรรูจิตร)

*[Signature]* .....กรรมการ

(ดร.ภาณุ พุทวงค์)

*[Signature]* .....กรรมการ

(ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

|                      |  |             |                    |
|----------------------|--|-------------|--------------------|
| ชื่อหัวข้อโครงการงาน | การศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนของการกระแตกของเจ็ทของของไหลนาโนแบบสมมาตรตามแกนในสองมิติ |             |                    |
| ผู้ดำเนินโครงการงาน  | นางสาวธัญญารัตน์   | พลสี        | รหัสนิสิต 55363230 |
|                      | นางสาวรัชรี  | พรประทุม    | รหัสนิสิต 55363483 |
|                      | นางสาวหทัยรัตน์  | กันทะอินทร์ | รหัสนิสิต 55363667 |
| ที่ปรึกษาโครงการงาน  | รองศาสตราจารย์ ดร. กุลยา กนกजारุจิตร   |             |                    |
| สาขาวิชา             | วิศวกรรมเครื่องกล  |             |                    |
| ภาควิชา              | วิศวกรรมเครื่องกล  |             |                    |
| ปีการศึกษา           | 2558   |             |                    |

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของการกระแตกของเจ็ทของของไหลนาโนแบบ 2 มิติสมมาตรตามแกนของการไหลแบบปั่นป่วนที่สภาวะคงที่ด้วยแบบจำลอง  $k-\epsilon$  โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาถึงผลกระทบของความเข้มข้นอนุภาคทองแดง ( $\phi$ ) 0%, 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยปริมาตร นอกจากนั้นยังพิจารณาลักษณะของพื้นผิวดกกระทบซึ่งได้แก่ พื้นผิวเรียบ พื้นผิวเว้า และพื้นผิวนูน ที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่ ( $q''$ ) เท่ากับ  $550 \text{ kW/m}^2$  เลข Reynolds คงที่ (Re) เท่ากับ 7,000 เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $D_j$ ) 4 mm อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดและพื้นผิวส่วนที่เรียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $H/D_j$ ) เท่ากับ 4 ค่าความโค้งสัมผัสสำหรับพื้นผิวเว้าและพื้นผิวนูนซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความลึกของผิวเว้าหรือความสูงของผิวนูนกับเส้นผ่านศูนย์กลางภาพฉายของผิวเว้าหรือผิวนูน ( $d/D_a$ ) เท่ากับ 0.125 และรายงานผลการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลข Nusselt เมื่อเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนกับของไหลฐาน (น้ำ) พบว่าของไหลนาโนที่ทุกความเข้มข้นให้การถ่ายเทความร้อนดีกว่าของไหลฐาน และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคทองแดงการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามลำดับสำหรับการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวดกกระทบทั้งสาม พบว่าพื้นผิวนูนให้ผลการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าพื้นผิวเรียบในขณะที่พื้นผิวเว้าให้การถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าพื้นผิวเรียบ สุดท้ายสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของของไหลนาโนและเลข Nusselt เฉลี่ย ของพื้นผิวดกกระทบได้ดังนี้ พื้นผิวเรียบ ;  $Nu_{ave}=58.247 \phi^{0.08}$  พื้นผิวเว้า ;  $Nu_{ave}=48.8131 \phi^{0.0945}$  และพื้นผิวนูน ;  $Nu_{ave}=124.0891 \phi^{0.25776}$

|                        |  |             |              |
|------------------------|--|-------------|--------------|
| <b>Project Title</b>   | Numerical study of heat transfer of two-dimensionally axi-symmetric jet impingement of nanofluid |             |              |
| <b>Name</b>            | Tunyarut   | Polsee      | ID. 55363230 |
|                        | Racharee   | Pronprathum | ID. 55363483 |
|                        | Hathairat  | Kuntain     | ID. 55363667 |
| <b>Project advisor</b> | Assoc. Prof. Dr. Koonlaya Kanokjaruvijit   |             |              |
| <b>Major</b>           | Mechanical Engineering   |             |              |
| <b>Department</b>      | Mechanical Engineering   |             |              |
| <b>Academic year</b>   | 2558   |             |              |

---

### Abstract

This study is to numerically study the heat transfer of two-dimensionally axi-symmetric jet impingement of nanofluid at a steady state by using the finite element method. The flow was assumed turbulent and follow  $k-\varepsilon$  model. Nanoparticles made of copper in water was used at different concentrations between 2% to 10% by volume with water as a baseline case. In addition, three types of impingement target plates were tested such as a flat plate, a concave surface and a convex surface with constant heat flux of  $550 \text{ kW/m}^2$ . Reynolds number based on jet diameter ( $D_j$ ) was fixed at 7000. The jet-to-plate spacing ( $H/D_j$ ) of 4 was used thoroughly. For the concave and the convex surfaces, the relative curvature defined as the ratio of the height or the depth of the curvature and the projected diameter of the concave or the convex surface ( $d/D_d$ ) was fixed at 0.125. Heat transfer results in terms of dimensionless Nusselt number defined as  $Nu = hD_j / \lambda_{nf}$  were reported. The convex surface with the copper nanoparticles in water of concentrations of 8% and 10% by volume gave the highest heat transfer. Finally, correlations between the average Nusselt number and the nanoparticle concentrations were obtained for the flat surface :  $Nu_{ave} = 58.247 \phi^{0.08}$ , the concave surface :  $Nu_{ave} = 48.8131 \phi^{0.0945}$  and the convex surface :  $Nu_{ave} = 124.0891 \phi^{0.25776}$

### กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่านซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมด ด้านการให้คำแนะนำในการทำโครงการจาก รองศาสตราจารย์ ดร. กุหลาบ กนกจรรูจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการได้ให้ความรู้ คำแนะนำตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน เพื่อให้การเขียนโครงการนี้ออกมาสมบูรณ์ที่สุด คำปรึกษาแก่ผู้ดำเนินโครงการตลอดมา และอาจารย์จิระศักดิ์ ศิริโกคาร์ตนา ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม COMSOL ผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบ ท่านแรก ดร.ภาณุ พุทธวงศ์ ท่านที่สอง ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว ที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของรูปเล่มโครงการ

สุดท้ายนี้ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้ศึกษาเสมอมา ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ไว้ ณ โอกาสนี้



คณะผู้จัดทำโครงการ

## สารบัญ

หน้า

|  |    |
|--|----|
| บทคัดย่อ.....                                | ข  |
| Abstract.....                                | ค  |
| กิตติกรรมประกาศ .....                        | ง  |
| สารบัญ.....                                  | จ  |
| สารบัญตาราง.....                             | ช  |
| สารบัญรูป .....                              | ฉ  |
| บทที่ 1 บทนำ .....                           | 1  |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ .....        | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์.....                        | 2  |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....          | 2  |
| 1.4 ขอบเขตของโครงการ .....                   | 2  |
| 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....                 | 3  |
| 1.6 แผนการดำเนินโครงการ .....                | 5  |
| 1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ .....      | 5  |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์.....        | 6  |
| 2.1 ทฤษฎี.....                               | 6  |
| 2.1.1 ของไหลนาโน (Nanofluids).....           | 6  |
| 2.1.2 สมการควบคุม (Governing Equations)..... | 7  |
| 2.1.3 การถ่ายเทความร้อน .....                | 8  |
| 2.2 วรรณกรรมปริทัศน์.....                    | 8  |
| บทที่ 3 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม.....            | 12 |
| 3.1 การเลือกรูปแบบการคำนวณ .....             | 13 |
| 3.2 การสร้างโดเมนการคำนวณ .....              | 14 |
| 3.3 การกำหนดสภาวะขอบเขต.....                 | 16 |
| 3.3.1 การกำหนดขอบเขตของการไหล .....          | 16 |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 3.3.2 กำหนดขอบเขตของการถ่ายเทความร้อน.....   | 20   |
| 3.4 การสร้างเมช.....   | 23   |
| 3.4.1 การกำหนดความละเอียดของเมช .....  | 24   |
| 3.5 การคำนวณเพื่อหาคำตอบ .....   | 25   |
| 3.5.1 การตั้งค่า Solver.....   | 25   |
| 3.6 การแสดงผลลัพธ์ .....   | 27   |
| 3.6.1 แสดงผลในรูปของความเร็ว.....  | 27   |
| 3.6.2 แสดงผลในรูปของอุณหภูมิ.....  | 28   |
| 3.7 การนำข้อมูลออกจากโปรแกรม Comsol.....   | 28   |
| 3.7.1 ขั้นตอนการบันทึกข้อมูล .txt.....   | 29   |
| 3.7.2 การนำข้อมูล .txt เข้าสู่ Excel.....  | 30   |
| บทที่ 4 ขั้นตอนการคำนวณ .....  | 33   |
| 4.1 สภาพขอบเขตและสมบัติของของไหลทำงาน .....  | 34   |
| 4.2 สมการสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน (Governing Equations).....                 | 36   |
| 4.3 การสร้างเมช.....   | 38   |
| 4.3.1 ขั้นตอนในการสร้างเมช.....  | 38   |
| 4.3.2 ผลกระทบของความหนาแน่นของเมชที่มีต่อคำตอบ.....                                  | 39   |
| 4.4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลจากงานวิจัยจากวรรณกรรม .....                        | 41   |
| บทที่ 5 ผลการคำนวณและการอภิปรายผล.....   | 44   |
| 5.1 ผลกระทบของความเข้มข้นอนุภาคนาโนที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน .....                   | 44   |
| 5.2 ผลกระทบของลักษณะพื้นผิวตกรกระทบ .....  | 47   |
| 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน..... | 52   |
| บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....  | 56   |
| ข้อเสนอแนะ .....   | 57   |
| อ้างอิง .....  | 58   |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง ..... 60

ประวัติผู้จัดทำ..... 64





สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 3.1 การกำหนดขนาดของโดเมน.....  | 16   |
| ตารางที่ 3.2 การกำหนดขอบเขตของการไหล.....   | 20   |
| ตารางที่ 3.3 การกำหนดสภาวะขอบเขตของการถ่ายเทความร้อน .....  | 23   |
| ตารางที่ 4.1 สมบัติของของไหลทำงาน .....   | 36   |
| ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบเมื่อความหนาแน่นของเมชในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไป .....                              | 41   |
| ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลค่า Nusselt เฉลี่ยของผิวตกกระทบ .....  | 52   |
| ตารางที่ 5.2 ค่า B และ $\ln A$ .....  | 53   |
| ตารางที่ ก.1 เลข Nussult ที่จุดตกกระทบ .....  | 61   |
| ตารางที่ ก.2 เลข Nussult เฉลี่ย.....  | 61   |
| ตารางที่ ก.3 เปรียบเทียบความแตกต่างของเลข Nusselt ที่จุดตกกระทบของพื้นผิวเว้ากับพื้นผิวเรียบ และของพื้นผิวนูนกับพื้นผิวเรียบ .....  | 61   |
| ตารางที่ ก.4 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเลข Nusselt ระหว่างของพื้นผิวเว้ากับพื้นผิวเรียบและระหว่างของพื้นผิวนูนกับพื้นผิวเรียบ ..... | 62   |
| ตารางที่ ก.5 การเปรียบเทียบ $Nu_0$ ของของไหลนาโนกับของไหลฐาน (น้ำ).....   | 62   |
| ตารางที่ ก.6 การเปรียบเทียบ $Nu_{ave}$ ของของไหลนาโนกับของไหลฐาน (น้ำ).....   | 62   |

## สารบัญรูป

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1.1 Data reduction .....   | 3    |
| รูปที่ 1.2 โดเมนการคำนวณ .....  | 4    |
| รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Comsol .....  | 12   |
| รูปที่ 3.2 การกำหนดโจทย์ที่ศึกษา .....  | 14   |
| รูปที่ 3.3 โดเมนการคำนวณ .....  | 15   |
| รูปที่ 3.4 การกำหนดขนาดของโดเมน .....   | 16   |
| รูปที่ 3.5 การตั้งค่า Physics ของการไหลของโดเมนที่ 1 .....                                | 17   |
| รูปที่ 3.6 การตั้งค่า Physics ของการไหลของโดเมนย่อยที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นน้ำ .....          | 18   |
| รูปที่ 3.7 การตั้งค่า stabilization ของการไหลของโดเมนย่อยที่ 1, 2 และ 3 .....             | 18   |
| รูปที่ 3.8 การเตรียมการกำหนดสภาวะขอบเขตของการไหล .....                                    | 19   |
| รูปที่ 3.9 การกำหนดขอบเขตของโดเมน .....   | 20   |
| รูปที่ 3.10 การตั้งค่า Physics ของการถ่ายเทความร้อน ของโดเมนที่ย่อย 1, 2 และ 3 .....      | 21   |
| รูปที่ 3.11 การตั้งค่า stabilization ของการถ่ายเทความร้อนของโดเมนย่อยที่ 1, 2 และ 3 ..... | 21   |
| รูปที่ 3.12 การตั้งค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของโดเมนย่อยที่ 1, 2 และ 3 .....                    | 22   |
| รูปที่ 3.13 การตั้งค่าสภาวะขอบเขตของการถ่ายเทความร้อน .....                               | 22   |
| รูปที่ 3.14 การกำหนดสภาวะขอบเขตของโจทย์การถ่ายเทความร้อน .....                            | 23   |
| รูปที่ 3.15 การกำหนดเมชบริเวณผิวตกระทบ .....  | 24   |
| รูปที่ 3.16 การสร้างเมช .....   | 25   |
| รูปที่ 3.17 การกำหนด Solver .....   | 26   |
| รูปที่ 3.18 การกำหนด Stationary Segregated groups .....                                   | 26   |
| รูปที่ 3.19 กราฟคำตอบวิ่งลู่อู่เข้าภายหลังการคำนวณ .....                                  | 27   |
| รูปที่ 3.20 การแสดงผลลัพธ์ในรูปของสนามความเร็ว .....                                      | 27   |
| รูปที่ 3.21 ผลลัพธ์ในรูปของอุณหภูมิ (หมายเหตุ : สังเกตอุณหภูมิที่พื้นผิวตกระทบ) .....     | 28   |
| รูปที่ 3.22 การกำหนดพิกัดของระยะผิวตกระทบ และกราฟของอุณหภูมิที่ผิวตกระทบ .....            | 29   |
| รูปที่ 3.23 การบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์สกุล .text .....                                       | 30   |

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 3.24 การเปิดข้อมูลเป็นไฟล์สกุล .txt ให้อยู่ในโปรแกรม Excel .....   | 31 |
| รูปที่ 3.25 ข้อมูลที่นำเข้าสู่โปรแกรม Excel .....   | 32 |
| รูปที่ 4.1 ขั้นตอนในการคำนวณโจทย์การถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของเจ็ตที่มีของไหลนาโน เป็นของไหลทำงานโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ..... | 33 |
| รูปที่ 4.2 โดเมนการคำนวณ และการกำหนดสภาวะขอบเขตของการคำนวณ .....  | 34 |
| รูปที่ 4.3 node ในสามเหลี่ยมไร้ระเบียบ .....  | 38 |
| รูปที่ 4.4 การสร้างเมชที่ความหนาแน่นบริเวณผิวตกรกระทบที่ต่างกัน .....   | 40 |
| รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Huang และคณะ [11].....   | 42 |
| รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Li และคณะ [12].....  | 42 |
| รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt number) กับความเข้มข้น 2%, 4%, 6% และ 10% โดยปริมาตร บนผิวตกรกระทบแบบเรียบ ..... | 46 |
| รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt number) กับความเข้มข้น 2%, 4%, 6% และ 10% โดยปริมาตร บนผิวตกรกระทบแบบเว้า .....  | 46 |
| รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt number) กับความเข้มข้น 2%, 4%, 6% และ 10% โดยปริมาตร บนผิวตกรกระทบแบบนูน .....   | 47 |
| รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (NuLocal) ของพื้นผิวตกรกระทบแบบเรียบ เว้า และนูน ที่ความเข้มข้นของอนุภาคต่าง ๆ .....            | 49 |
| รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่า Nusselt ณ จุดตกรกระทบ (Nu0) ของพื้นผิวตกรกระทบแบบเรียบ เว้า และนูน ที่ความเข้มข้นของอนุภาคต่าง ๆ .....           | 50 |
| รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉลี่ย (Nuave) ของพื้นผิวตกรกระทบแบบเรียบ เว้า และนูน ที่ความเข้มข้นของอนุภาคต่าง ๆ .....                | 50 |
| รูปที่ 5.7 โครงสร้างของการไหลที่ Re=6000 H/Dj=4 ที่ตกรกระทบลงบนพื้นผิว (ที่มา : Cornaro และ คณะ [11]) .....                                   | 51 |
| รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์และสมการของ Nuave กับ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ( $\phi$ ) .....  | 53 |
| รูปที่ 5.9 การแสดงความสัมพันธ์ของ Nuave กับ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ( $\phi$ ) .....   | 55 |
| รูปที่ 6.1 ลักษณะการไหลแบบ Crossflow เมื่อมองจากด้านบน .....  | 57 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

การระบายความร้อนมีบทบาทสำคัญต่อภาคอุตสาหกรรมและงานทางเทคโนโลยี เมื่อระบบเริ่มทำงานทำให้อุปกรณ์ในระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหาย และไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนออกจากระบบ เพื่อป้องกันอุปกรณ์ไม่ให้เกิดความเสียหาย

การกระแทกของเจ็ทลงบนพื้นผิวตกกระทบเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงเพราะอาศัยการถ่ายเทโมเมนตัม และเพิ่มความปั่นป่วนการไหลของของไหลทำงาน เมื่อมีความปั่นป่วนมากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้น ของไหลนาโนคือ การใส่อนุภาคของแข็งที่มีขนาดระดับนาโนเมตรลงไปของไหลฐาน ซึ่งเริ่มเป็นที่รู้จักในงานถ่ายเทความร้อน โดยสมบัติของโลหะที่อยู่ในสถานะของแข็งมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าของเหลว ดังนั้นของเหลวที่มีอนุภาคของแข็งผสมอยู่จึงคาดว่ามีค่าการนำความร้อนสูงกว่าของไหลฐานส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น จากงานวิจัยของ Kanokjaruvijit และ Marrinez-Butas [1] การเพิ่มพื้นที่เกี่ยวกับการกระแทกของเจ็ทลงบนพื้นผิวรอยบุ่ม (เว้า) พบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเมื่อมีการไหลแบบขนานร่วมด้วย นอกจากนี้งานวิจัยของ Lee และคณะ [2] ที่เกี่ยวกับการกระแทกของเจ็ทลงบนพื้นผิวทูนให้การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเรียบ

ในที่นี้เราจะศึกษาลักษณะของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทตกกระทบลงบนพื้นผิวแบบต่าง ๆ โดยใช้ของไหลนาโนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาเปรียบเทียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของเจ็ทของของไหลนาโน 2 มิติแบบสมมาตรตามแกนของการไหลแบบปั่นป่วนที่สภาวะคงที่ด้วยแบบจำลอง  $k-\epsilon$
2. ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในน้ำที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของเจ็ท
3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ผิวตกระทอบที่มีลักษณะเรียบ เว้า และนูน

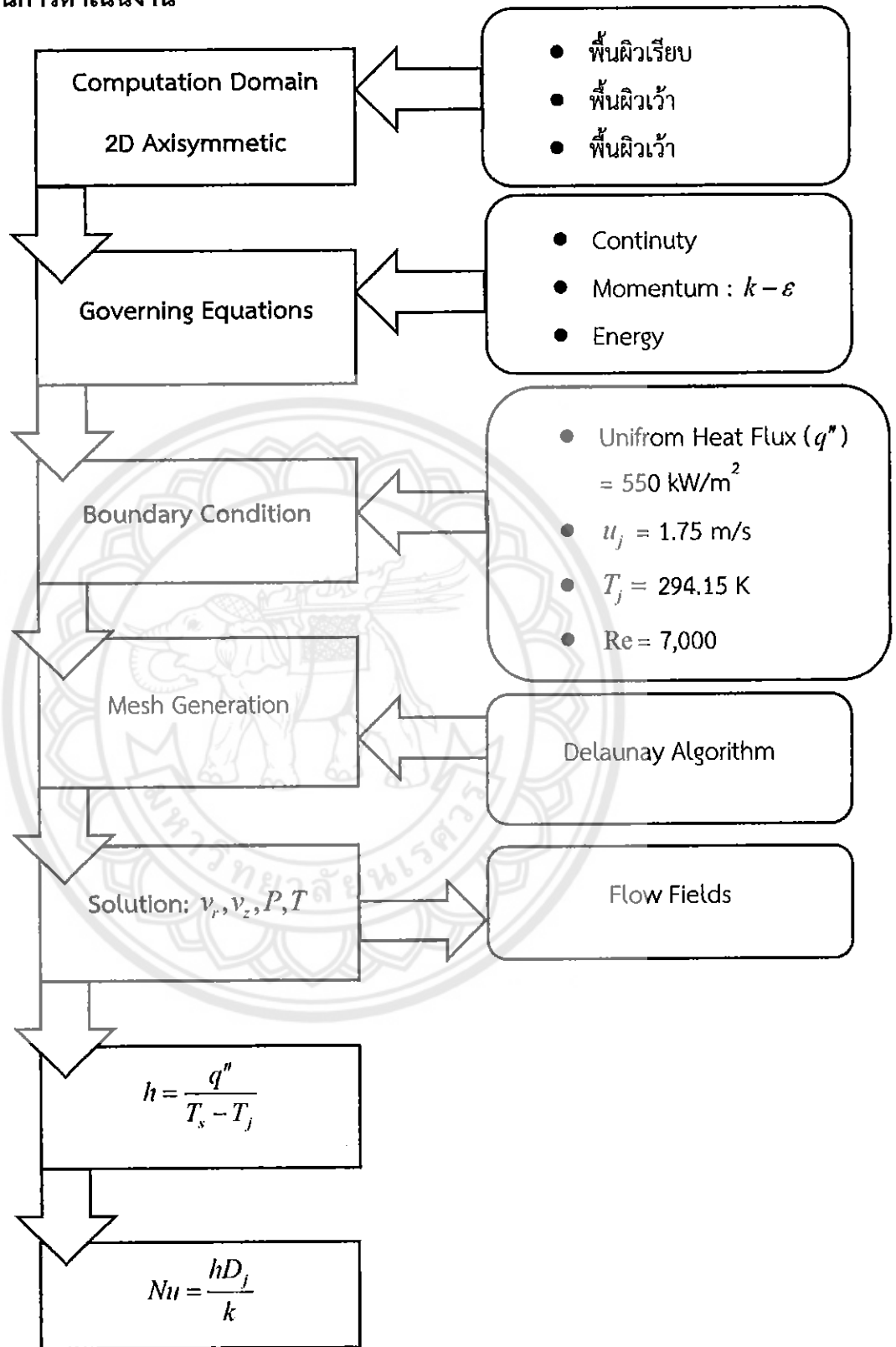
## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบการระบายความร้อนในทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การออกแบบ Cooling Scheme ของใบพัดกังหันก๊าซ การระบายความร้อนใน CPU ของคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

## 1.4 ขอบเขตของโครงการ

1. โดเมนการคำนวณเป็นสองมิติสมมาตรตามแกน (2D Axi-symmetric)
2. สภาวะคงที่ (Steady State)
3. ของไหลเป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid)
4. การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนตามแบบจำลอง  $k-\epsilon$
5. ฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Uniform Heat Flux)  $550 \text{ kW/m}^2$
6. ลักษณะพื้นผิวตกระทอบแบบผิวเรียบ นูน (Convex) และเว้า (Concave)
7. ความเข้มข้นของอนุภาคทองแดงในน้ำซึ่งทำหน้าที่เป็นของไหลฐาน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยปริมาตร
8. เลข Reynolds ที่ 7,000
9. อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดและผิวตกระทอบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด  $H/D_j = 4$
10. พื้นผิวไม่ลื่นไถล (No-slip condition)

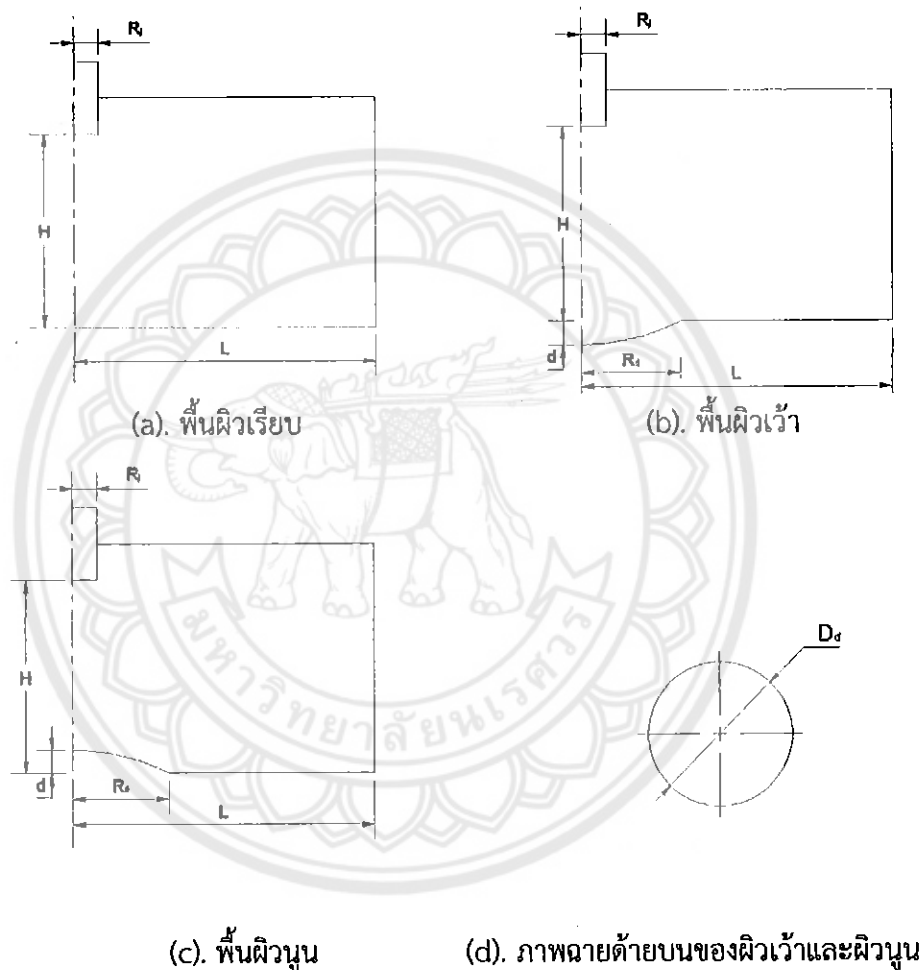
### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 Data reduction

รูปที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินการซึ่งเป็นการสรุปขั้นตอนการทำโครงการโดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและจัดทำวรรณกรรมปริทัศน์
2. สร้างโดเมนการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งจะพิจารณาพื้นผิวตกระทบ 3 รูปแบบ ได้แก่ พื้นผิวตกระทบเรียบซึ่งใช้เป็นกรณีฐาน (Baseline case) พื้นผิวเว้า และพื้นผิวนูน มีลักษณะของการเว้าและนูนเป็นส่วนโค้งของวงกลม โดยกำหนด ส่วนที่เว้าและนูนเป็นระยะกว้างเท่ากับ  $R_d$  และเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนและเว้าเท่ากับ  $D_d$



รูปที่ 1.2 โดเมนการคำนวณ

3. กำหนดรูปแบบการไหลโดยใช้สมการควบคุมได้แก่ กฎอนุรักษ์มวล (Continuity) กฎอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum) และกฎอนุรักษ์พลังงาน (Energy)
4. ตั้งสมมติฐานในการศึกษาเป็น ฟลักซ์ความร้อนคงที่ ความเร็วและอุณหภูมิที่ทางออกของหัวฉีด และเลข Reynolds คงที่
5. สร้าง Mesh ด้วย Delaunay Algorithm
6. ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณเพื่อให้ได้ Node ต่าง ๆ

7. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิผิวตกระหอบ ( $h$ ) และเลข Nussult
8. วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง
9. สรุปผลการวิจัย
10. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

### 1.6 แผนการดำเนินงาน

| กิจกรรม   | 2558 |      |      |      | 2559 |      |       |       |
|---|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|   | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. |
| 1. ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและจัดทำวรรณกรรมปริทัศน์  | ■    |      |      |      |      |      |       |       |
| 2. สร้างโดเมนการคำนวณ   |      | ■    |      |      |      |      |       |       |
| 3. กำหนดสมการควบคุม   |      |      | ■    |      |      |      |       |       |
| 4. ตั้งสมมติฐานในการศึกษา                                     |      |      | ■    |      |      |      |       |       |
| 5. สร้าง Mesh ด้วย Delaunay Algorithm                         |      |      |      | ■    |      | ■    |       |       |
| 6. ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณ                 |      |      |      | ■    |      | ■    |       |       |
| 7. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิผิวตกระหอบ |      |      |      |      | ■    | ■    |       |       |
| 8. วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง                              |      |      |      |      |      | ■    |       |       |
| 9. สรุปผลการวิจัย   |      |      |      |      |      |      | ■     |       |
| 10. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์                                  |      |      |      |      |      |      |       | ■     |

### 1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

- |                        |      |     |
|------------------------|------|-----|
| 1.7.1 กระดาษ           | 1000 | บาท |
| 1.7.2 จัดทำรูปเล่ม     | 1000 | บาท |
| 1.7.3 ค่าอุปกรณ์อื่น ๆ | 1000 | บาท |



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 ทฤษฎี

##### 2.1.1 ของไหลนาโน (Nanofluids)

ของไหลนาโน (Nanofluids) คือ การใส่อนุภาคของของแข็ง (Nanoparticles) ที่มีขนาดระดับนาโนเมตรลงไปของไหลฐาน (Base Fluid) เป็นที่ทราบกันว่าโลหะที่อยู่ในสถานะของแข็งมาค่าการนำความร้อนสูงกว่าของเหลว ดังนั้นของเหลวที่มีอนุภาคของแข็งผสมอยู่จึงคาดได้ว่ามีค่าการนำความร้อนสูงกว่าของไหลฐาน ดังนั้นจึงเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนโดยการเติมอนุภาคของของแข็งจะเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้ประสิทธิภาพการนำความร้อนเพิ่มมากขึ้น และยังเป็น การเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลเพราะมีสมบัติในการฟุ้งกระจาย โดยมีความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของของไหลนาโน ( $\rho_{nf}$ ) ความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน ( $C_{p,nf}$ ) และความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ( $\phi$ ) ดังนี้คือ

$$\text{ความหนาแน่น:} \quad \rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (2.1)$$

$$\text{ความร้อนจำเพาะ:} \quad C_{p,nf} = (1-\phi)C_{p,bf} + \phi C_{p,p} \quad (2.2)$$

เมื่อ ตัวห้อย  $nf$  แสดงสมบัติของของไหลนาโน

$bf$  แสดงสมบัติของของไหลฐาน

$p$  แสดงสมบัติของอนุภาคนาโน

นอกจากนี้ความหนืดพลวัตและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลนาโนหาได้จาก

$$\text{ความหนืดพลวัต:} \quad \mu_{nf} = \mu_{bf}(123\phi^2 + 7.3\phi + 1) \quad (2.3)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การนำความร้อน:} \quad \lambda_{nf} = \lambda_{bf}(4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1) \quad (2.4)$$

### 2.1.2 สมการควบคุม (Governing Equations)

ในการศึกษานี้กำหนดลักษณะการไหลให้อยู่ที่สภาวะคงตัว (Steady state) มีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) และเป็นแบบสองมิติสมมาตรตามแนวแกน (2D Axial-symmetry) จึงอาศัยการคำนวณจากแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  โดยมีสมบัติของของไหลคงที่ สมการที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

$$\text{อนุพันธ์มวล:} \quad \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.5)$$

$$\text{อนุพันธ์โมเมนตัม:} \quad \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i u_j}) \quad (2.6)$$

$$\text{อนุพันธ์พลังงาน:} \quad \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (2.7)$$

สำหรับแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  ที่ใช้กับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) โดยมีความสัมพันธ์ของสมการการเคลื่อนที่ของของไหล ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + (G_k + G_b) - \rho \varepsilon \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.9)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $G_b$  คือ พลังงานจลน์เนื่องจากแรงลอยตัว

$$G_k \text{ คือ พลังงานจลน์สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่ } G_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$\mu_t$  คือ ความหนืดแบบปั่นป่วน

โดยมีค่าคงที่ของรูปแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  ดังนี้  $C_{1\varepsilon} = 1.44$  ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$  ,  $\sigma_k = 1.0$   $C_\mu = 0.09$  ,

$\sigma_\varepsilon = 1.3$  และ  $C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|$  เมื่อ  $v$  คือ ความหนืดเชิงจลน์ และ  $u$  คือ ความเร็ว

### 2.1.3 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนออกจากหัวฉีดมาตกระทบกับผิวกระทบที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ ( $q''$ ) เมื่อได้อุณหภูมิที่ผิวกระทบ ( $T_s$ ) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h$ ) ได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{q''}{T_s - T_j} \quad (2.11)$$

โดยทั่วไปนิยมแสดงการถ่ายเทความร้อนในรูปของตัวแปรไร้มิติ Nusselt number ( $Nu$ )

$$Nu = \frac{hD_j}{\lambda} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $q''$  คือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวตกระทบ (Heat flux), ( $W/m^2$ )

$T_s$  คืออุณหภูมิที่ผิวกระทบซึ่งเป็นปริมาณที่ได้จากการคำนวณ, (K)

$T_j$  คืออุณหภูมิที่ทางออกของหัวฉีด ในที่นี้กำหนดให้เป็นค่าคงที่ที่ 294.15 K

$\lambda$  คือการนำความร้อนของของไหล (Thermal conductivity), ( $W/m \cdot K$ )

## 2.2 วรณกรรมปริทัศน์

Kanokjaruvijit และ Martinez-Botas [1] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยการกระแทกของเจ็ทอากาศลงบนพื้นผิวเว้าแบบ Staggered Array ศึกษาผลกระทบของ  $Re$ ,  $H/D_d$ ,  $d/D_d$ ,  $D_j/D_d$  พบว่าการไหลแบบ Crossflow เสริมการทำงานการกระแทกของเจ็ทโดยใส่ผนังด้านข้างเพื่อบังคับให้เจ็ทผนังเคลื่อนที่แบบ Channel Flow ซึ่งจะช่วยให้ Shed Vortex จากระอยเว้าได้รวดเร็วขึ้น และเพิ่มการถ่ายเทโมเมนตัมให้กับ Vortex และเมื่อ  $d/D_d$  เพิ่มขึ้นการถ่ายเทความร้อนลดลงเนื่องจากความลึกของรอยเว้าทำให้สูญเสียโมเมนตัมจากการไหลย้อนกลับ อีกทั้งหาความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยของการตกระทบลงบนผิวเว้าและผิวเรียบกับ  $Re$ ,  $H/D_j$ ,  $d/D_d$ ,  $D_j/D_d$  ในรูปของเลขยกกำลัง  $Nu_{ave} = a(Re)^b (H/D_j)^c (d/D_d)^e (D_j/D_d)^f$

Lee และคณะ [2] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนบนพื้นผิวนูนแบบครึ่งวงกลมด้วยการกระแทกของเจ็ทลงบนพื้นผิวตกระทบที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $d$ ) เท่ากับ 2.87 cm เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวนูน ( $D$ ) เท่ากับ 30.422 cm อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดและผิวตกระทบกับความกว้างของหัวฉีด ( $L/d$ ) เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 เลข Reynolds ( $Re$ ) เท่ากับ 11000, 23000, 50000, 70000 และ 87000 โดยแสดงผลในรูปของเลข Nusselt ที่จุดตกระทบ ( $Nu_{s,t}$ ) พบว่าทุกเลข Reynolds ที่  $L/d$  เท่ากับ 2 และ 4 ให้ค่า  $Nu_{s,t}$  ใกล้เคียงกัน และที่  $Re$  เท่ากับ 11000 และ 23000 จะให้  $Nu_{s,t}$  สูงสุดเมื่อ  $L/d$  เท่ากับ 6 และเมื่อ

$L/d$  เพิ่มขึ้น  $Nu_{st}$  จะลดลง ในขณะที่  $Re$  เท่ากับ 50000, 70000 และ 87000 จะให้  $Nu_{st}$  สูงสุด เมื่อ  $L/d = 8$  เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิววนกับพื้นผิวเรียบที่  $L/d$  เท่ากับ 4 ค่าการถ่ายเทความร้อนของผิววนจะดีกว่าผิวเรียบ 6-12% ตาม  $Re$  ที่เพิ่มขึ้น

Tie และคณะ [3] ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของของไหลจากแถวของเจ็ทในแนวเส้นรอบวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm จำนวน 5 เจ็ท แต่ละหัวฉีดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm ลงบนพื้นผิวตกระทอบที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่  $490 \text{ kW/m}^2$  และใช้ของไหลนาโนเป็นของไหลทำงาน โดยมีน้ำเป็นของไหลฐาน (Base Fluid) มีอนุภาคทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 nm และสารฟุ้งกระจาย (Dispersant) ทำจาก Sodium Dodecyl Benzoic Sulfate (SDBS) จากนั้นทำการทดลองดังต่อไปนี้ ขั้นตอนแรกทำการทดสอบการฟุ้งกระจายโดยนำอนุภาคทองแดงและสารฟุ้งกระจายผสมลงในน้ำ นำมาเขย่าในเครื่องสั่น Ultrasonic เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าไม่มีการตกตะกอนของอนุภาคทองแดง ขั้นที่สองหาค่าความความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหลแบบนาโน ได้จากสมการที่ (1) และสุดท้ายทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลต่าง ๆ ได้แก่ (1) น้ำซึ่งเป็นของเหลวฐาน (2) น้ำผสมกับสารฟุ้งกระจาย ที่ความเข้มข้น 0%, 0.05%, และ 0.1% พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารฟุ้งกระจายเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนลดลง (3) น้ำและอนุภาคนาโน (ของไหลนาโน) ที่ความเข้มข้นของอนุภาคทองแดง 0.17%, 0.33%, 0.52% และ 0.68% โดยปริมาตร พบว่าที่ความเข้มข้น 0.17% ให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนลดลงเมื่อเทียบกับน้ำ นอกนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าน้ำ (4) ของไหลนาโนและสารฟุ้งกระจายโดยใช้ที่ความเข้มข้นอนุภาคทองแดงที่ 0.17%, 0.33%, 0.52% และ 0.68% โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารฟุ้งกระจาย 0%, 0.05% และ 0.1% พบว่าความเข้มข้นของอนุภาคทองแดงที่ 0.68% ให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุด และความเข้มข้นของสารฟุ้งกระจาย 0% ให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดีที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่าสารฟุ้งกระจาย SDBS ไม่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของการพาความร้อน

Manca และคณะ [4] ศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาเชิงตัวเลขด้วยวิธีการ Finite Difference standard  $k-\epsilon$  model ของการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของของไหล หัวฉีดแบบ slot หัวฉีดเดี่ยวแบบสองมิติลงบนพื้นผิวตกระทอบที่มีความยาว 310 mm อุณหภูมิผิวคงที่ที่ 343 K และใช้ของไหลนาโนเป็นของไหลทำงาน โดยมีน้ำเป็นของไหลฐาน (Base fluid) โดยทำการทดสอบผลกระทบของ Reynolds number ( $Re$ ) อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดและผิวตกระทอบกับความกว้างของหัวฉีดขนาดคงที่ ( $H/W$ ) 6.2 mm และความเข้มข้นของอนุภาคแกมมาอะลูมินา ( $\gamma-Al_2O_3$ ) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 nm ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในรูปของอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ความร้อนที่ตำแหน่งใด ๆ บนผิวตกระทอบและฟลักซ์ความร้อน ณ จุดตกระทอบ ( $q_w/q_{0w}$ ) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) และเลข Nusselt โดยทดสอบในช่วงต่อไปนี้ ได้แก่ (1) เลข Reynolds เท่ากับ 5000, 10000, 15000 และ 20000 พบว่า ที่  $Re = 20000$  ให้ค่า  $q_w/q_{0w}$ ,  $h$  และ  $Nu$  สูงที่สุด (2) อัตราส่วน  $H/W$  เท่ากับ 4, 6, 8 และ 10 พบว่าอัตราส่วน  $H/W =$

10 Nusselt number สูงสุดเพราะรูปแบบการไหลของกระแสแสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มข้นและขนาดของอนุภาค  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน H/W (3) ค่าความเข้มข้นของอนุภาค  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 0%, 1%, 4% และ 6% โดยปริมาตร พบว่าที่ความเข้มข้นเท่ากับ 6% โดยปริมาตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และ Nusselt number สูงสุดที่อัตราส่วน H/W เท่ากัน เนื่องจากความเข้มข้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง

Zeitoun และ Ali [5] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของของไหลนาโนจากหัวฉีดหน้าตัดกลมลงบนผิวตกกระทบที่เป็นแผ่นเรียบวงกลมมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ในช่วงระหว่าง 60 ถึง 100 kW/m<sup>2</sup> โดยระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับผิวตกกระทบเท่ากับ 50 mm และใช้ของไหลนาโนเป็นของไหลทำงาน โดยมีน้ำเป็นของไหลฐาน มีอนุภาคอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 nm ที่ผิวตกกระทบพิจารณาที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 80, 100, 115 และ 133 mm โดยอัตราส่วนความยาวหัวฉีดและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดเท่ากับ 20 จากนั้นพิจารณาดังต่อไปนี้ (1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $D_j$ ) เท่ากับ 3.9, 5.5 และ 8.2 mm พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเลข Nusselt น้อยมากถือได้ว่า  $D_j$  ไม่ส่งผลกระทบต่อเลข Nusselt (2) ค่าความเข้มข้นของอนุภาค  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 6.6% และ 10% โดยปริมาตร พบว่าที่เลข Reynolds เท่ากับ 8000 ความเข้มข้นเท่ากับ 10% โดยปริมาตร ให้ค่า Nusselt number สูงสุด เนื่องจากความเข้มข้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง

Naphon และ Wongwises [6] ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยระบายความร้อนด้วยการกระแทกของเจ็ทของของไหลนาโนของ  $\text{TiO}_2$  ในน้ำเพื่อระบายความความร้อนออกจาก Heat Sink ที่ประกอบไปด้วย Array ของครีบลีเหลี่ยมเล็ก ๆ โดยระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับผิวตกกระทบเท่ากับ 2 mm ขนาดของหัวฉีดเท่ากับ 1 mm โดยใช้ความเข้มข้นของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  เท่ากับ 0.4% โดยปริมาตร นอกจากนี้ยังพิจารณาอัตราการไหลเชิงมวลระหว่าง 0.008 ถึง 0.02 kg/s ด้วยลักษณะการระบายความร้อน 3 แบบ ได้แก่ การระบายความร้อนด้วยการกระแทกของเจ็ทของของไหลนาโน การระบายความร้อนด้วยการกระแทกของเจ็ทของของไหลฐาน และการระบายความร้อนด้วยของไหลฐานไหลขนานผ่านผิวโดยตรง พบว่าเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลที่ 0.02 kg/s ให้เลข Nusselt สูงสุด เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นส่งผลให้โมเมนตัมการไหลเพิ่มขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น และค่าความต้านทานของอุณหภูมิมีค่าลดลง ที่รูปแบบการระบายความร้อนด้วยการกระแทกของเจ็ทของของไหลนาโนให้ประสิทธิภาพของการระบายความร้อนที่ดีที่สุด เนื่องจากความเข้มข้นของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้มีค่าความต้านทานของอุณหภูมิต่ำลง

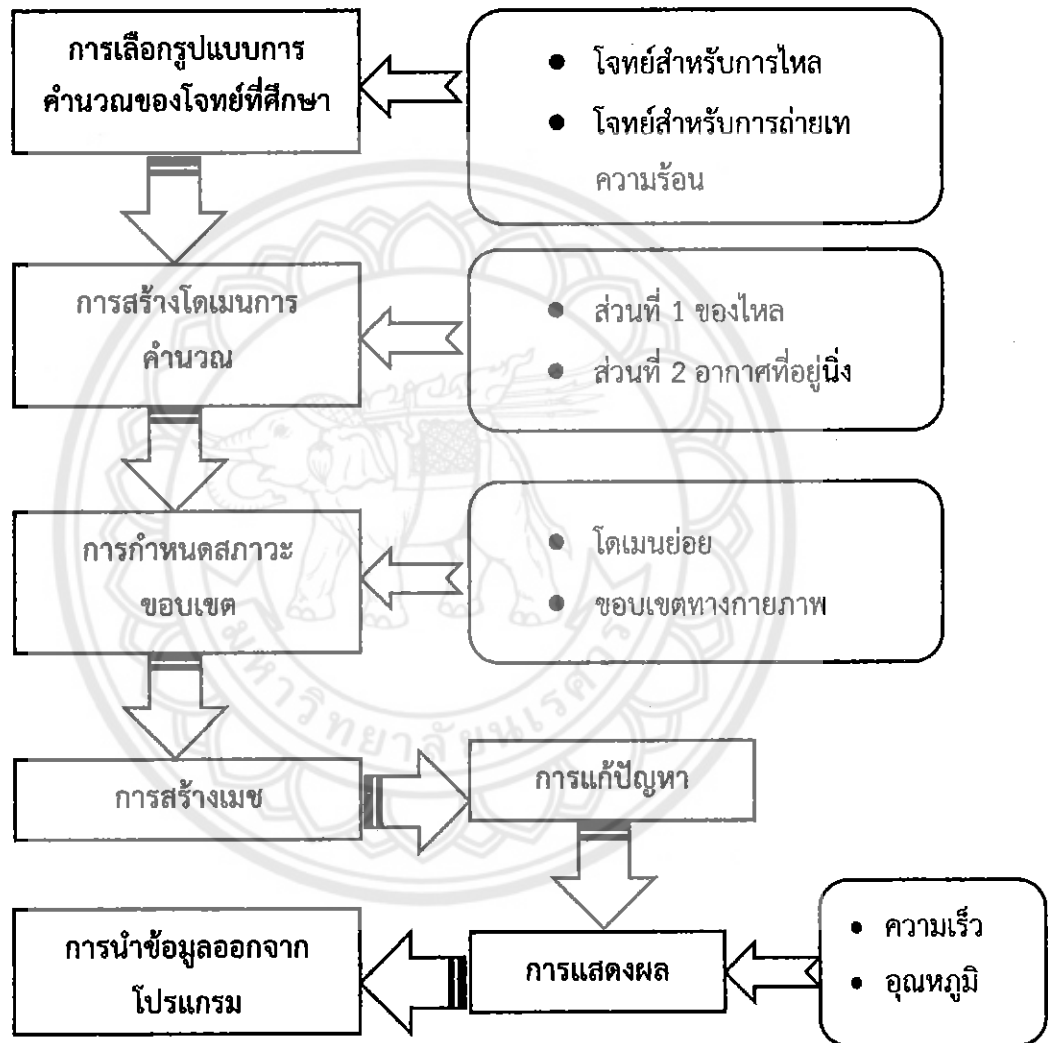
Ersayin และ Selimefendigil [7] ศึกษาเปรียบเทียบวิธีเชิงตัวเลขของการกระแทกของเจ็ทของของไหลนาโนบนพื้นผิวตกกระทบที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่โดยที่ผิวตกกระทบมีความยาวเท่ากับ

50 เท่าของความกว้างของหัวฉีดแบบ Slot ใช้ของไหลนาโนเป็นของไหลทำงาน โดยมีน้ำเป็นของไหลฐาน (Base Fluid) และที่ความเข้มข้นของอนุภาคอะลูมินาเท่ากับ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร ที่เลข Reynolds อยู่ระหว่าง 100 ถึง 400 โดยพิจารณาผิวตกกระทบที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 เท่าของความเร็วที่ทางออกของหัวฉีด พบว่าจุดตกกระทบที่ผิวตกกระทบไม่มีการเคลื่อนที่จะให้เลข Nusselt สูงสุด เนื่องจากไม่มีการเคลื่อนที่ทำให้ไม่มีแรงเฉือนของของไหลเกิดขึ้น ส่วนบริเวณที่ไม่ใช่จุดตกกระทบไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้เนื่องจากข้อมิไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน และที่ความเข้มข้นเท่ากับ 6% โดยปริมาตร ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด เนื่องจากความเข้มข้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง

Kanokjaruvijit และคณะ [8] ศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการกระแทกของเจ็ทแบบราบเรียบลงบนผิวตกกระทบที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่  $500 \text{ W/m}^2$  เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดขนาด  $5 \text{ mm}$  แผ่นพื้นผิวตกกระทบมีความยาวเท่ากับ  $35 \text{ mm}$  ใช้อากาศเป็นของไหลทำงานที่อุณหภูมิทางเข้าของหัวฉีด  $300 \text{ K}$  โดยพิจารณาพื้นผิวตกกระทบแบบเรียบและพื้นผิวแบบเว้า ที่เลข Reynolds ( $Re$ ) เท่ากับ 400, 800 และ 1200 อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดและผิวตกกระทบกับความกว้างของหัวฉีด ( $H/D_j$ ) เท่ากับ 2, 4 และ 8 อัตราส่วนความลึกของผิวเว้ากับความกว้างของผิวเว้า ( $d/D_d$ ) เท่ากับ 0, 0.1, 0.15 และ 0.2 ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดกับความกว้างของผิวเว้า ( $D_j/D_d$ ) เท่ากับ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 พบว่าการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเรียบมีค่าสูงกว่าการถ่ายเทความร้อนของผิวเว้า เนื่องจากของไหลที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวเว้ามีการสูญเสียโมเมนตัม ที่บริเวณรอยต่อของส่วนเว้าและส่วนเรียบจะมีการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด เพราะความเร็วจะสูงขึ้นเพื่อที่ของไหลจะไหลขึ้นสู่บนพื้นผิวราบเรียบ จึงมีการถ่ายเทโมเมนตัมดีที่สุด เมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โมเมนตัมของเจ็ทเพิ่มขึ้น ทำให้เมื่อตกกระทบผิวเว้าสนามการไหลที่ออกจากขอบผิวเว้า มีลักษณะยกตัวสูงขึ้นจากพื้นผิวเรียบที่อยู่ติดอยู่กับขอบรอยเว้า เมื่อระยะ  $H/D_j$  มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความเร็วของเจ็ทภายในผิวเว้าและที่ขอบผิวเว้ามีค่าลดลง ทำให้สนามการไหลที่ออกจากขอบผิวเว้ายกตัวน้อยลง เนื่องมาจากเมื่อระยะ  $H/D_j$  มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีการสูญเสียโมเมนตัมให้แก่อากาศรอบข้างของเจ็ทก่อนตกกระทบมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทโมเมนตัมของเจ็ทที่บริเวณตกกระทบมีค่าลดลง ความลึกของผิวเว้า ( $d/D_d$ ) สำหรับผิวเว้าที่ตื้น  $d/D_d = 0.15$  เจ็ทหลังตกกระทบจะยกตัวสูงขึ้นน้อยกว่าแผ่นผิวเว้าที่ ลึกกว่า และชิดไปกับพื้นผิวเรียบที่อยู่ติดกับขอบผิวเว้ามากกว่า เนื่องมาจากจะมีความโค้งของผิวรอยเว้า  $d/D_d = 0.15$  มีค่าน้อยกว่าผิวเว้า  $d/D_d = 0.25$  เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งขอบผิวเว้า ( $D_j/D_d$ ) ผลการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับตำแหน่งของขอบผิวเว้า โดยการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ ตำแหน่งขอบผิวเว้า ( $D_j/D_d$ ) อยู่ไกลจากเจ็ทที่ตกกระทบมากขึ้น

### บทที่ 3

#### ขั้นตอนการใช้โปรแกรม



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Comsol

จากรูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการใช้โปรแกรมในการคำนวณค่าอุณหภูมิและความเร็วของของไหลที่ผิวตกระทาบซึ่งเป็นการสรุปขั้นตอนการใช้โปรแกรมโดยมีรายละเอียดดังนี้

1. เลือกรูปแบบการคำนวณให้เหมาะสมกับโจทย์ ได้แก่ โจทย์สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน
2. สร้างโดเมนการคำนวณ โดเมนของไหลที่จะไหลเข้ามาแทนที่อากาศที่อยู่ข้างที่
3. กำหนดสมบัติของโดเมนย่อยและกำหนดขอบเขตทางกายภาพ
4. สร้างเมชและกำหนดความละเอียดของเมชที่เหมาะสม
5. กำหนดวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมในการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์
6. การแสดงผลในรูปของความเร็วจุดและอุณหภูมิ
7. การนำข้อมูลจากโปรแกรม Comsol ในรูปของ Spread sheet เข้าสู่โปรแกรม Excel เพื่อนำไปดำเนินการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) และเลข Nusselt (Nu) ต่อไป

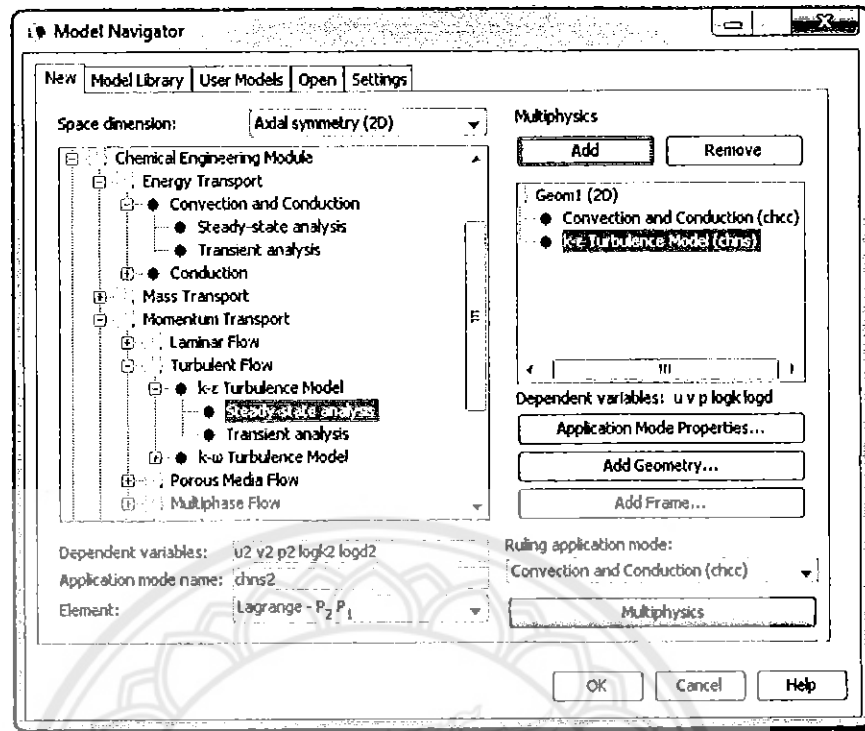
### 3.1 การเลือกรูปแบบการคำนวณ

หลังจากเปิดโปรแกรม Comsol โปรแกรมจะแสดง Model Navigator ใน Space dimension เลือกรูปแบบเป็น Axial symmetry (2D) ซึ่งเป็นการกำหนดให้โดเมนการคำนวณเป็นแบบสมมาตรตามแกน จากนั้นเลือกขอบเขตที่ศึกษา คลิก Multiphysics เพื่อเตรียมระบุโจทย์และสมการของการไหลดังนี้

3.1.1 โจทย์สำหรับการไหลเลือก Chemical Engineering Module > Momentum Transport > Turbulent Flow > steady-state analysis คลิก add

3.1.2 โจทย์สำหรับการถ่ายเทความร้อนเลือก Chemical Engineering Module > Energy Transport > Convection and Conduction > steady-state analysis คลิก add จากนั้นคลิก OK ดังแสดงในรูปที่ 3.2

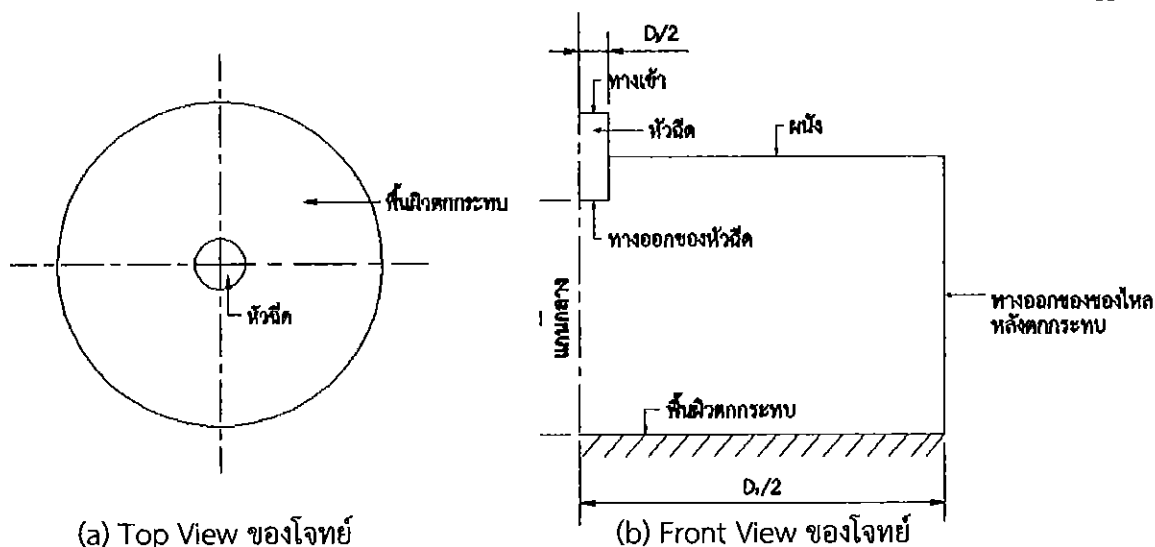




รูปที่ 3.2 การกำหนดโจทย์ที่ศึกษา

### 3.2 การสร้างโดเมนการคำนวณ

การเลือกโดเมนการคำนวณโจทย์ที่ศึกษาสามารถแบ่งย่อยโดเมนลงได้ เพื่อลดหน่วยความจำและเวลาในการคำนวณเนื่องจากโจทย์ของเราสามารถพิจารณาโดยใช้ที่กัตรงกระบอกได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3(a) และโจทย์มีความสมมาตร 360 องศารอบแกน จึงเลือกโดเมนการคำนวณเป็นสองมิติสมมาตรตามแกน (2D Axi-symmetric) กล่าวคือ แบ่งเป็น  $\frac{1}{4}$  ของโดเมนจริง เมื่อมองจากด้านหน้า (Front View) จะมีรูปแบบของโจทย์ดังแสดงในรูปที่ 3.3(b)



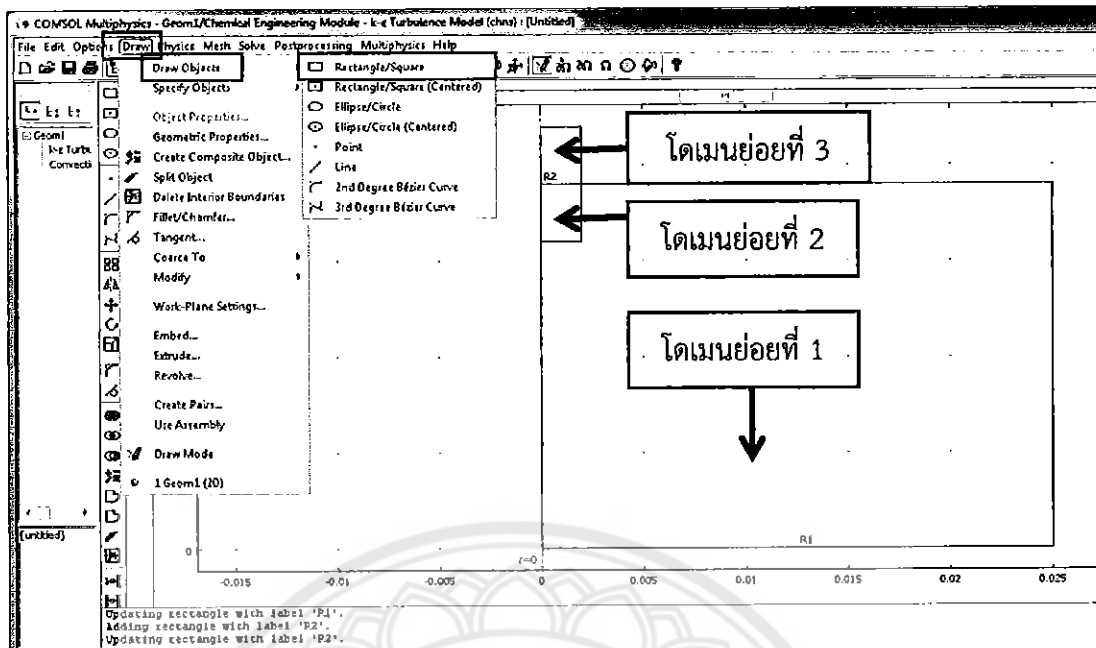
(a) Top View ของไอพ่น

(b) Front View ของไอพ่น

### รูปที่ 3.3 โดเมนการคำนวณ

โดเมนมีขนาดดังนี้คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $D_j$ ) 4 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ฉลุดกกระหนบ ( $D_s/2$ ) 25 mm ระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดกับพื้นที่ฉลุดกกระหนบที่เรียบ ( $H$ ) 16 mm สำหรับพื้นผิวเว้าและนูนนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเว้าและนูน ( $D_w$ ) 8 mm และระยะความลึกของผิวเว้าหรือความสูงของรายนูน ( $d$ ) วัดเทียบกับบริเวณผิวเรียบ 2 mm

การกำหนดขนาดโดเมนในโปรแกรมสามารถกระทำดังนี้ เลือกแท็บ Draw > Draw Objects > Rectangle/Square กำหนดระยะเลือก Draw > Objects Properties วาดสี่เหลี่ยม 2 รูปกำหนดขนาดของโดเมนตามตารางที่ 3.1 โดยส่วนที่ 1 เป็นอากาศที่อยู่นิ่ง (R1) ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของของไหลทำงาน (R2) โดยมีพื้นที่สี่เหลี่ยมทั้ง 2 รูปทับซ้อนกันอยู่ เมื่อวาดเสร็จจะได้โดเมนย่อย 3 โดเมนดังนี้ โดเมนที่ 1 ได้จากการวาดสี่เหลี่ยมของส่วนที่ 1 โดเมนที่ 2 ได้จากพื้นที่ทับซ้อนของสี่เหลี่ยมทั้งสอง โดเมนที่ 3 ได้จากการวาดสี่เหลี่ยมของส่วนที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การกำหนดขนาดของโดเมน

ตารางที่ 3.1 การกำหนดขนาดของโดเมน

| โดเมน                 | R1 (m) | R2 (m) |
|-----------------------|--------|--------|
| กว้าง (L/2)           | 0.025  | 0.002  |
| สูง (H)               | 0.019  | 0.006  |
| จุดเริ่มต้นในแนวแกน r | 0      | 0      |
| จุดเริ่มต้นในแนวแกน z | 0      | 0.016  |

### 3.3 การกำหนดสภาวะขอบเขต

ในที่นี้การคำนวณถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 โจทย์ของการไหล โดยของไหลเป็นน้ำและเป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ เป็นการไหลแบบปั่นป่วนตามแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  ความเร็วของหัวฉีด ( $u_j$ ) 1.75 m/s เลข Reynolds เท่ากับ 7,000 และ ส่วนที่ 2 เป็นโจทย์ของการถ่ายเทความร้อน โดยพื้นผิวตกระทบบมีฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ  $550 \text{ kW/m}^2$

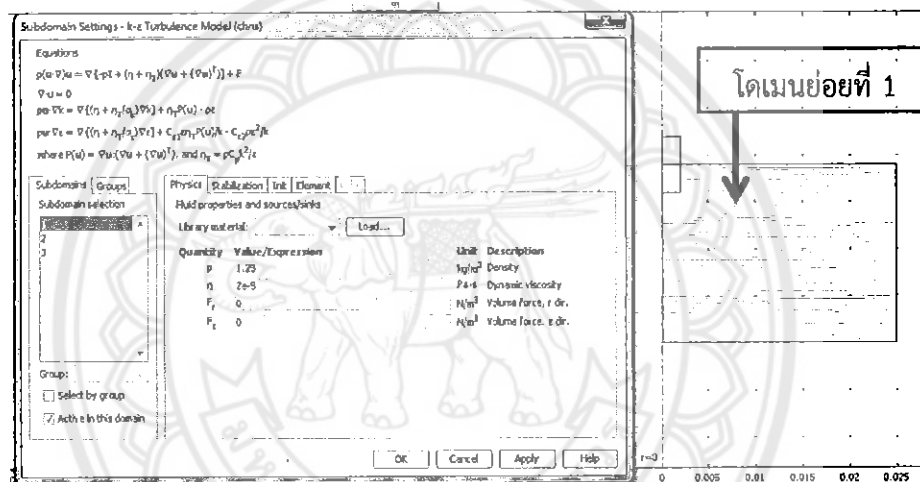
#### 3.3.1 การกำหนดขอบเขตของการไหล

เลือกแท็บ Multiphysics >  $k-\varepsilon$  Turbulence Model (chns) เพื่อให้โปรแกรมไปที่ โจทย์ของการไหลเพราะโจทย์ของเรามีอยู่ 2 ส่วน คือ โจทย์ของการไหลและโจทย์ของการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากขอบเขตของการไหล ก่อนที่จะมีการไหลของน้ำออกจากหัวฉีดนั้นน้ำมีอากาศอยู่นิ่งอยู่กับที่อยู่ก่อนแล้วในโดเมนย่อยที่ 1 (ดูในรูปที่ 3.4) เมื่อน้ำไหลออกจากหัวฉีดจากโดเมนย่อยที่ 2

และ 3 จึงไหลมาแทนที่อากาศบริเวณผิวตกกระทบ ดังนั้นเราจึงกำหนดโดเมนย่อยทั้ง 3 ดังนี้ โดเมนที่ 1 เป็นอากาศที่อยู่หนึ่งกับที่ โดเมน 2 และ 3 เป็นน้ำ

### ก. การตั้งค่าโดเมนย่อย

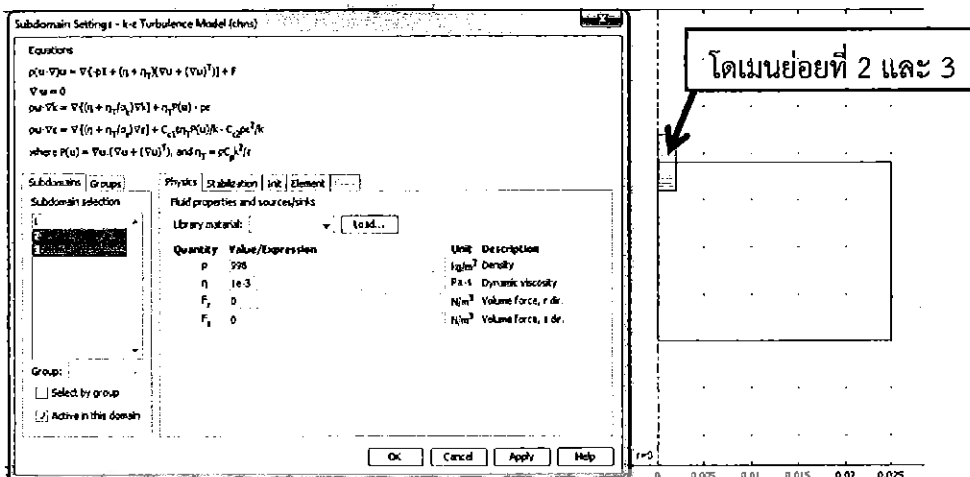
- ที่เมนูเลือก Physics > Subdomain Setting
- ในโดเมนย่อยที่ 1 ในรูปที่ 3.4 เลือก Active in this domain เพื่อแสดงผลและกำหนดสมบัติของโดเมนย่อย
- ไปที่แท็บ Physics กำหนดสมบัติของโดเมนย่อยที่ 1 โดยกำหนดให้เป็นอากาศ ความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ  $1.25 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนืดพลวัตของอากาศเท่ากับ  $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  แสดงดังรูปที่ 3.5



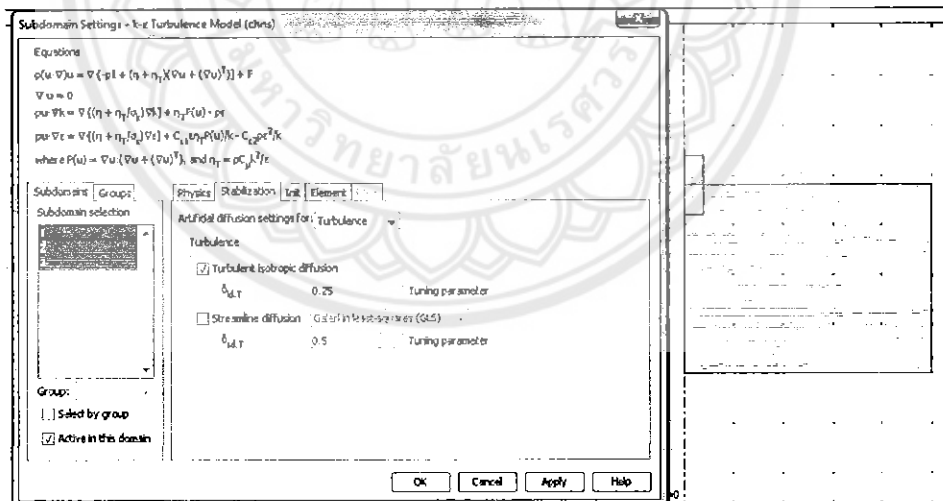
รูปที่ 3.5 การตั้งค่า Physics ของการไหลของโดเมนที่ 1

- ในโดเมนย่อยที่ 2 และ 3 เลือก Active in this domain เพื่อแสดงผลและกำหนดสมบัติของโดเมนย่อยดังกล่าว

- ในแท็บ Physics กำหนดสมบัติของโดเมนที่ 2 และ 3 กำหนดค่าความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ  $998 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนืดพลวัตของน้ำเท่ากับ  $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  แสดงดังรูปที่ 3.6



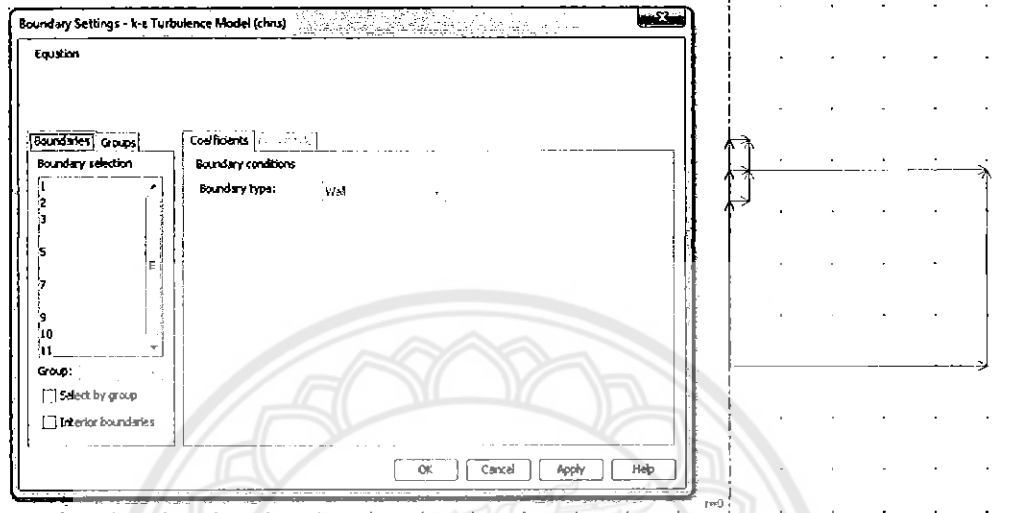
รูปที่ 3.6 การตั้งค่า Physics ของการไหลของโดเมนย่อยที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นน้ำ  
 - ในแท็บ Stabilization ของโดเมนย่อยที่ 1, 2 และ 3 ใน Artificial diffusion setting เลือก Turbulence ใน Turbulence เลือก Turbulence isotropic Diffusion กำหนด Tuning parameter ( $\delta_{id,T}$ ) เป็น 0.25 โดยที่ Isotropic Diffusion เป็นสมการของความปั่นป่วนเป็นการผลิตของพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่มีพารามิเตอร์อยู่ในช่วง 0 ถึง 0.5 แสดงดังรูปที่ 3.7 จากนั้นคลิก OK



รูปที่ 3.7 การตั้งค่า stabilization ของการไหลของโดเมนย่อยที่ 1, 2 และ 3

### ข. การตั้งค่าสภาวะขอบเขตทางกายภาพ

- ที่เมนูเลือก Physics > Boundary Setting แสดงดังรูปที่ 3.8 เพื่อเตรียมกำหนดค่าต่าง ๆ ให้แก่ขอบเขต



รูปที่ 3.8 การเตรียมการกำหนดสภาวะขอบเขตของการไหล

- จากรูปที่ 3.8 กำหนดขอบเขตดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดย Symmetry Boundary คือ แกนสมมาตร Wall คือ ผนังที่ไม่มีการสั่นไหล ผนังแบ่งออกเป็นผนังของน้ำและผนังอากาศ ผนังน้ำเนื่องจากเราต้องการอุณหภูมิของของไหลที่บริเวณผิวตกระทบจึงกำหนดให้ผิวตกระทบเป็นผนังของของไหล ซึ่งหาค่าฟังก์ชันผนังที่ทำให้ผนังไม่มีการเกิดสั่นไหล ( $\delta^+$ ) ได้จากสมการที่ (3.1)

$$\delta^+ = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} \delta_w}{\mu} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล

$C_\mu$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.09

$k$  คือ การนำความร้อนของของไหล

$\delta_w$  คือ ผนังขดเซย (Wall Offset) ที่เป็นระยะห่างระหว่างผิวตกระทบกับของไหลจุดตกระทบของในแนวตั้งฉากกับผิวตกระทบกำหนดให้เป็น 0.001 m

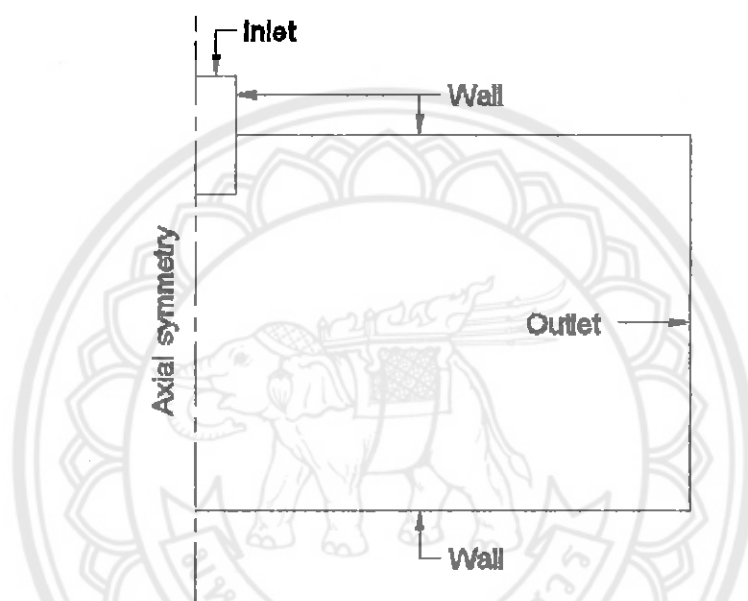
$\mu$  คือ ความหนืดพลวัตของของไหล

Inlet คือ ทางเข้าของของไหลโดยความเร็วของหัวฉีด 1.75 m/s ที่มีค่าติดลบของไหลไหลไปในทิศทาง -z

Outlet คือ ทางออกของของไหล ดังแสดงรูปที่ 3.9 จากนั้นคลิก Apply คลิก OK

ตารางที่ 3.2 การกำหนดขอบเขตของการไหล

| Boundary | Boundary Type     | Boundary Condition          | ค่า                       |
|----------|-------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1, 3,5   | Symmetry Boundary | Axial Symmetry              | -                         |
| 2, 9     | Wall (ผนังน้ำ)    | Logarithmic Wall Function   | $\delta^+ = 401.687$      |
| 7        | Inlet             | Velocity                    | $V_0 = -1.75 \text{ m/s}$ |
| 10       | Wall (ผนังอากาศ)  | Logarithmic Wall Function   | $\delta^+ = 5.413$        |
| 11       | Outlet            | Pressure, no viscous stress | $P_0 = 0 \text{ Pa}$      |



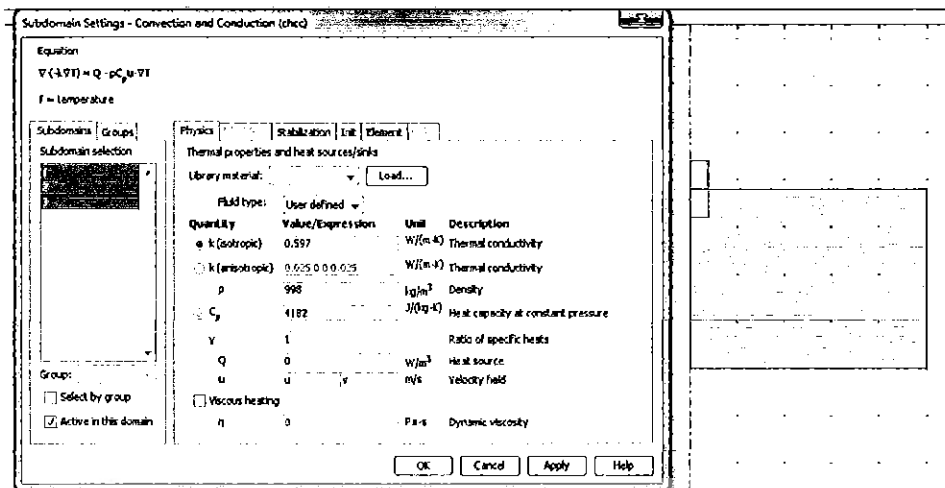
รูปที่ 3.9 การกำหนดขอบเขตของโดเมน

### 3.3.2 กำหนดขอบเขตของการถ่ายเทความร้อน

จากเมนูเลือกแท็บ Multiphysics > Convection and Conduction (chcc) เพื่อตั้งให้เป็น โจทย์การถ่ายเทความร้อน โดยมีโดเมนย่อย 1, 2 และ 3 ให้มีการถ่ายเทความร้อนโดยใช้สมบัติการถ่ายเทความร้อนของน้ำ

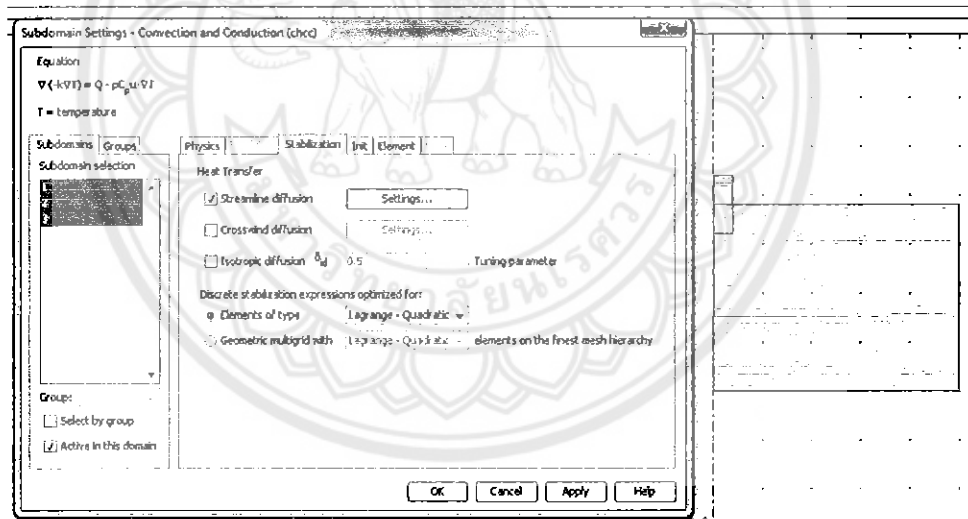
#### ก. การตั้งค่าโดเมนย่อย

- ที่เมนูเลือก Physics > Subdomain Setting
- ใน Subdomain เลือก 1, 2 และ 3 เลือก Active in this domain
- ภายใต้ Physics กำหนดค่าการนำความร้อนของน้ำ (k) เท่ากับ  $0.597 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ค่าความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ  $998 \text{ kg/m}^3$  ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) ของน้ำเท่ากับ  $4182 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การตั้งค่า Physics ของการถ่ายเทความร้อน ของโดเมนที่ย่อย 1, 2 และ 3

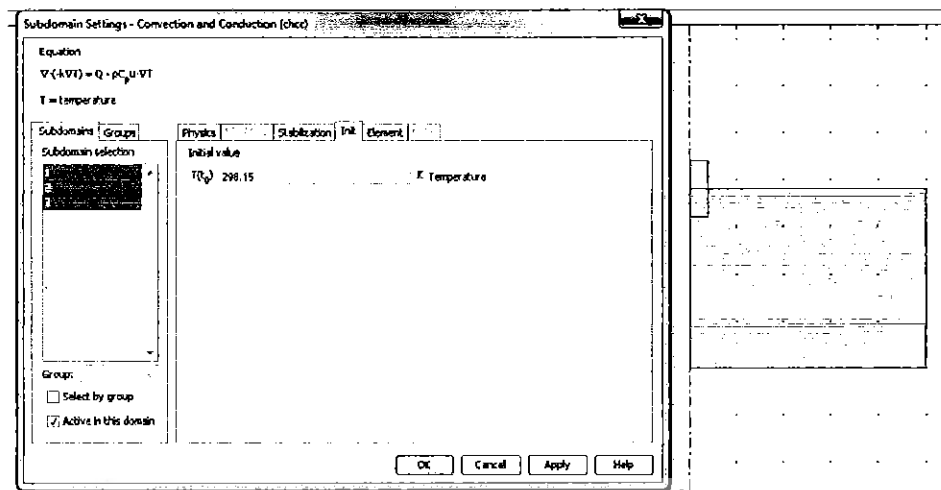
- ภายใต้แท็บ Stabilization ของ Subdomain 1, 2 และ 3 เลือก Streamline Diffusion ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การตั้งค่า stabilization ของการถ่ายเทความร้อนของโดเมนย่อยที่ 1, 2 และ 3

- ภายใต้แท็บ int เป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของโดเมนเท่ากับ 298.15 K ดังแสดงในรูปที่ 3.12 คลิก Apply แล้วคลิก OK

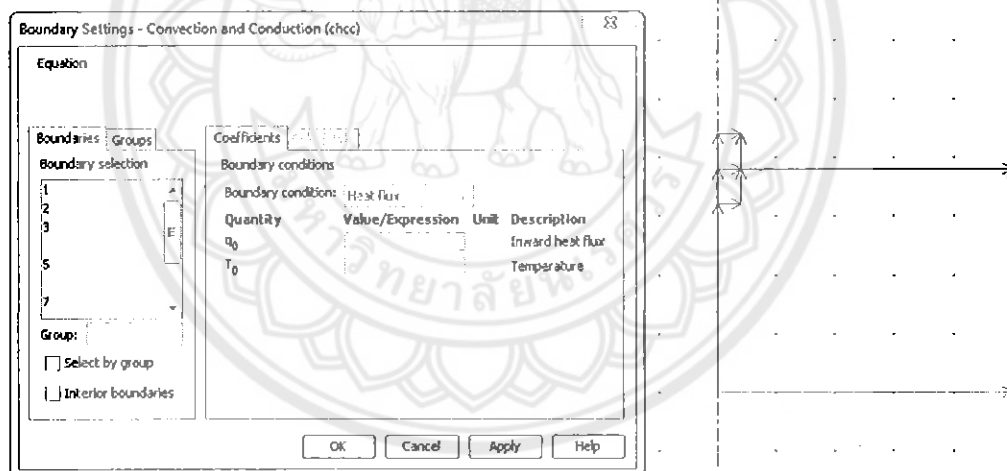




รูปที่ 3.12 การตั้งค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของโดเมนย่อยที่ 1, 2 และ 3

ข. การตั้งค่าสภาวะขอบเขตทางกายภาพ

- ที่เมนู Physics > Boundary Setting แสดงผลหน้าจอ ดังรูปที่ 3.13



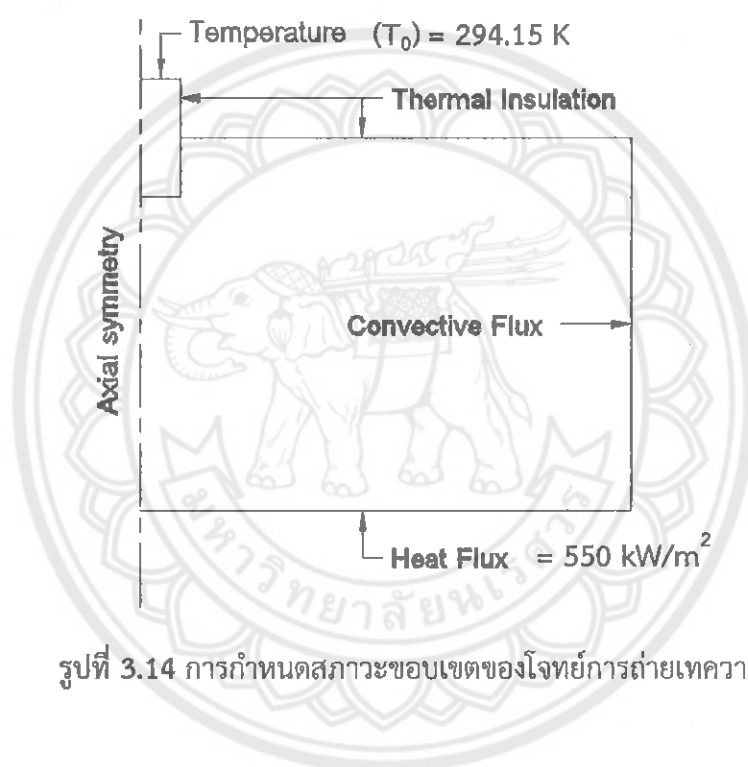
รูปที่ 3.13 การตั้งค่าสภาวะขอบเขตของการถ่ายเทความร้อน

- กำหนดค่าดังแสดงในตารางที่ 3.3 โดย Axial Symmetry คือ แกนสมมาตร Heat Flux คือ ให้พลักซ์ความร้อนที่ผิวตกระหอบคงที่  $550 \text{ kW/m}^2$  Temperature ( $T_0$ ) คือ อุณหภูมิขาเข้าของน้ำจากหัวฉีด Thermal Insulation คือ ที่ผนังเป็นฉนวนไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น Convective Flux คือ ที่ทางออกของการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.14

- คลิก Apply คลิก OK

ตารางที่ 3.3 การกำหนดสภาวะขอบเขตของการถ่ายเทความร้อน

| Boundary | Boundary Conditions | ค่า                      |
|----------|---------------------|--------------------------|
| 1, 3, 5  | Axial Symmetry      | -                        |
| 2        | Heat Flux           | $q = 550 \text{ Kw/m}^2$ |
| 7        | Temperature         | $T_0 = 294.15 \text{ K}$ |
| 9, 10    | Thermal Insulation  | -                        |
| 11       | Convective Flux     | -                        |



รูปที่ 3.14 การกำหนดสภาวะขอบเขตของโจทย์การถ่ายเทความร้อน

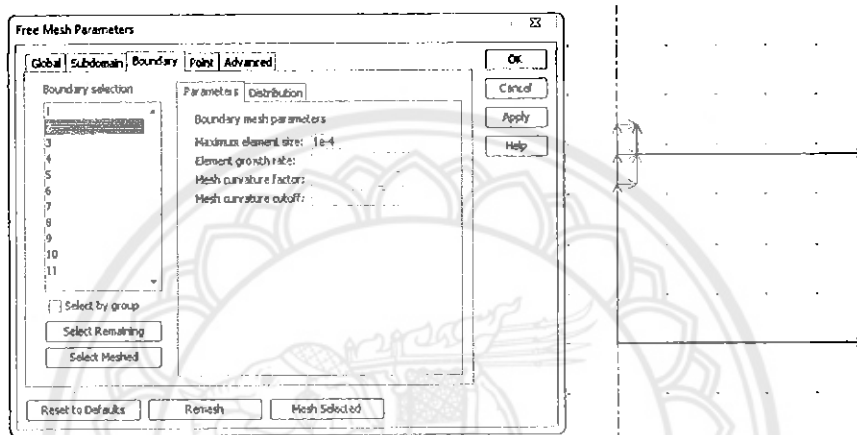
### 3.4 การสร้างเมช

โปรแกรม Comsol ใช้ Delaunay Algorithm ในการสร้างเมชสำหรับโดเมน 2 มิติ ในรูปแบบ สามเหลี่ยมไร้ระเบียบ ความหนาแน่นของเมชที่มีค่าสูงจะนำไปสู่คำตอบที่ถูกต้องมากขึ้น [8] จึงได้กำหนดให้เมชบริเวณที่ผิวตกระทอบมีความหนาแน่นสูงกว่าบริเวณอื่นเพราะต้องการอนุทภูมิของของไหลที่บริเวณผิวตกระทอบที่จะนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่อไป อีกทั้งการกำหนดให้เมชบริเวณที่ผิวตกระทอบมีความหนาแน่นสูงกว่าจุดอื่นแทนการให้ความหนาแน่นของเมชเท่ากันทุกบริเวณยังช่วยย่นเวลาในการคำนวณของโปรแกรมและกำหนดความหนาแน่นของเมชบริเวณไกลจากผิวตกระทอบให้คงที่เท่ากับ  $1 \text{ mesh/mm}^2$  และความหนาแน่นของเมชบริเวณผิวตกร

กระทบบให้คงที่เท่ากับ  $1 \times 10^{-4}$  เนื่องจากค่าความหนาแน่นที่ได้ มาจากการทดสอบผลกระทบของความหนาแน่นของเมชที่มีต่อคำตอบโดยจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

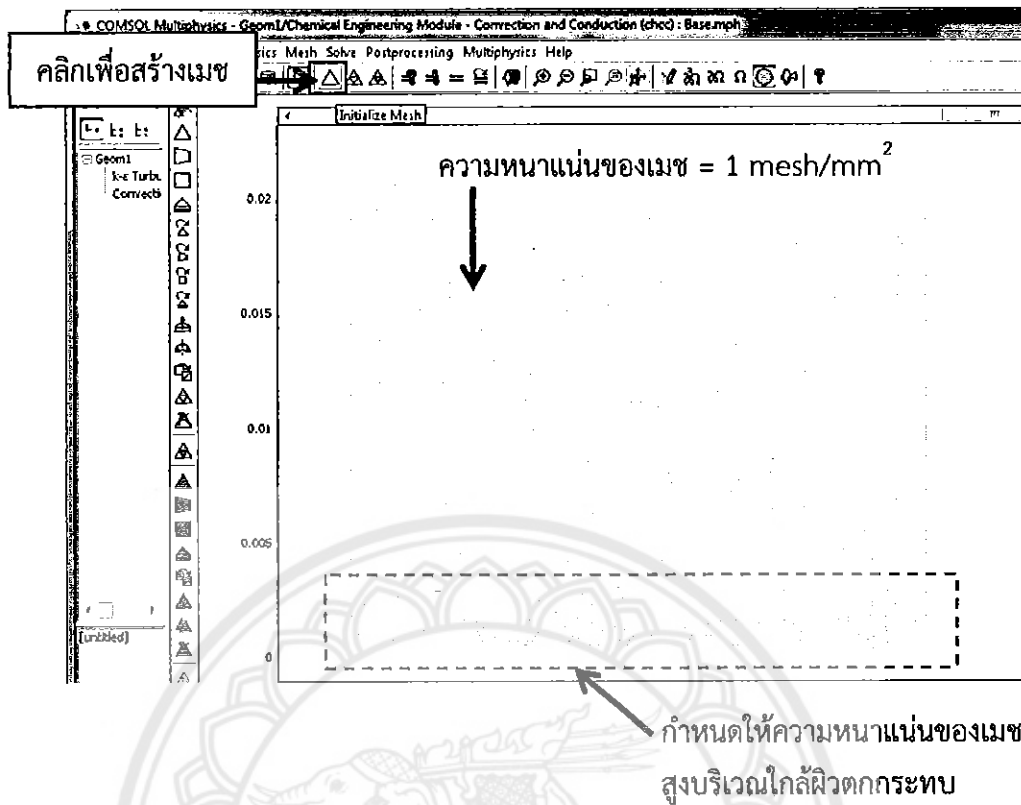
### 3.4.1 การกำหนดความละเอียดของเมช

- ภายใต้เมนูเลือก mesh > Free mesh parameter > Boundary > เลือกพื้นผิวตกรกระทบบในที่นี่ คือ Boundary selection 2 > กำหนดค่า Maximum element size เป็น  $1 \times 10^{-4}$  (ค่าที่ได้จากการทดสอบในบทที่ 4) เพื่อกำหนดขนาดที่ใหญ่ที่สุดของเมชภายในโดเมนแล้วคลิก OK แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การกำหนดเมชบริเวณผิวตกรกระทบบ

- สร้าง Mesh คลิก Initialize Mesh แสดงดังรูปที่ 3.16



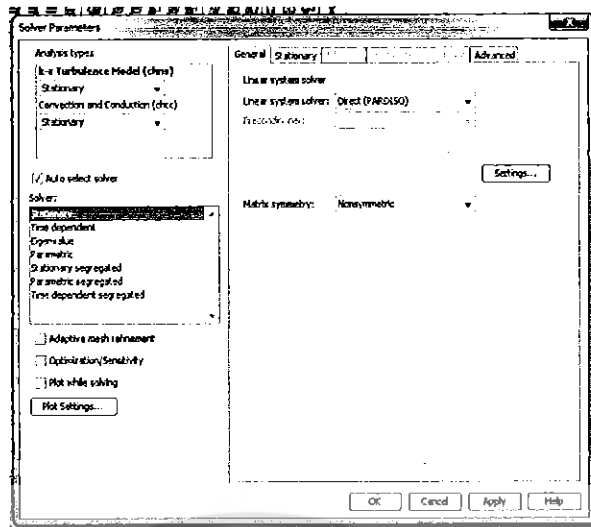
รูปที่ 3.16 การสร้างเมช

### 3.5 การคำนวณเพื่อหาคำตอบ

การหาคำตอบเชิงตัวเลขอาศัยกระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยที่สนามความเร็วเป็นคำตอบจากการคำนวณโจทย์ของการไหลและอุณหภูมิของน้ำที่พื้นผิวตกระทบเป็นคำตอบที่ต้องการจากโจทย์ของการถ่ายเทความร้อน

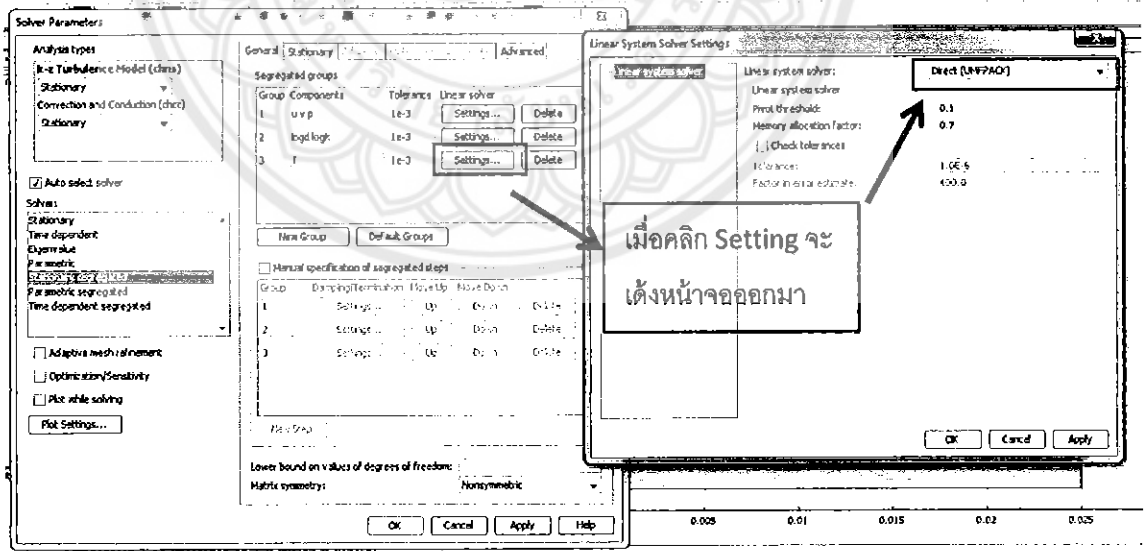
#### 3.5.1 การตั้งค่า Solver

- แท็บ Solver เลือก Solver Parameter > Stationary > Linear System Solver > ใช้วิธีแก้ปัญหาแบบ Direct (PARDISO) เนื่องจาก Direct Solver เป็นการแก้ปัญหาโดยตรงเหมาะแก่การใช้แก้ปัญหาแบบ 2 มิติ และการใช้ PARDISO ทำให้ประมวลผลได้รวดเร็วและลู่เข้าได้เร็วที่สุด และใช้หน่วยความจำน้อยกว่า ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมในการหาคำตอบเพราะหาคำตอบมีแนวโน้มลู่เข้า แสดงดังรูปที่ 3.17

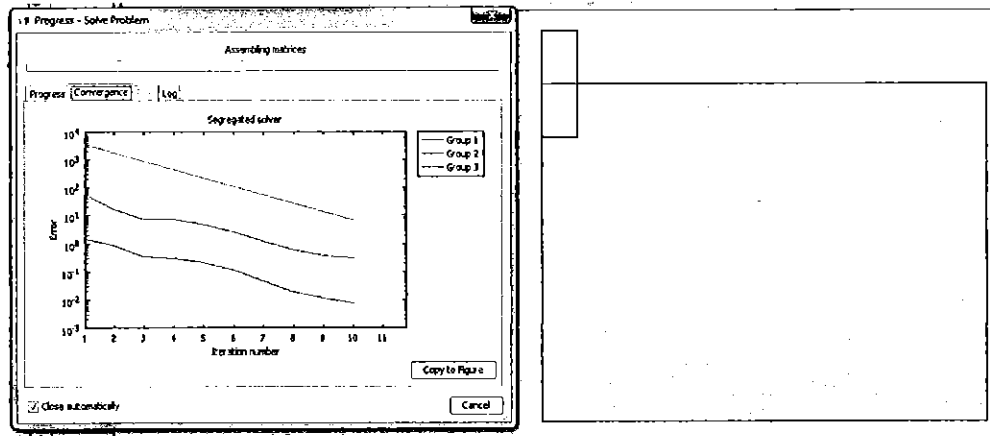


รูปที่ 3.17 การกำหนด Solver

- ใน Solver เลือก Stationary Segregated ใน Segregated groups จะมี 3 กลุ่ม โดย groups 1 เป็นการแก้ปัญหของความเร็วและความดัน groups 2 เป็นการแก้ปัญหของ  $k-\epsilon$  และ groups 3 เป็นการแก้ปัญหของอุณหภูมิ > ใน Groups 1 และ 2 เลือก Setting เป็น Direct (PARDISO) เพราะเหมาะกับการใช้แก้ปัญหสำหรับการไหลและคำตอบจะเข้าได้รวดเร็ว ใน Groups 3 เลือก Direct (UMFPACK) เพราะเหมาะสมกับการถ่ายเทความร้อนทำให้ลูเข้าได้เร็วกว่าการใช้ PARDISO แสดงดังรูปที่ 3.18 คลิก OK คลิก Solve โดยคำตอบจะเข้าแสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 การกำหนด Stationary Segregated groups



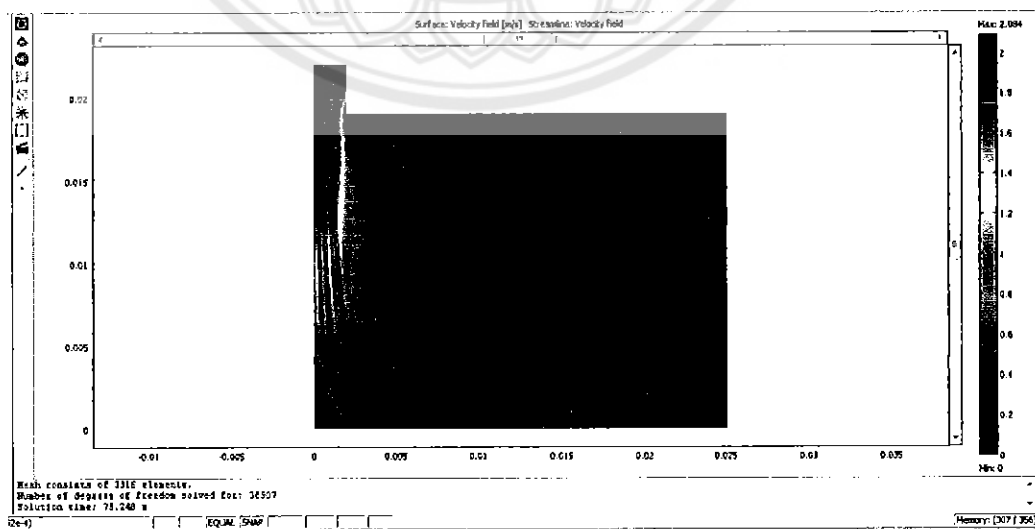
รูปที่ 3.19 กราฟค่าตอบวิ่งคู่เข้าภายหลังการคำนวณ

### 3.6 การแสดงผลลัพธ์

#### 3.6.1 แสดงผลในรูปแบบของความเร็ว

แสดงผลสนามความเร็วในรูปแบบของระดับสีและเส้นทางการไหล

- ภายใต้เมนูเลือก Post processing > Plot Parameter
  - ที่แท็บ General เลือกแสดงผลของความเร็วเป็นระดับสีและเส้นทางการไหลของของไหล
- คลิก Plot Parameter > แท็บ General เลือก Surface และ Streamline
- ที่แท็บ Surface > Predefined quantities > Velocity field
  - ที่แท็บ Streamline > Predefined quantities > Velocity field แสดงดังรูปที่ 3.20



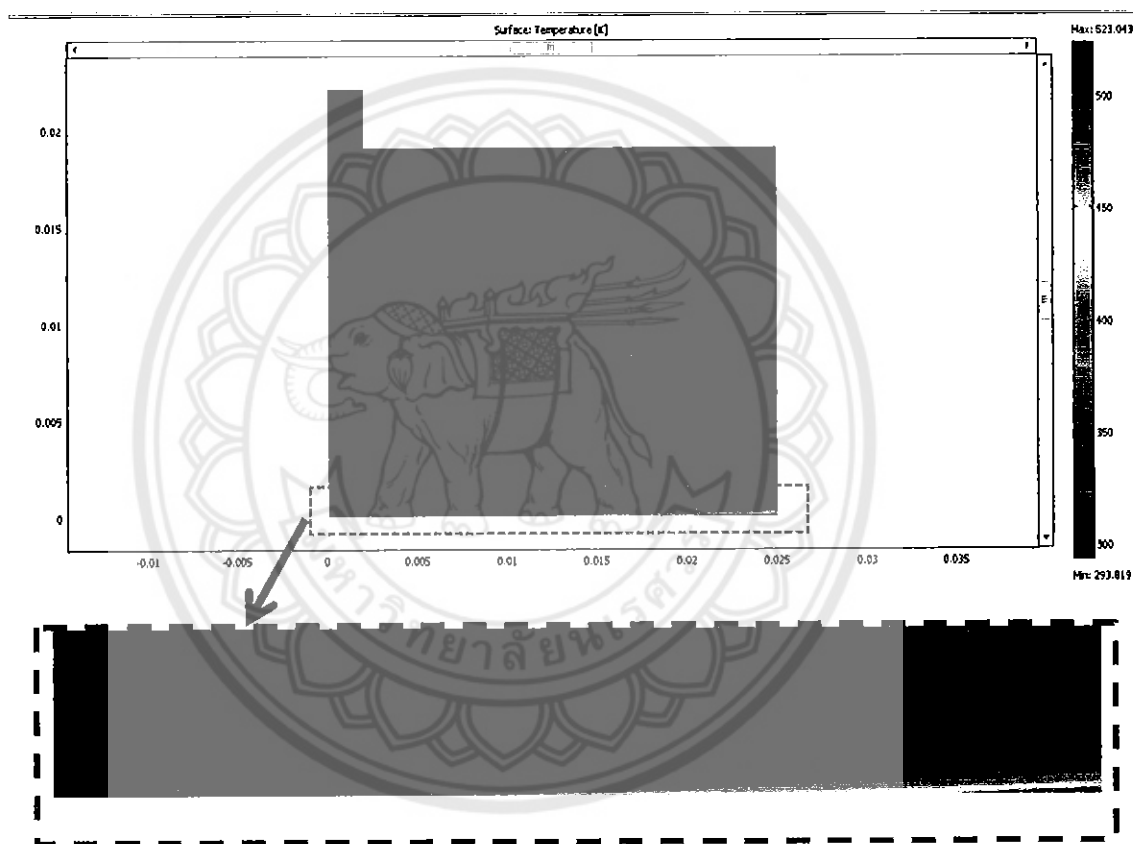
รูปที่ 3.20 การแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของสนามความเร็ว

### 3.6.2 แสดงผลในรูปของอุณหภูมิ

แสดงผลของอุณหภูมิเป็นระดับสีของอุณหภูมิ

- ที่เมนู Post processing > Plot parameter
- ที่แท็บ surface > Predefined quantities > เลือก Temperature แสดงดังรูปที่ 3.21

พื้นผิวตกระทบจะเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนของอุณหภูมิ ส่วนบริเวณอื่นที่เป็นน้ำหรืออากาศจะมีอุณหภูมิที่เท่ากับหรือใกล้เคียงอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของหัวฉีด โดยส่วนที่เป็นสีแดงจะมีอุณหภูมิสูง และสีน้ำเงินจะมีอุณหภูมิต่ำสุด



รูปที่ 3.21 ผลลัพธ์ในรูปของอุณหภูมิ (หมายเหตุ : สังเกตอุณหภูมิที่พื้นผิวตกระทบ)

### 3.7 การนำข้อมูลออกจากโปรแกรม Comsol

การแสดงผลของการถ่ายเทความร้อน ในรูปแบบของเลข Nusselt ซึ่งต้องนำอุณหภูมิของของไหลที่บริเวณผิวตกระทบมาคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) เสียก่อน โดยดึงข้อมูลของอุณหภูมิในรูปของสกุล .txt แล้วจึงแปลงไฟล์ลงในโปรแกรม Excel ต่อไปโดยมีขั้นตอนดังนี้

### 3.7.1 ขั้นตอนการบันทึกข้อมูล .txt

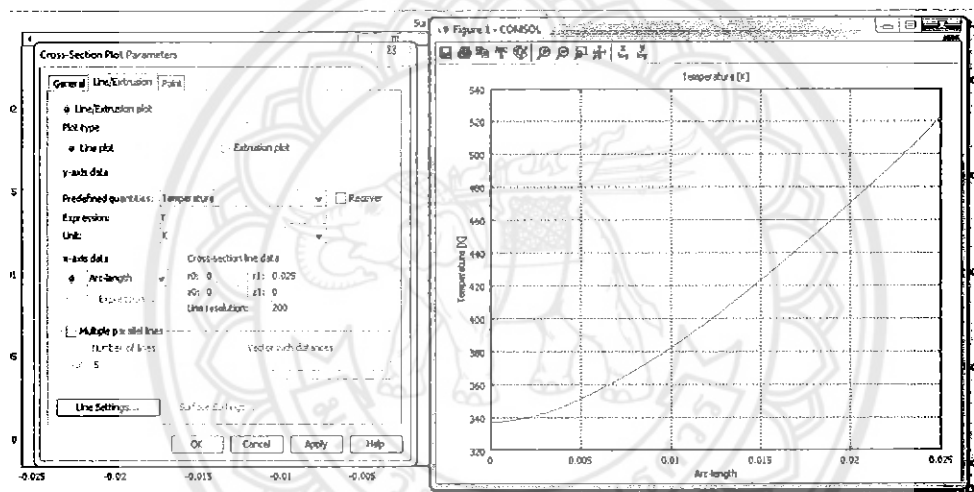
- เมื่อแสดงผลในรูปของอุณหภูมิแล้วให้คลิก Post processing > Cross-Section Plot Parameter

- ที่แท็บ Line/Extrusion ใน Predefined quantities เลือก Temperature

- ใน X-axial data เลือก Arc-length

- ใน Cross-Section line data กำหนดพิกัดของระยะผิวตกระทบ ที่ผิวตกระทบอยู่ที่พิกัด  $z=0$  เพราะฉะนั้นเราจึงต้องระบุค่า  $z(0):0$  ถึง  $z(1):0$  และอยู่ที่พิกัด  $r=0$  ถึง  $r=0.025$  m จึงต้องระบุเป็น  $r(0):0$  ถึง  $r(1):0.025$

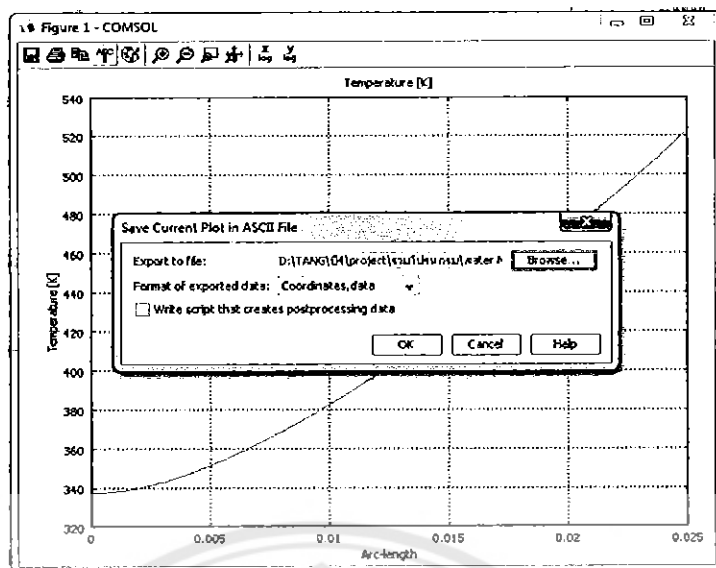
- คลิก Apply จะมีหน้าต่างแสดงรูปภาพของอุณหภูมิที่ผิวตกระทบ แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การกำหนดพิกัดของระยะผิวตกระทบ และกราฟของอุณหภูมิที่ผิวตกระทบ

- หน้าต่าง Figure 1-COMSOL จะปรากฏขึ้นมาให้คลิกปุ่ม  $ASC$  ซึ่งเป็นการนำข้อมูลที่พล็อตออกมา > คลิก Browse > ใส่ชื่อและเลือกบันทึกไฟล์ในโฟลเดอร์ที่ต้องการใน Drive ของเรา > คลิก Save > คลิก OK ดังแสดงในรูปที่ 3.23

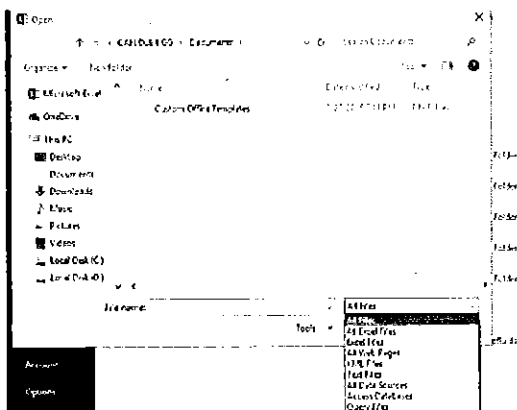




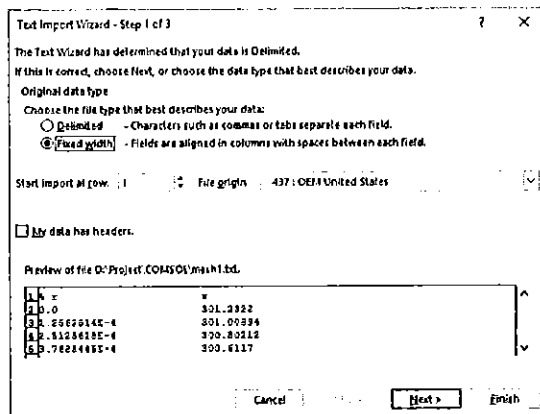
รูปที่ 3.23 การบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์สกุล .text

### 3.7.2 การนำข้อมูล .txt เข้าสู่ Excel

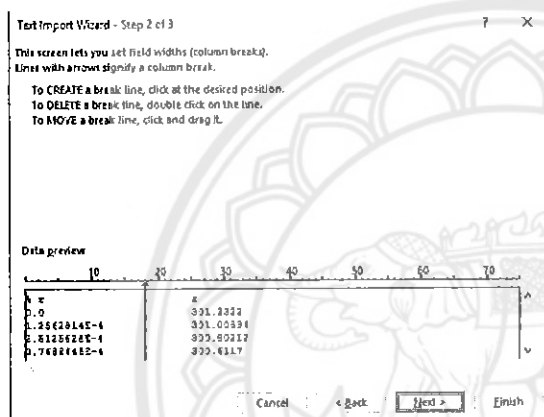
- เปิดโปรแกรม Excel
- ภายใต้เมนู File > Open เลือก All file > เปิดไฟล์ .txt ที่บันทึกไว้ มีหน้าต่างแสดงขึ้นมา  
ใน Choose the file type that best describes your data เลือก Fixed width คลิก Next >  
Next > Finish ดังแสดงในรูปที่ 3.24
- โปรแกรมแสดงข้อมูลที่นำข้อมูลจากไฟล์ .txt ลงในโปรแกรม Excel แสดงดังในรูปที่ 3.25



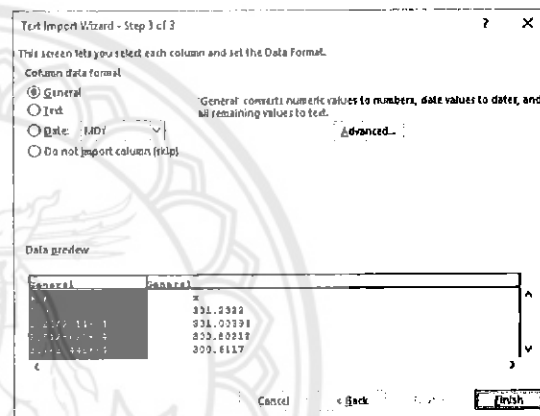
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 3.24 การเปิดข้อมูลเป็นไฟล์สกุล .txt ให้อยู่ในโปรแกรม Excel

|    | A        | B        |
|----|----------|----------|
| 1  | 0        | 337.2001 |
| 2  | 1.26E-04 | 337.3062 |
| 3  | 2.51E-04 | 337.632  |
| 4  | 3.77E-04 | 337.5641 |
| 5  | 5.03E-04 | 337.3519 |
| 6  | 6.28E-04 | 337.5473 |
| 7  | 7.54E-04 | 337.8134 |
| 8  | 8.79E-04 | 337.9731 |
| 9  | 0.001005 | 338.1106 |
| 10 | 0.001131 | 338.3088 |
| 11 | 0.001256 | 338.4543 |
| 12 | 0.001382 | 338.6996 |
| 13 | 0.001508 | 338.9189 |
| 14 | 0.001633 | 339.1423 |
| 15 | 0.001759 | 339.3398 |
| 16 | 0.001884 | 339.594  |
| 17 | 0.00201  | 339.8961 |
| 18 | 0.002136 | 340.2137 |
| 19 | 0.002261 | 340.5405 |
| 20 | 0.002387 | 340.8584 |
| 21 | 0.002513 | 341.1975 |
| 22 | 0.002638 | 341.5613 |
| 23 | 0.002764 | 341.9421 |
| 24 | 0.002889 | 342.3593 |
| 25 |          |          |

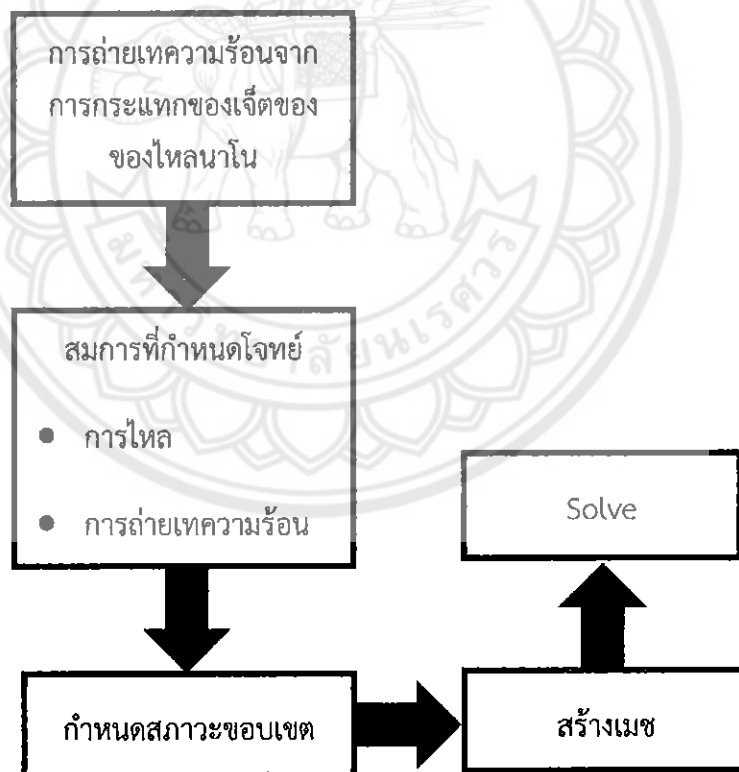
รูปที่ 3.25 ข้อมูลที่นำเข้าสู่โปรแกรม Excel



## บทที่ 4

### ขั้นตอนการคำนวณ

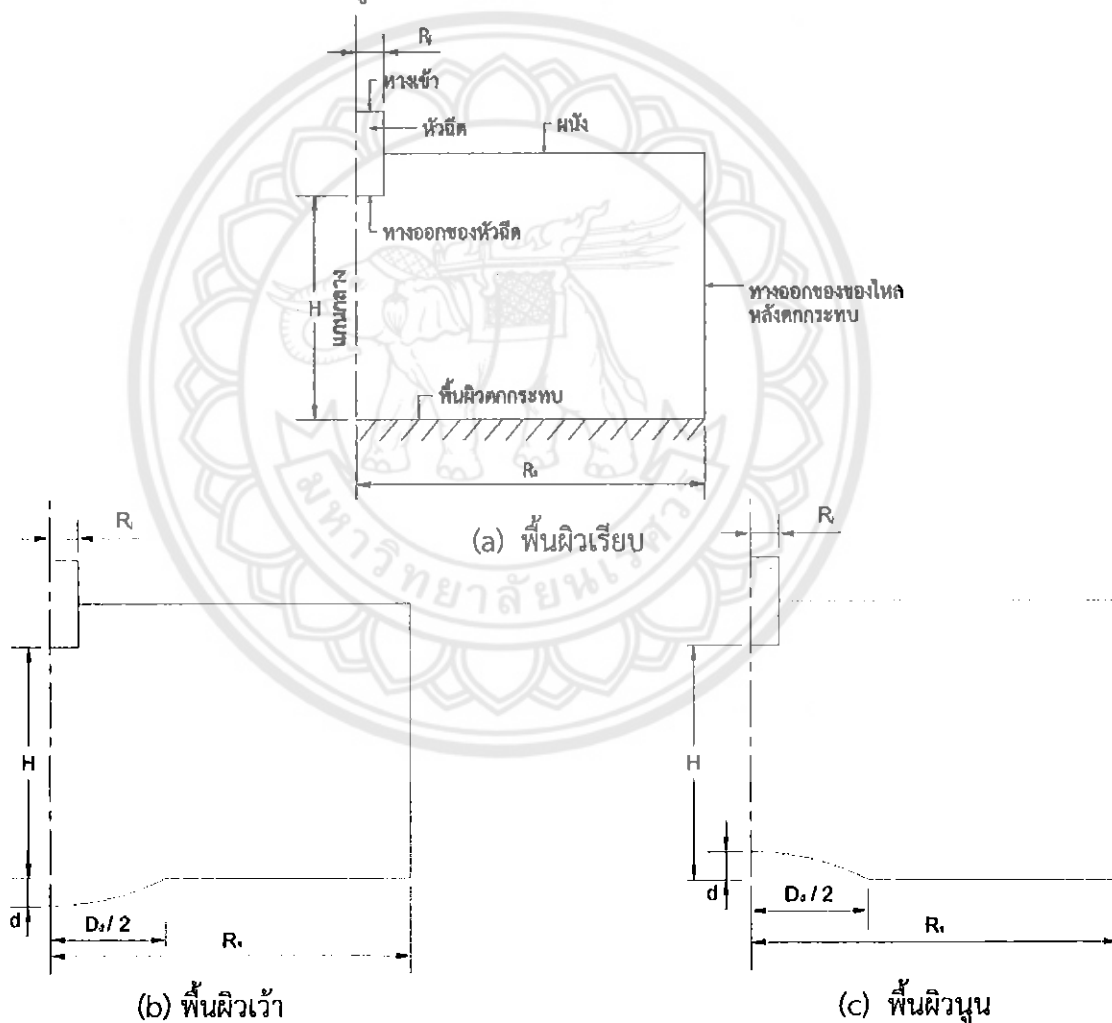
งานวิจัยนี้ต้องอาศัยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งในที่นี้เราใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ Comsol ในการหาคำตอบของการถ่ายเทความร้อนบนผิวตกกระทบแบบเรียบ เว้า และนูน จากการกระแทกของเจ็ทโดยมีของไหลนาโนเป็นของไหลทำงานกล่าวคือ จากโจทย์ของไหลนาโนไหลออกจากหัวฉีดเข้ามาแทนที่อากาศที่อยู่นิ่งกับที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนเพื่อระบายความร้อน จึงได้กำหนดสมการของการไหลและการถ่ายเทความร้อน จากนั้นกำหนดสภาวะขอบเขตโดยจะอธิบายในหัวข้อ 4.1 และสร้างเมช ด้วย Delaunay Algorithm ซึ่งเป็นรูปแบบการสร้างเมชแบบ 2D Axisymmetric และใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบ Direct(PARDISO) โดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนในการคำนวณโจทย์การถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของเจ็ทที่มีของไหลนาโนเป็นของไหลทำงานโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

### 4.1 สภาวะขอบเขตและสมบัติของของไหลทำงาน

รูปที่ 4.2 แสดงโดเมนการคำนวณสำหรับโจทย์การกระแทกของเจ็ทแบบสองมิติสมมาตรตามแกน (2D Axi-symmetric) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดขนาด ( $D_j$ ) 4 mm ผนังที่อยู่ติดกับหัวฉีดให้เป็นผนังเรียบไม่มีการสั่นไถล (No Slip) ผนังด้านล่างเป็นผนังตกรกระทบที่ไม่มีการสั่นไถลเช่นกัน และที่ทางออกกำหนดให้ของไหลหลังตกรกระทบไหลออกสู่อากาศแวดล้อมที่ความดันบรรยากาศ โดยที่ใช้ของไหลนาโนเป็นของไหลทำงาน ระยะ ( $H$ ) เป็นระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดและพื้นผิวเรียบ สำหรับกรณีพื้นผิวเว้าและพื้นผิวนูน ซึ่งมีส่วนโค้ง เรากำหนดให้ความลึกของพื้นผิวเว้าและความสูงของพื้นผิวนูนเป็น ( $d$ ) 2 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางภาพฉาย (Projected Diameter) ของทั้งผิวเว้าและผิวนูนเป็น ( $D_d$ ) 16 mm พื้นผิวทั้งสามมีรัศมีเป็น  $R_s$  เท่ากัน



รูปที่ 4.2 โดเมนการคำนวณ และการกำหนดสภาวะขอบเขตของการคำนวณ

ตัวแปรที่ใช้ศึกษามีดังนี้

1. เลข Renolds (Re) มีค่าคงที่ 7,000
2. อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดกับพื้นผิวส่วนที่เรียบ (H) และเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $D_j$ )  $H/D_j = 4$
3. ของไหลบริเวณทางเข้า ( $T_j$ ) 294.15 K
4. ความโค้งสัมพันธ์ (Relative Curvature) ของผิวเว้าและผิวนูนเป็น  $d/D_d = 0.125$
5. ฟลักซ์ความร้อนของพื้นผิวตกกระทบ ( $q''$ ) ที่  $550 \text{ kW/m}^2$

จากการกำหนดปัญหาของการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของเจ็ทโดยใช้ของไหลนาโน เป็นของไหลทำงาน ซึ่งสมบัติของของไหลนาโนที่เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน โดยในงานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิของของไหลนาโนเป็นทองแดง (Cu) ที่ความเข้มข้น 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยปริมาตร โดยมีน้ำเป็นของไหลฐาน โดยมีความสัมพันธ์ของสมบัติของของไหลนาโนดังสมการ

$$\text{ความหนาแน่น: } \rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (4.1)$$

$$\text{ความร้อนจำเพาะ: } C_{p,nf} = (1-\phi)C_{p,bf} + \phi C_{p,p} \quad (4.2)$$

ทั้งนี้ความหนืดพลวัตและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลนาโนหาได้จาก

$$\text{ความหนืดพลวัต: } \mu_{nf} = \mu_{bf}(123\phi^2 + 7.3\phi + 1) \quad (4.3)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การนำความร้อน: } \lambda_{nf} = \lambda_{bf}(4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1) \quad (4.4)$$

|         |           |   |
|---------|-----------|---|
| เมื่อ   | $\rho$    | คือ ความหนาแน่นของของไหล มีหน่วย $\text{kg/m}^3$              |
|         | $C_p$     | คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล มีหน่วย $\text{J/kg-K}$     |
|         | $\mu$     | คือ ความหนืดพลวัตของของไหล มีหน่วย $\text{Pa}\cdot\text{s}$   |
|         | $\lambda$ | คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีหน่วย $\text{W/m-K}$          |
|         | $\phi$    | คือ ความเข้มข้นของของไหลนาโน มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร |
| ตัวห้อย | $nf$      | หมายถึง ของของไหลนาโน (nano fluid)                            |
|         | $bf$      | หมายถึง ของของไหลฐาน (base fluid) ซึ่งในที่นี้ได้แก่น้ำ       |
|         | $p$       | หมายถึง ของอนุภาคนาโน ซึ่งในที่นี้คือทองแดง                   |

โดยที่

$$\rho_{bf} = 998 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{p,bf} = 4182 \text{ J/kg-K}$$

$$\lambda_{bf} = 0.597 \text{ W/m-K}$$

$$\rho_p = 8933 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{p,p} = 385 \text{ J/kg-K}$$

$$\lambda_p = 401 \text{ W/m-K}$$

ซึ่งมีผลการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคทองแดงจะทำให้ความหนาแน่น ความหนืด และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความร้อนจำเพาะมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.1 สมบัติของของไหลทำงาน

| ของไหลทำงาน | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $C_p$ (J/kg-K) | $\mu$ (Pa·s) | $\lambda$ (W/m-K) |
|-------------|-----------------------------|----------------|--------------|-------------------|
| water       | 998                         | 4182           | 9.98E-04     | 0.597             |
| 2%          | 1156.7                      | 4106.06        | 1.19E-03     | 0.631             |
| 4%          | 1315.4                      | 4030.12        | 1.49E-03     | 0.667             |
| 6%          | 1474.1                      | 3954.18        | 1.88E-03     | 0.705             |
| 8%          | 1632.8                      | 3878.24        | 2.37E-03     | 0.746             |
| 10%         | 1791.5                      | 3802.3         | 2.95E-03     | 0.789             |

#### 4.2 สมการสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน (Governing Equations)

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการไหลนั้นจะเริ่มพิจารณาจากสมการการอนุรักษ์ ซึ่งประกอบไปด้วย กฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ดังแสดงในสมการ

อนุรักษ์มวล: 
$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (4.5)$$

อนุรักษ์โมเมนตัม: 
$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) \quad (4.6)$$

อนุรักษ์พลังงาน: 
$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (4.7)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีหน่วย W/m-K  
 $C_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล มีหน่วย J/kg-K

- $E$  คือ พลังงานทั้งหมด มีหน่วย  $J/kg$   
 $P$  คือ ความดัน มีหน่วย  $Pa$   
 $Pr$  คือ Prandtl number  
 $T$  คือ อุณหภูมิ มีหน่วย  $K$   
 $\delta$  คือ Kronecher delta function  
 $\phi$  คือ ความเข้มข้นของของไหลนาโน มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร  
 $\mu$  คือ ความหนืดพลวัตของของไหล มีหน่วย  $Pa \cdot s$   
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล มีหน่วย  $kg/m^3$   
 $\tau$  คือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง มีหน่วย  $kg/m$

กำหนดให้ของไหลอยู่ที่สภาวะคงตัว มีการไหลแบบปั่นป่วน ตามแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  โดยมีความสัมพันธ์ของสมการการเคลื่อนที่ของของไหล ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + (G_k + G_b) - \rho \varepsilon \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.9)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.10)$$

- เมื่อ  $k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีหน่วย  $W/m-K$   
 $G_b$  คือ พลังงานจลน์เนื่องจากแรงลอยตัว  
 $G_k$  คือ พลังงานจลน์สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่  $G_k = -\rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$   
 $\varepsilon$  คือ อัตราการกระจายพลังงานความร้อนปั่นป่วน  
 $\mu_t$  คือ ความหนืดแบบปั่นป่วน  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล มีหน่วย  $kg/m^3$   
 $\sigma$  คือ Turbulent Prandtl number  
 ตัวห้อย  $i$  หมายถึง ความปั่นป่วน

โดยมีค่าคงที่ของรูปแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  ดังนี้  $C_{1\varepsilon} = 1.44$  ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$  ,  $\sigma_k = 1.0$  ,  $C_\mu = 0.09$  ,

$\sigma_\varepsilon = 1.3$  และ  $C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right|$  เมื่อ  $v$  คือ ความหนืดเชิงจลน์ และ  $u$  คือ ความเร็ว

สำหรับการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนออกจากหัวฉีดมาตกระทบกับผิวตกระทบที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ ( $q''$ ) เมื่อได้อุณหภูมิที่ผิวกระทบ ( $T_s$ ) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h$ ) ได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้



$$h = \frac{q''}{T_s - T_f} \quad (4.11)$$

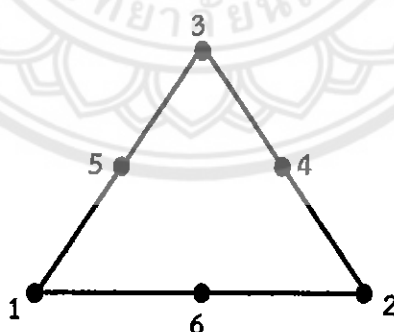
แล้วนำมาแสดงการถ่ายเทความร้อนในรูปของตัวแปรไร้มิติ เลข Nussult ( $Nu$ ) ซึ่งนิยามโดย

$$Nu = \frac{hD_j}{\lambda} \quad (4.12)$$

### 4.3 การสร้างเมช

#### 4.3.1 ขั้นตอนในการสร้างเมช

หลังจากกำหนดโจทย์การไหลแบบ 2D Axisymmetric แล้วทำการสร้างเมชแบบสามเหลี่ยมไว้ระเบียบโดยอาศัย Delaunay Algorithm แนวความคิดของวิธีดังกล่าวคือ เริ่มจากการสร้างวงกลม แล้วสร้างสามเหลี่ยมขึ้นมาภายในวงกลมโดยเลือกสามเหลี่ยมที่ให้พื้นที่มากที่สุดแล้วจึงสร้างไปเรื่อย ๆ จนครบโดเมนการคำนวณ จากเอลิเมนต์ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมจึงทำให้มี node ทั้งหมด 6 node โดยที่ node 1-3 จะอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมและอยู่ที่มุมของสามเหลี่ยม ซึ่งปกติจะใช้ตำแหน่งของมุมทั้งสามเป็นจุดศูนย์กลางวงล้อม แต่หากตำแหน่งไม่เหมาะสมก็จะเพิ่มตำแหน่งใหม่ลงไปบนส่วนที่เป็นอินพุต คำจำกัดความของเซตจำกัดของจุดบนระนาบ คือ จุดสามจุดที่ประกอบเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยมีจุดศูนย์กลางของวงล้อมร่วมกัน โดยที่ไม่มีจุดอื่นอยู่ภายใน ตามนิยามดังกล่าวนี้ทำให้เกิดสามเหลี่ยมที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นสามเหลี่ยมอ้างอิง [9] และมี node ระหว่างมุมทั้งสามอีก 3 node ซึ่งเรียงลำดับตามทศนิยม ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 node ในสามเหลี่ยมไว้ระเบียบ

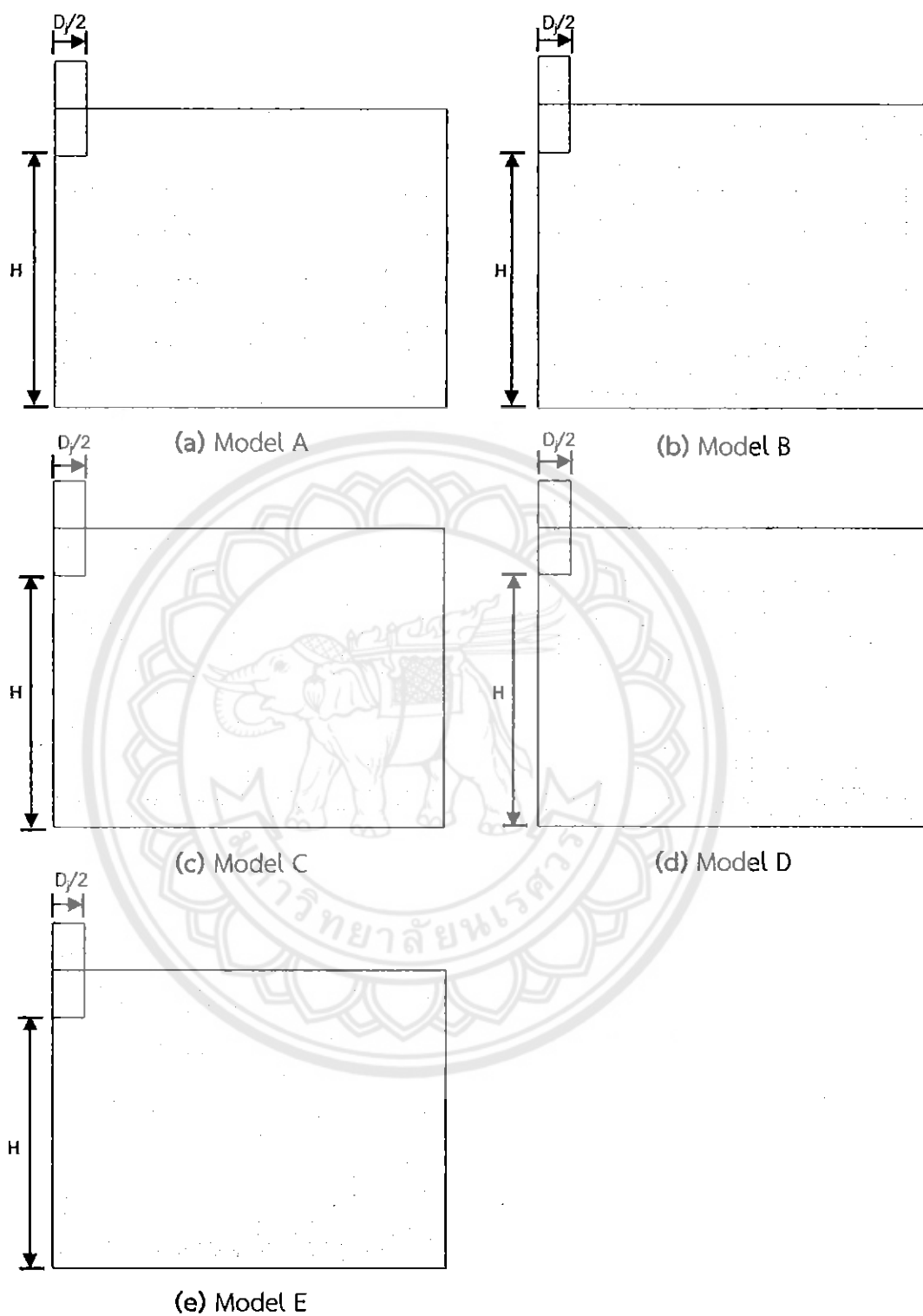
#### 4.3.2 ผลกระทบของความหนาแน่นของเมชที่มีต่อคำตอบ

สำหรับระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณโดเมนสองมิติ ความหนาแน่นของเมชที่มีค่าสูงจะนำไปสู่คำตอบที่มีความถูกต้องสูงด้วย [10] ดังนั้น ความหนาแน่นของเมชยังอาจส่งผลต่อคำตอบที่ได้ นอกจากนี้ ข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ เช่น ความเร็วของ CPU และหน่วยความจำ ยังเป็น

ขีดจำกัดของความละเอียดของเมซอีกด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบเพื่อหาค่าความหนาแน่นของเมซที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการคำนวณต่อไป

การทดสอบความหนาแน่นของเมซกระทำโดยการเปรียบเทียบเลข Nusselt โดยกำหนดขอบเขตของโดเมนการคำนวณดังนี้ อุณหภูมิที่ทางออกของหัวฉีดเท่ากับ 294.15 K ความเร็วของหัวฉีด ( $u_j$ ) เท่ากับ 1.75 m/s เลข Reynolds (Re) เท่ากับ 7000 อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดกับพื้นผิวส่วนที่เรียบ (H) และเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $D_j$ )  $H/D_j = 4$  โดยมีน้ำเป็นของไหลทำงาน การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนตามแบบจำลอง  $k-\epsilon$  เนื่องจากผลลัพธ์สุดท้ายที่เราต้องการคำนวณได้แก่ อุณหภูมิที่ผิวตกระทบ ( $T_s$ ) ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h$ ) ดังนั้นความถูกต้องของคำตอบที่ผิวจึงมีความสำคัญกว่า ในการปรับค่าความหนาแน่นของเมซนั้นจึงได้พิจารณาเฉพาะบริเวณพื้นผิวตกระทบ โดยกำหนด Growth rate ของเมซเท่ากับ 1.3 ในทุกกรณี ดังแสดงในรูปที่ 4.4





รูปที่ 4.4 การสร้างเมชที่ความหนาแน่นบริเวณผิวตกระทอบที่ต่างกัน

การตรวจสอบจะแบ่งความหนาแน่นของเมฆเป็น 5 แบบจำลองตามความหนาแน่นเฉลี่ยทั้งหมดจากหยาบไปหาละเอียดดังนี้ (1) แบบจำลอง A มีความหนาแน่น  $1.008316 \text{ เมฆ/mm}^2$  (2) แบบจำลอง B มีความหนาแน่น  $1.212058 \text{ เมฆ/mm}^2$  (3) แบบจำลอง C มีความหนาแน่น  $6.893971 \text{ เมฆ/mm}^2$  (4) แบบจำลอง D มีความหนาแน่น  $76.18711 \text{ เมฆ/mm}^2$  และ (5) แบบจำลอง E มีความหนาแน่น  $155.3888 \text{ เมฆ/mm}^2$  ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบของแบบจำลอง A B C และ D เมื่อเทียบกับแบบจำลอง E พบว่าแบบจำลอง D มีความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลอง E น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามที่ในการเลือกแบบจำลองเมฆนั้นต้องคำนึงถึงการคำนวณสำหรับพื้นผิวเว้าและพื้นผิวนูนต่อไปด้วย โดยบริเวณผิวเว้าและผิวนูนจะมีความหนาแน่นของเมฆสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งอาจส่งผลให้การคำนวณเกินขีดจำกัดของคอมพิวเตอร์ได้ เพราะฉะนั้นเราจึงเลือก แบบจำลอง C ซึ่งให้ค่า  $Nu_{avg}$  ต่างจากแบบจำลอง E ประมาณ 1% ซึ่งใช้เวลาและหน่วยความจำในการคำนวณน้อย

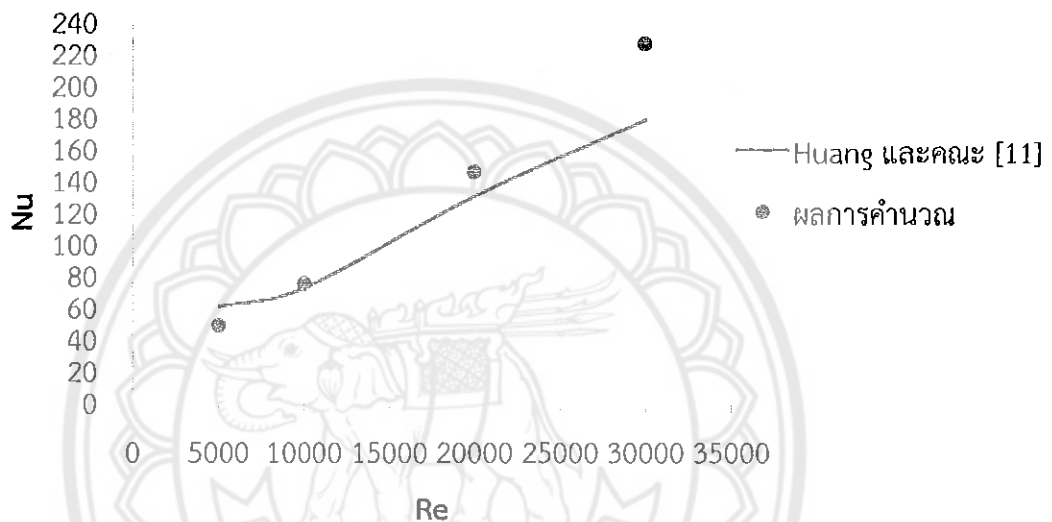
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบเมื่อความหนาแน่นของเมฆในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไป

| Model | จำนวนเมฆ | ขนาดของเมฆที่ผิวตกกระทบ (mm) | พื้นที่ $\text{mm}^2$ | ความหนาแน่นเฉลี่ยของเมฆ ( $\text{เมฆ/mm}^2$ ) | คุณภาพต่ำสุดของเมฆ | เวลาที่ใช้ (s) | $Nu_{avg}$ | ผลต่างจาก E (%) |
|-------|----------|------------------------------|-----------------------|---|--------------------|----------------|------------|-----------------|
| A     | 485      | หยาบ                         | 481                   | 1.008316                                      | 0.7986             | 11.468         | 197.20     | 241.78          |
| B     | 583      | 1                            | 481                   | 1.212058                                      | 0.7958             | 14.664         | 150.51     | 160.86          |
| C     | 3316     | 0.1                          | 481                   | 6.893971                                      | 0.7972             | 47.172         | 58.24      | 0.94            |
| D     | 36646    | 0.01                         | 481                   | 76.18711                                      | 0.737              | 351.636        | 57.71      | 0.026           |
| E     | 74742    | 0.005                        | 481                   | 155.3888                                      | 0.7161             | 789.232        | 57.70      | 0               |

#### 4.4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลจากงานวิจัยจากวรรณกรรม

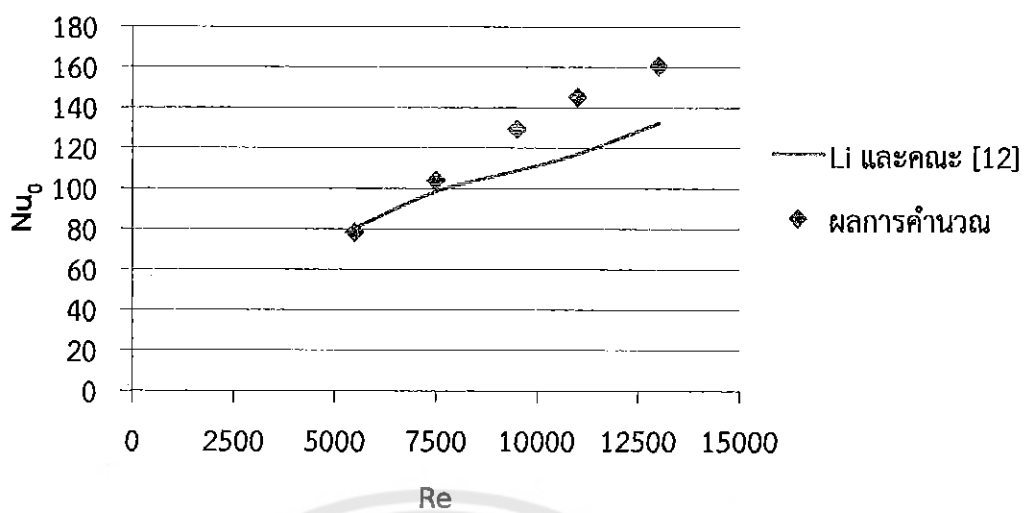
การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลเป็นกระบวนการหนึ่งที่จะลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบงานและเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ด้วย จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับงานวิจัยของ Huang และคณะ [11] โดยเลือกข้อมูลที่หัวฉีดเดียวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2 \text{ mm}$  อัตราส่วนระหว่างระยะห่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $H/D_j$ ) = 5 อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของเรากำหนดขอบเขตดังนี้ อุณหภูมิที่ทางออกของหัวฉีดเท่ากับ  $300 \text{ K}$  พลักซ์ความร้อนคงที่  $500,000 \text{ W/m}^2$  ที่เลข Reynolds ระหว่าง 5,000 ถึง

30,000 โดยใช้ น้ำ เป็นของไหลทำงาน ผลการเปรียบเทียบมีแนวโน้มเป็นไปตามผลของงานวิจัยในช่วงเลข Reynolds ไม่สูงนัก โดยให้ผลต่างของ Nu ที่มากที่สุดเท่ากับ 47 ที่ Re 30,000 คิดเป็น 26% และที่ Reynolds 10,000 มีความแตกต่างของ Nu น้อยมาก เท่ากับ 2.6 คิดเป็น 3.6% การเปรียบเทียบมีความแตกต่างอาจเป็นเพราะว่าในงานวิจัยของ Huang และคณะ [9] ใช้การไหลแบบปั่นป่วนตามแบบจำลอง  $k-\omega$  หาคำตอบวิธีการด้วยไฟไนต์วอลุ่มและใช้ SIMPLE algorithm ในการแก้ปัญหาแต่ในงานวิจัยนี้เราใช้แบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5  $k-\epsilon$  ซึ่งเหมาะกับการไหลแบบปั่นป่วนที่เลข Reynolds ไม่สูงนัก



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Huang และคณะ [11]

นอกจากนี้เปรียบเทียบค่าของ Nusselt ที่จุดตกกระทบจากการคำนวณกับผลการทดลองของ Li และคณะ [12] ซึ่งใช้หัวฉีดเดี่ยวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm อัตราส่วนระหว่างระยะห่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด  $(H/D)_j = 3$  ใดๆก็ตามในงานวิจัยของเรากำหนดขอบเขตดังนี้ อุณหภูมิที่ทางออกของหัวฉีดเท่ากับ 294.15 K พลักซ์ความร้อนคงที่ 497.363 kW/m<sup>2</sup> ที่เลข Reynolds ระหว่าง 5,500 7,500 9,500 11,000 และ 13,000 โดยใช้ น้ำ เป็นของไหลทำงาน ผลการเปรียบเทียบพบว่าที่เลข Reynolds เพิ่มขึ้นให้ผลต่างของ Nu มากขึ้น ผลต่างมากที่สุดเท่ากับ 28 ที่ Re 13,000 คิดเป็น 21% และที่ Reynolds 11,000 9,500 7,500 มีความแตกต่างของ Nu<sub>0</sub> คิดเป็น 23.7% 18.8% และ 5.6% ตามลำดับ ส่วนที่ Reynolds 5,500 มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคิดเป็น 2.8% ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Li และคณะ [12]



## บทที่ 5

### ผลการคำนวณและการอภิปรายผล

บทนี้กล่าวถึงผลการศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยแสดงผลในรูปของเลข Nusselt จากการกระทำของเจ็ตลงบนพื้นผิวตกระทอบแบบเรียบ ทั่วไป และ บูน ที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่  $550 \text{ kW/m}^2$  โดยมีของไหลนาโนเป็นของไหลทำงานมีอนุภาคนาโนเป็น ทองแดงและน้ำเป็นของไหลฐาน การไหลเป็นการไหลแบบสองมิติสมมาตรตามแกน (2D Axi-symmetric) และการไหลแบบปั่นป่วนตามแบบจำลอง  $k-\epsilon$  ที่เลข Reynolds 7,000 ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 4 mm อุณหภูมิที่ทางออกของหัวฉีด 294.15 K อัตราส่วนของระยะห่าง ระหว่างหัวฉีดและผิวตกระทอบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด  $H/D_j=4$  และศึกษาอิทธิพลของ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในน้ำที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนจากการกระทำของเจ็ตที่ความเข้มข้น 0%, 2%, 4%, 8% และ 10% โดยปริมาตร

#### 5.1 ผลกระทบของความเข้มข้นอนุภาคนาโนที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน

สำหรับหัวข้อนี้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวตกระทอบที่มีลักษณะเรียบทั่วไป และ บูน จากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0 ถึง 10% โดยปริมาตร ซึ่ง แสดงผลการถ่ายเทความร้อนในรูปตัวแปรไร้มิติซึ่งได้แก่เลข Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt number,  $Nu_{Local}$ ) ในรูปที่ 5.1 แสดงผลของการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวตกระทอบที่มีลักษณะ เรียบ สำหรับทุกค่าความเข้มข้นที่บริเวณจุดตกระทอบข้อมูลมีการแกว่งเล็กน้อยเป็นเพราะว่าเมื่อถึง จุดตกระทอบ Vortex เริ่มมีการ Break down ที่จุดตกระทอบให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากหลังจากของไหลตกระทอบบนพื้นผิว ความเร็ว ณ จุดตกระทอบเท่ากับศูนย์ไม่มีแรงเฉือน ของของไหลทำให้การถ่ายเทโมเมนตัมจากของไหลสู่จุดตกระทอบสูงกว่าบริเวณอื่น ที่ตำแหน่ง  $r_j/D_j$  สูงขึ้นไกลออกไปจากจุดตกระทอบจะให้ค่า Nu ลดลงอย่างต่อเนื่อง สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ หลังจากของไหลไหลออกจากบริเวณตกระทอบของไหลจะไหลขนานไปกับพื้นผิวเรียบและความเร็ว ของของไหลมีค่าลดลงทำให้โมเมนตัมการไหลลดลงเนื่องจากของไหลจากเจ็ตผนัง (Wall Jet) ถ่ายเท โมเมนตัมให้แก่อากาศภายนอกที่อยู่ข้างที่ ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่น้อยลง

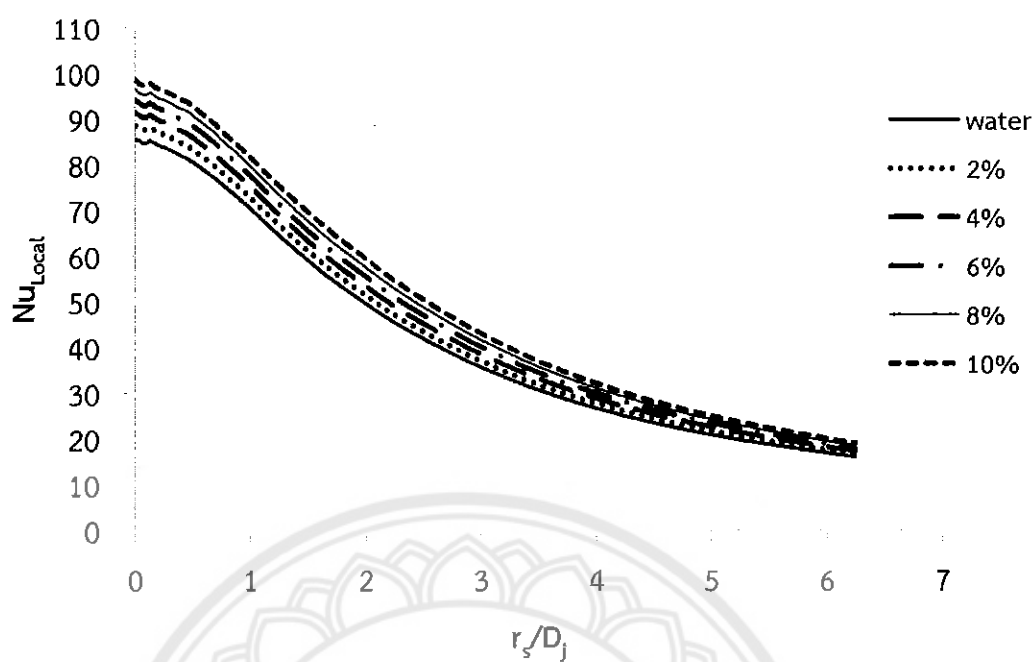
เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคทองแดงจะทำให้การถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้น เนื่องจาก อนุภาคนาโนไปเปลี่ยนสมบัติของของไหลทำงาน กล่าวคือให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ค่าความ

หนืดพลวัต และความหนาแน่นสูง ความจุความร้อนมีค่าลดลงในขณะเดียวกันค่าความจุความร้อนนี้จะแปรผันตามอุณหภูมิ จึงส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น และได้ทำการเปรียบเทียบค่าเลข Nusselt เฉลี่ย (Average Nusselt number ;  $Nu_{ave}$ ) ที่ความเข้มข้นของอนุภาคทองแดงที่ค่าต่าง ๆ ระหว่าง 0 ถึง 10% โดยปริมาตร มีค่า  $Nu_{ave}$  คือ 41.48, 42.96, 44.53, 46.12, 47.59 และ 48.94 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของความเข้มข้น 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยปริมาตรกับของไหลฐานพบว่าของไหลนาโนให้การถ่ายเทความร้อนดีกว่าคิดเป็น 3.58%, 7.37%, 11.20%, 14.73% และ 17.99% ตามลำดับ

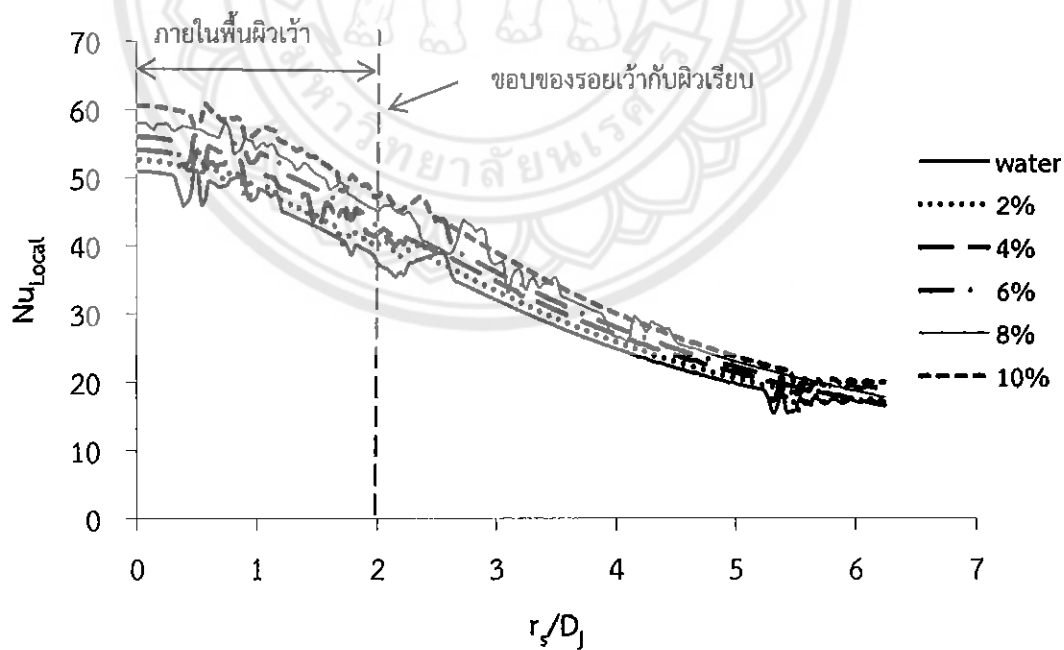
รูปที่ 5.2 แสดงการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวตกรกกระทที่มีลักษณะเว้า โดยลักษณะ ของการเว้าเป็นส่วนโค้งของวงกลม  $d/D_0$  เป็น 0.125 จากรูปพบว่าที่ช่วงบริเวณส่วนเว้า  $0 \leq r_j/D_j \leq 2$  ในทุกความเข้มข้นให้ค่า  $Nu$  มีลักษณะแกว่งขึ้นลง น่าจะมีสาเหตุมาจากเมื่อของไหลตกรกกระทลงส่วนเว้า Vortex ซึ่งกระทบบนผิวเป็นช่วง ๆ และบริเวณหลังรอยต่อระหว่างผิวเว้ากับผิวเรียบมีการแกว่งจากการยกตัวของสนามการไหลที่พยายามขึ้นไปสู่ผิวเรียบที่อยู่ติดกันซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อถัดไป เมื่อเพิ่มความเข้มข้นการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $Nu_{ave}$  ที่ความเข้มข้นของอนุภาคทองแดงที่ค่าต่าง ๆ ระหว่าง 0 ถึง 10% โดยปริมาตร มีค่า  $Nu_{ave}$  คือ 32.96, 34.18, 35.46, 36.92, 38.44 และ 39.91 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยปริมาตรกับของไหลฐานทุกความเข้มข้นให้การถ่ายเทความร้อนดีกว่าของไหลฐานคิดเป็น 3.7%, 7.58%, 12.02%, 16.61% และ 21.09% ตามลำดับ

รูปที่ 5.3 แสดงการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวตกรกกระทที่มีลักษณะนูน โดยลักษณะ ของการนูนเป็นส่วนโค้งของวงกลม  $d/D_0$  เป็น 0.125 จากรูปพบว่า ที่ช่วงบริเวณรอยนูน  $0 \leq r_j/D_j \leq 2$  ในทุกความเข้มข้นให้ค่า  $Nu$  แกว่งขึ้นลงคล้ายกับข้อมูลของผิวเว้า ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นผลของความโค้งของผิวนั้นเอง ที่  $r_j/D_j$  สูงจะให้  $Nu$  ลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $Nu_{ave}$  ที่ความเข้มข้นของอนุภาคทองแดงที่ค่าต่าง ๆ ระหว่าง 0 ถึง 10% โดยปริมาตร มีค่า  $Nu_{ave}$  คือ 46.81, 48.51, 50.43, 54.99, 67.43 และ 73.42 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยปริมาตรกับของไหลฐานทุกความเข้มข้นให้การถ่ายเทความร้อนดีกว่าของไหลฐานเป็น 3.63%, 7.73%, 15.35%, 44.04% และ 56.84% ตามลำดับ สังเกตที่ความเข้มข้นของอนุภาคทองแดง 8% และ 10% โดยปริมาตร ให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าน้ำมากอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก Vortex ที่บริเวณผิวเรียบของพื้นผิวนูนให้โมเมนตัมสูง ประกอบกับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มสมบัติของของไหลให้มีค่าการนำความร้อน ความหนาแน่น และความหนืดพลวัตสูงขึ้น

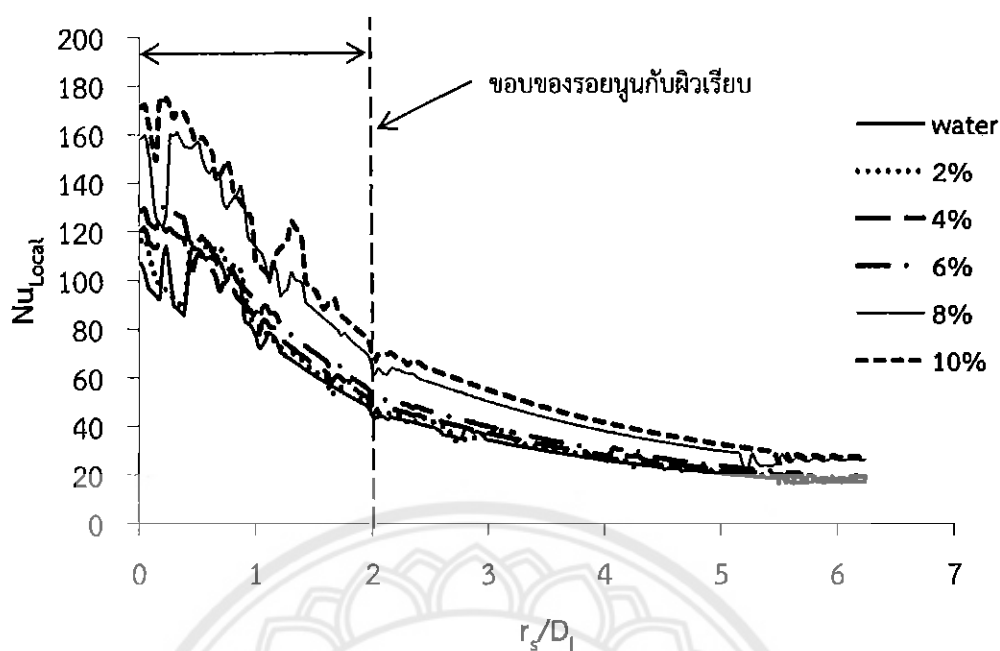




รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt number) กับความเข้มข้น 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยปริมาตร บนผิวตกระทบบแบบเรียบ



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt number) กับความเข้มข้น 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยปริมาตร บนผิวตกระทบบแบบเว้า



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt number) กับความเข้มข้น 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยปริมาตร บนผิวตกระทบบนูน

## 5.2 ผลกระทบของลักษณะพื้นผิวตกระทบบ

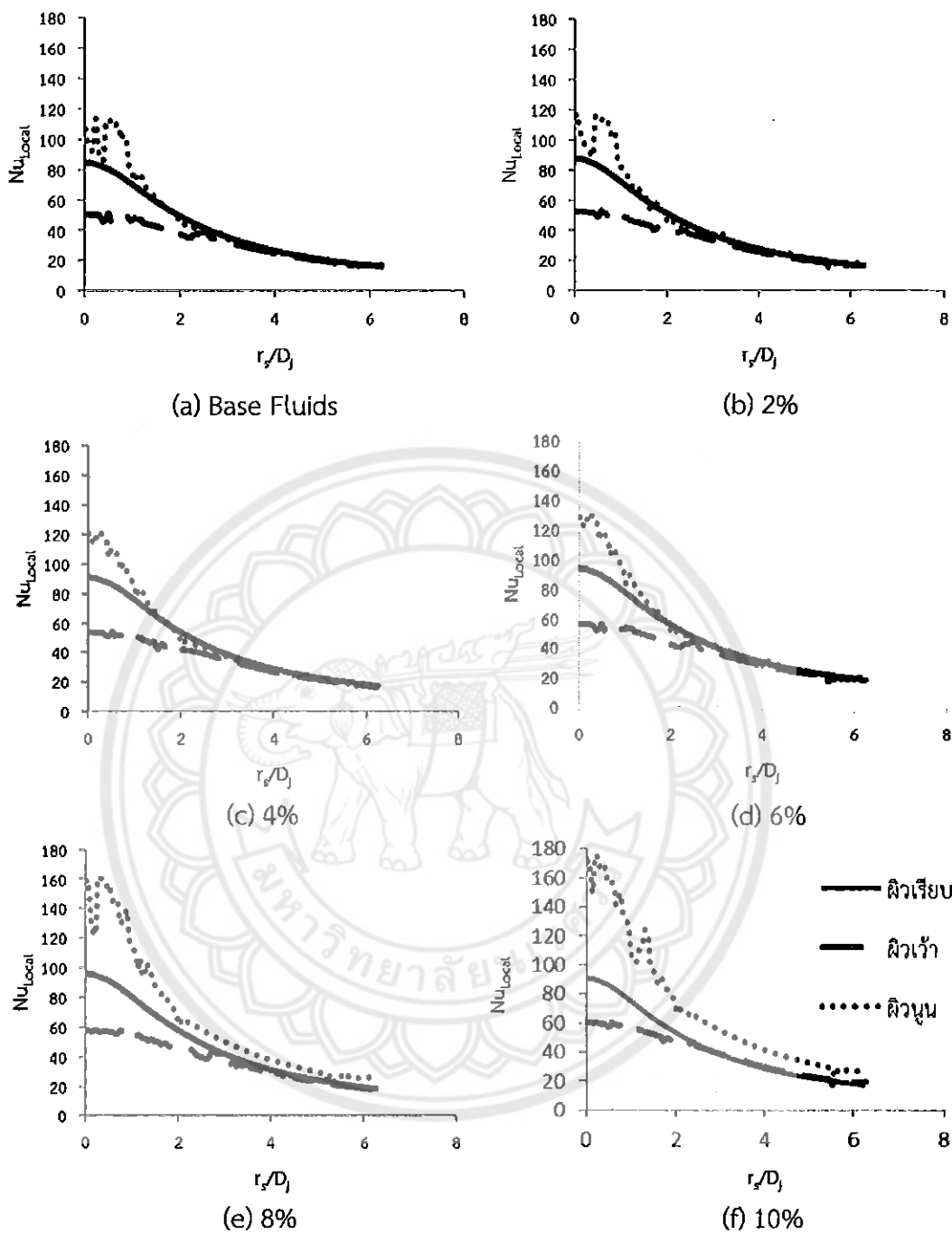
ในหัวข้อนี้เป็นผลของการถ่ายเทความร้อนจากการเปลี่ยนพื้นผิวบริเวณจุดตกระทบบโดยมี 3 ลักษณะคือ พื้นผิวเรียบ พื้นผิวเว้า และพื้นผิวนูน จากรูปที่ 5.4 พบว่าพื้นผิวตกระทบบทั้ง 3 ลักษณะให้ ค่า Nu ลดลงเมื่อ  $r_s/D_j$  เพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่าที่ทุกความเข้มข้นบริเวณตกระทบบ ( $0 < r_s/D_j < 2$ ) ผิวตกระทบบนูนให้ค่า Nu สูงกว่าพื้นผิวเรียบและพื้นผิวเว้าให้ค่า Nu ต่ำสุด ในบริเวณผิวเว้าและนูน ค่า Nu แกว่งขึ้นลง และเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อของส่วนโค้งกรณิของผิวนูนและเว้า ( $2 < r_s/D_j < 3$ ) ที่ความเข้มข้น 0%, 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตรผิวนูนและผิวเรียบให้ค่า Nu ใกล้เคียงกันแต่ที่ความเข้มข้น 8% และ 10% โดยปริมาตรพื้นผิวนูนให้ค่า Nu สูงกว่าผิวเรียบในขณะที่ผิวเว้าและผิวเรียบให้ค่า Nu ใกล้เคียงกัน และช่วง  $3 < r_s/D_j < 6.25$  ซึ่งเป็นบริเวณผิวเรียบของทั้งสามพื้นผิวที่ความเข้มข้น 0%, 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตรให้ค่า Nu ใกล้เคียงกันมากจนเกือบเป็นเส้นเดียวกัน แต่ที่ความเข้มข้น 8% และ 10% โดยปริมาตรพื้นผิวนูนให้ค่า  $Nu_{Local}$  บริเวณผิวเรียบสูงกว่าอีก 2 พื้นผิว ในขณะที่ผิวเรียบและผิวเว้าให้  $Nu_{Local}$  ใกล้เคียงกัน

ในรูปที่ 5.5 และ 5.6 แสดงค่า Nu ณ จุดตกระทบบ ( $Nu_0$ ) โดยมีข้อมูลแสดงในตารางที่ ก.1 และ  $Nu$  เฉลี่ย ( $Nu_{ave}$ ) ข้อมูลแสดงในตารางที่ ก.2 ในภาคผนวกตามลำดับที่ความเข้มข้นต่างๆ สังเกตได้ว่าทุกพื้นผิวเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น Nu มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยผิวนูนให้ค่า Nu

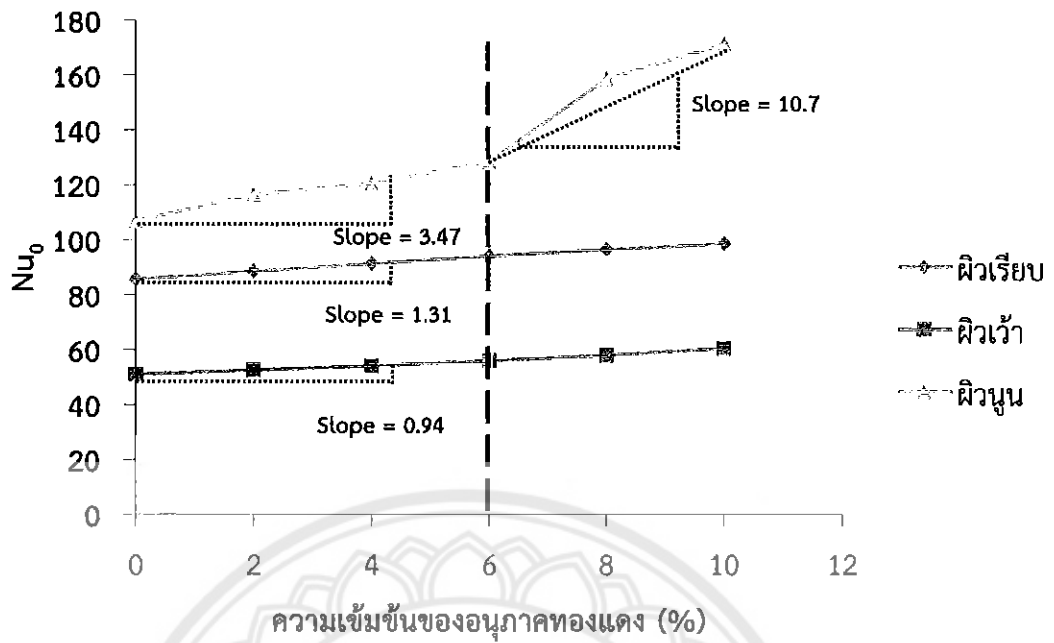
สูงที่สุด จะเห็นได้ว่าความชันของข้อมูลของพื้นผิวเรียบและพื้นผิวเว้าในทุกความเข้มข้นให้ความชันใกล้เคียงกัน แต่ผิวอนุที่ความเข้มข้นระหว่าง  $6\% < \phi < 10\%$  ให้ความชันสูงถึง 10.7 และเมื่อหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ  $Nu_0$  และ  $Nu_{ave}$  ของพื้นผิวเว้ากับพื้นผิวเรียบและของพื้นผิวอนุกับพื้นผิวเรียบแสดงในตารางที่ ก.3 และ ก.4 ตามลำดับ พบว่าที่จุดตกกระทบของผิวอนุที่ความเข้มข้น 10% โดยปริมาตร ให้การถ่ายเทความร้อนดีกว่าผิวเรียบถึง 73.85%

จากข้อสังเกตที่กล่าวมาเป็นผลของโครงสร้างลักษณะการไหลที่ผิวตกกระทบทั้ง 3 พื้นผิวโดยทางออกของหัวฉีดจะปรากฏ Potential core จากนั้นที่ระยะไกลออกมาเกิด Vortex คู่ในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อตกกระทบ Vortex จะ Break Down อย่างรวดเร็วทำให้บริเวณจุดตกกระทบมีโมเมนตัมสูงกว่าบริเวณอื่น ที่บริเวณรอบ ๆ จุดตกกระทบเกิด Oscillation ตามแนวรัศมี ส่วนโค้งพื้นผิวเว้าและพื้นผิวอนุทำให้สมมาตรของ Vortex ถูกทำลายลงด้วยส่วนโค้งดังแสดงในรูปที่ 5.7b และ 5.7c ในขณะที่บนพื้นผิวเรียบ (รูปที่ 5.7a) Vortex หลังตกกระทบยังคงเคลื่อนที่ต่อไปตามผนังพิจารณาการไหลหลังจากของไหลตกกระทบในส่วนของผิวอนุ Vortex เคลื่อนที่ลงจากส่วนอนุเกิดแรงเฉื่อย (Inertia Force) จากนั้นของไหลไหลแนบไปกับบริเวณผิวเรียบไปเรื่อย ๆ (Entrainment) เนื่องจากถ่ายเทโมเมนตัมให้แก่อากาศภายนอกซึ่งอยู่ข้างเคียงทำให้มีการถ่ายเทโมเมนตัมสูงกว่าผิวเรียบ ในขณะที่ผิวเว้าเมื่อของไหลตกกระทบแล้วของไหลเคลื่อนที่ขึ้นกระทบผิวเป็นช่วง ๆ และพยายามขึ้นไปสู่ผิวเรียบ ของไหลที่ไหลตามลงมาตกกระทบลงมา จึงไปผสมกับของไหลที่ค้างอยู่ในผิวเว้าทำให้ของไหลเหลือโมเมนตัมน้อยลงในการถ่ายเทให้กับพื้นผิว จึงให้การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับผิวตกกระทบแบบอนุและเรียบ และบริเวณผิวเรียบนี้ของไหลปรับตัวไหลขนานไปกับผนังเรียบจึงทำให้มีความเร็วใกล้กันจึงทำให้มีการถ่ายเทโมเมนตัมใกล้กันส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนใกล้กัน แต่ที่ความเข้มข้น 8% และ 10% โดยปริมาตร ผิวอนุให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดเนื่องจาก Vortex ที่บริเวณผิวเรียบของพื้นผิวอนุให้โมเมนตัมสูง ประกอบกับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มสมบัติของของไหลให้มีค่าการนำความร้อน ความหนาแน่น และความหนืดพลวัตสูงขึ้น

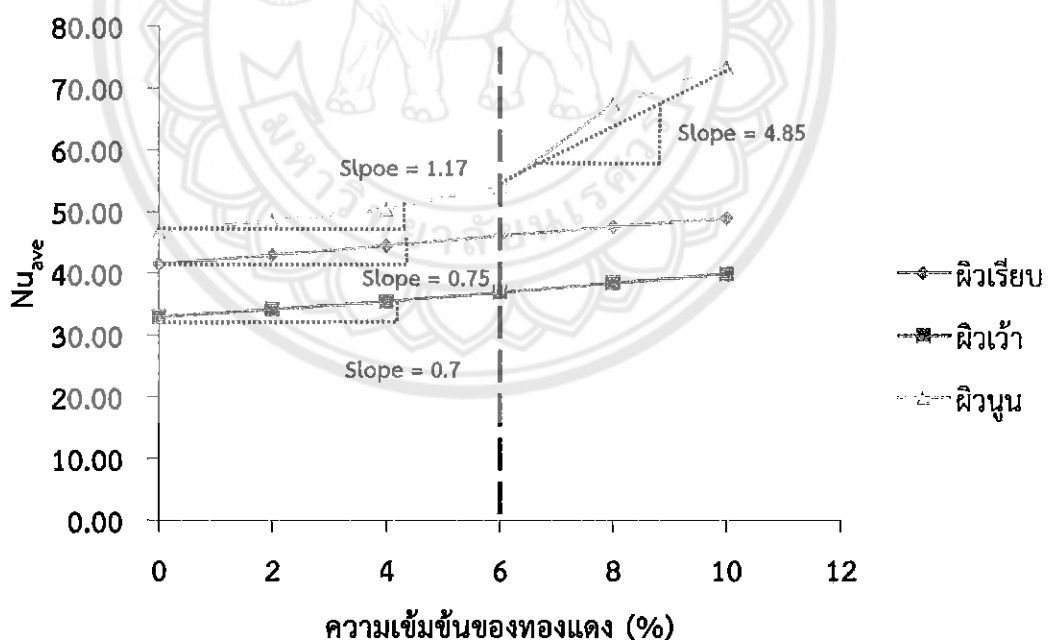
จากที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่าพื้นผิวตกกระทบแบบอนุให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ความเข้มข้น 8% และ 10% โดยปริมาตรให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าพื้นผิวเรียบและพื้นผิวเว้าอย่างชัดเจน โดยที่พื้นผิวอนุให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าพื้นผิวเรียบคิดเป็น 41.69% และ 50.02% ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลของส่วนโค้งทำให้มีการถ่ายเทโมเมนตัมสูงกว่าพื้นผิวอื่น ๆ ประกอบกับความเข้มข้นของอนุภาคทองแดงที่เพิ่มขึ้นเสริมการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น



รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ ( $Nu_{Local}$ ) ของพื้นผิวตกระทบบแบบเรียบ เว้า และ บูน ที่ความเข้มข้นของอนุภาคต่าง ๆ



รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่า Nusselt ณ จุดตกกระทบ ( $Nu_0$ ) ของพื้นผิวตกกระทบแบบเรียบ เว้า และนูน ที่ความเข้มข้นของอนุภาคต่าง ๆ



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉลี่ย ( $Nu_{ave}$ ) ของพื้นผิวตกกระทบแบบเรียบ เว้า และนูน ที่ความเข้มข้นของอนุภาคต่าง ๆ



(a) พื้นผิวเรียบ



(b) พื้นผิวเว้า



(c) พื้นผิวนูน

รูปที่ 5.7 โครงสร้างของการไหลที่  $Re=6000$  และ  $H/D_j=4$  ที่ตกกระทบลงบนพื้นผิว  
(ที่มา : Cornaro และ คณะ [13])

### 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน

ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ( $\phi$ ) เป็นการนำผลของ  $Nu_{ave}$  ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และทำการสร้างความสัมพันธ์ในแต่ละกรณี ดังรูปที่ 5.8 (a), (b) และ (c) เพื่อหาค่า A และ B ซึ่งจะนำไปใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับ  $\phi$  โดยที่จากงานวิจัยของ Kanokjaruvijit และ Matinez-Botas [1] ได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับ  $Re$ ,  $H/D_j$ ,  $d/D_d$ , และ  $D_j/D_d$  ในรูปของการยกกำลัง

$$Nu_{ave} = a(Re)^b (H/D_j)^c (d/D_d)^e (D_j/D_d)^f \quad (5.1)$$

โดยที่ a, Re, b,  $H/D_j$ , c,  $d/D_d$ , e,  $D_j/D_d$ , f เป็นค่าคงที่ ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับสมการที่ (5.1) ในงานวิจัยนี้เราจึงจะหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  และความเข้มข้น  $\phi$  ในรูปของ

$$Nu_{ave} = A\phi^B \quad (5.2)$$

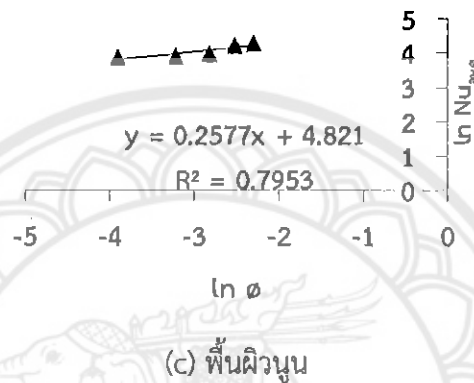
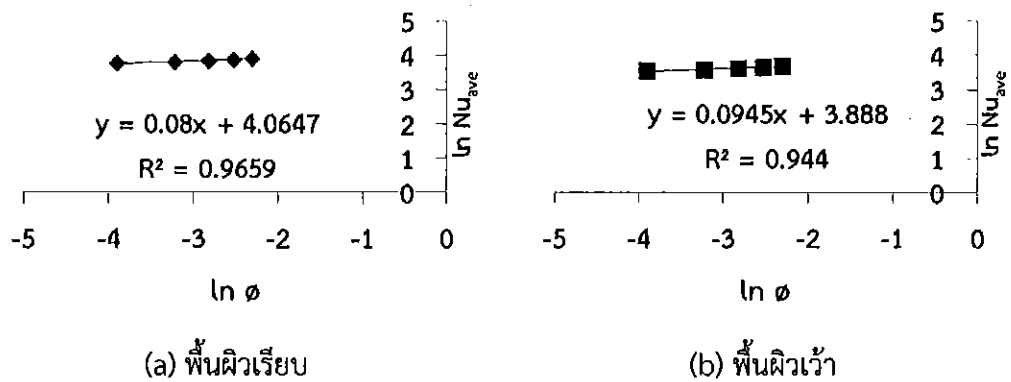
จากนั้นทำการใส่ Natural Logarithm ตลอดสมการเพื่อทำการหา A และ B ได้เป็น

$$\ln Nu_{ave} = B \ln \phi + \ln A \quad (5.3)$$

ซึ่งให้เป็นสมการเส้นตรงของ Natural log ที่มีความชันเป็น B และ Y-Intercept เป็น  $\ln A$  จากนั้นทำการ plot ระหว่าง  $\ln Nu_{ave}$  และ  $\ln \phi$  สำหรับผิวตกกระทบลักษณะต่าง ๆ จะได้รูปที่ 5.8 ที่ให้ค่า  $R^2 = 0.7953-0.9659$  โดยให้แกน y เป็น  $\ln Nu_{ave}$  แกน x เป็น  $\ln \phi$  ค่าของ B และ  $\ln A$  ของแต่ละพื้นผิวแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลค่า Nusselt เฉลี่ยของผิวตกกระทบลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

| ความเข้มข้นของอนุภาค ( $\phi$ ) | $Nu_{ave}$   |             |            |
|---------------------------------|--------------|-------------|------------|
|                                 | พื้นผิวเรียบ | พื้นผิวเว้า | พื้นผิวนูน |
| 2%                              | 42.96        | 34.18       | 48.51      |
| 4%                              | 44.53        | 35.46       | 50.43      |
| 6%                              | 46.12        | 36.92       | 53.99      |
| 8%                              | 47.59        | 38.44       | 67.43      |
| 10%                             | 48.94        | 39.91       | 73.42      |



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์และสมการของ  $Nu_{ave}$  กับ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ( $\phi$ ) ที่  $Re = 7000$ ,  $H/D_j = 4$  และ  $\phi = 0$  ถึง 10% โดยปริมาตร

ตารางที่ 5.2 ค่า B และ  $\ln A$  ที่ได้จากรูปที่ 5.8

| ผิวตกกระทบ   | B      | $\ln A$ |
|--------------|--------|---------|
| พื้นผิวเรียบ | 0.0809 | 4.0694  |
| พื้นผิวเว้า  | 0.0959 | 3.8958  |
| พื้นผิวนูน   | 0.2696 | 4.8833  |

และนำค่าแทนลงในสมการที่ 5.3 ได้ดังนี้

$$\text{พื้นผิวเรียบ : } \ln Nu_{ave} = 0.08 \ln \phi + 4.0647 ; R^2 = 0.9659 \quad (5.4a)$$

$$\text{พื้นผิวเว้า : } \ln Nu_{ave} = 0.0945 \ln \phi + 3.888 ; R^2 = 0.944 \quad (5.4b)$$

$$\text{พื้นผิวนูน : } \ln Nu_{ave} = 0.25776 \ln \phi + 4.821 ; R^2 = 0.7953 \quad (5.4c)$$

จากนั้นนำสมการที่ (5.4a), (5.4b) และ (5.4c) แปลงกลับโดยใช้เอ็กซ์โพเนนเชียลตลอดสมการ ดังนั้น จึงได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับ  $\phi$  ในสมการที่ (5.5a), (5.5b) และ (5.5c) เป็นดังนี้



$$\text{ผิวเรียบ : } Nu_{ave} = 58.2474\phi^{0.08} ; R^2=0.9659 \quad (5.5a)$$

$$\text{ผิวเว้า : } Nu_{ave} = 48.8131\phi^{0.0945} ; R^2=0.944 \quad (5.5b)$$

$$\text{ผิวนูน : } Nu_{ave} = 124.0891\phi^{0.25776} ; R^2=0.7953 \quad (5.5c)$$

นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถแสดงด้วยความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดังแสดงในรูปที่ 5.9 ผิวเรียบและผิวเว้าหาความสัมพันธ์จากการเลือกเส้นแนวโน้มแบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 ที่ให้ค่า  $R^2=0.99$  ส่วนผิวนูนหาความสัมพันธ์จากการเลือกเส้นแนวโน้มแบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 4 ที่ให้ค่า  $R^2=0.99$  ซึ่งเป็นค่าที่น่าพอใจใน Curve Fitting โดยมีความสัมพันธ์ของสมการ ดังนี้

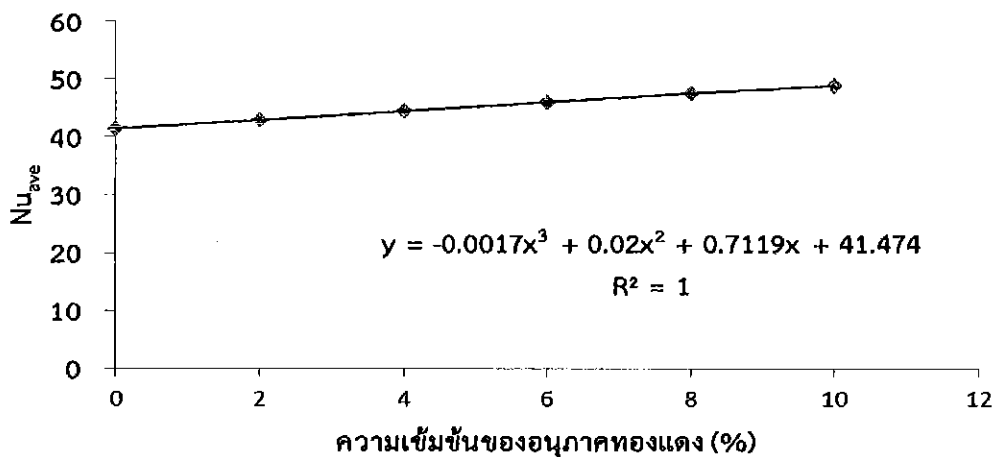
$$\text{ผิวเรียบ: } Nu_{ave} = -0.0017\phi^3 + 0.02\phi^2 + 0.7119\phi + 41.474 ; R^2=1 \quad (5.6a)$$

$$\text{ผิวเว้า : } Nu_{ave} = -0.001\phi^3 + 0.0254\phi^2 + 0.544\phi + 32.969 ; R^2=0.9999 \quad (5.6b)$$

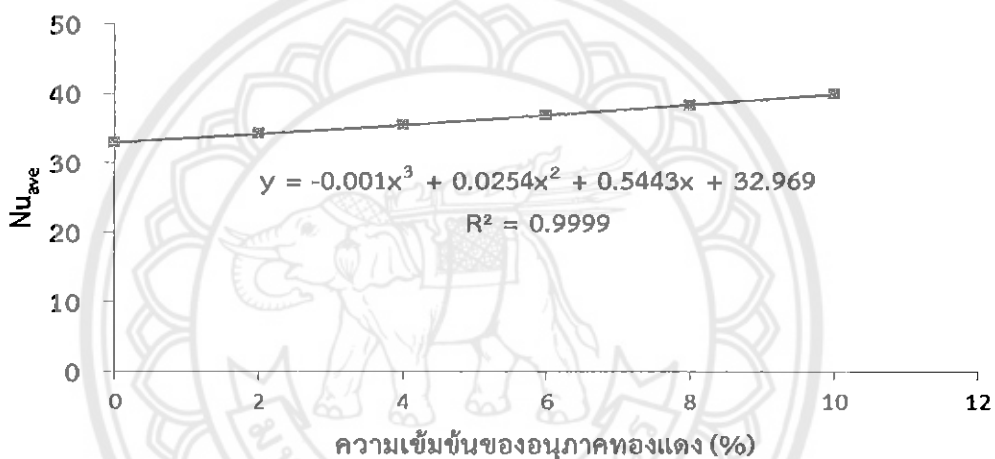
$$\text{ผิวนูน: } Nu_{ave} = -0.0244\phi^4 + 0.4717\phi^3 - 2.456\phi^2 + 4.4535\phi + 47.196 ; R^2=0.9932 \quad (5.6c)$$

แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ในรูปเอ็กซ์โพเนนเชียลจะให้ความเชื่อมโยงกับสมการที่ (5.1) ได้ยาก เพราะฉะนั้น ในงานวิจัยนี้เราจึงเลือกความสัมพันธ์ในรูปยกกำลัง

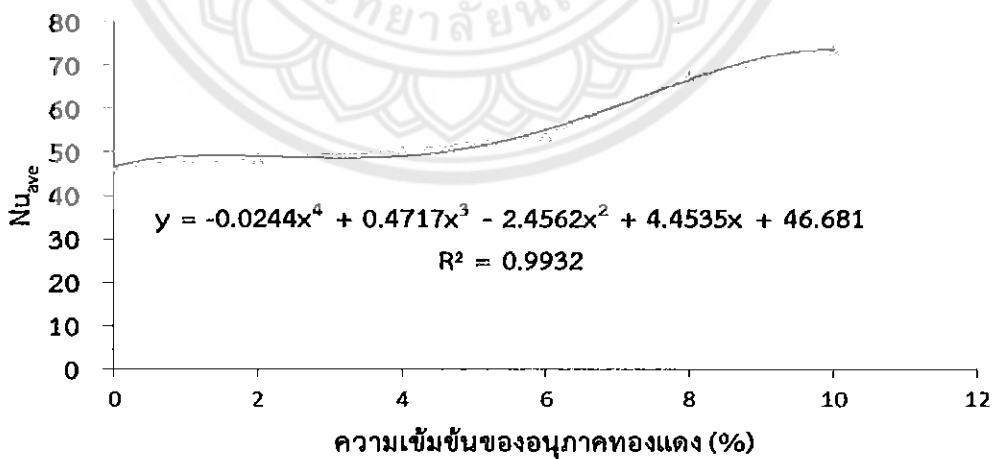




(a) พื้นผิวเรียบ



(b) พื้นผิวเว้า



(c) พื้นผิวรูพรุน

รูปที่ 5.9 การแสดงความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ( $\phi$ )

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของเจ็ทแบบปั่นป่วนของของไหลนาโนที่มีอนุภาคทองแดงในน้ำที่สภาวะคงตัวลงบนพื้นผิวแบบต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ พื้นผิวเรียบ พื้นผิวนูน และพื้นผิวเว้า โดยอาศัยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณ โดยกำหนดให้โดเมนการคำนวณเป็นสองมิติสมมาตรตามแกน และรายงานผลในรูปของเลข Nusselt ที่จุดตกกระทบ ( $Nu_0$ ) และเลข Nusselt เฉลี่ย ( $Nu_{ave}$ ) พบว่า

1. เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของอนุภาคทองแดงที่ 0%, 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยปริมาตร พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นค่า  $Nu_0$  และ  $Nu_{ave}$  สูงขึ้นสำหรับทุกพื้นผิว เนื่องจากอนุภาคทองแดงไปเปลี่ยนสมบัติของของไหลทำงาน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความหนืดพลวัต และความหนาแน่นสูงขึ้น อีกทั้งให้ความจุความร้อนมีค่าลดลงในขณะเดียวกันค่าความจุความร้อนจะแปรผันตามอุณหภูมิ จึงส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น
2. เมื่อพิจารณาลักษณะของพื้นผิวดกกระทบทั้งสามรูปแบบ พบว่าพื้นผิวนูนให้ค่า  $Nu_0$  และ  $Nu_{ave}$  สูงที่สุด และพื้นผิวเว้าให้ค่าต่ำสุด เนื่องจากหลังตกกระทบของไหลไหลลงจากส่วนโค้งของพื้นผิวนูนทำให้มีโมเมนตัมสูงกว่าผิวเรียบจึงให้การถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ในขณะที่พื้นผิวเว้าส่วนโค้งทำให้การถ่ายเทโมเมนตัมการไหลลดลงจากของไหลพยายามขึ้นจากผิวเว้าและของไหลตกกระทบลงบนของไหลที่ค้างอยู่ในผิวเว้าทำให้ของไหลเหลือโมเมนตัมน้อยลงในการถ่ายเทให้กับพื้นผิวจึงให้การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับผิวดกกระทบแบบนูนและเรียบ
3. เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ในรูปของเลขยกกำลังได้ดังนี้

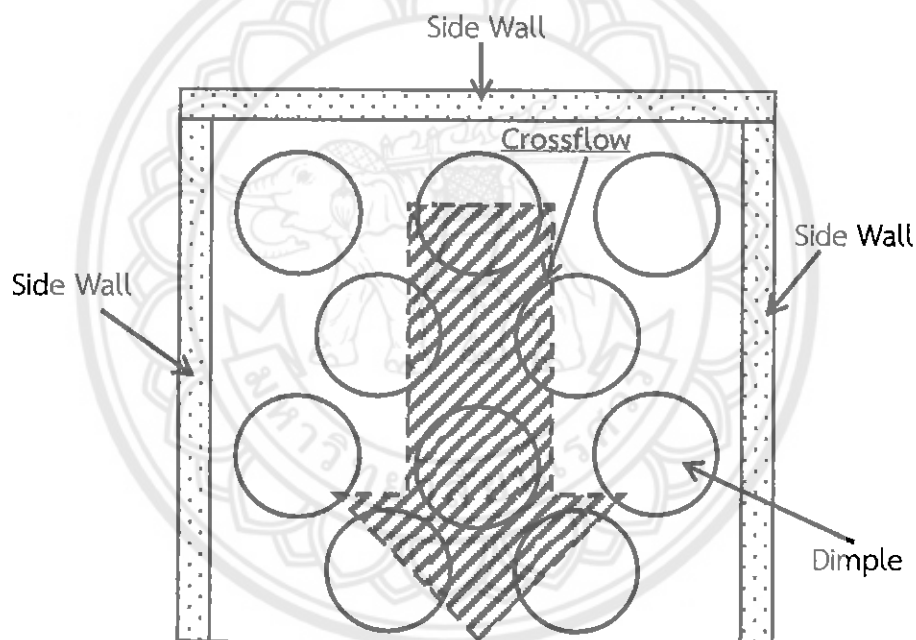
$$\text{ผิวเรียบ : } Nu_{ave} = 58.2474\phi^{0.08} ; R^2=0.9659$$

$$\text{ผิวเว้า : } Nu_{ave} = 48.8131\phi^{0.0945} ; R^2=0.944$$

$$\text{ผิวนูน : } Nu_{ave} = 124.0891\phi^{0.25776} ; R^2=0.7953$$

### ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาพื้นผิวตกระทอบแบบเว้าให้การถ่ายเทความร้อนต่ำที่สุด แต่เราอาจทำให้มีการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นได้โดยใช้รอยเว้ามากกว่าหนึ่งร่วมกับ Jet Array โดยอาศัยการไหลแบบ Crossflow หรือ Channel Flow ร่วมด้วย ซึ่ง Crossflow เกิดภายหลังที่เจ็ทตกระทอบกลายเป็นเจ็ทผนังและสามารถเพิ่มระดับของ Crossflow ได้ด้วยการใส่ผนังด้านข้างเพื่อบังคับให้เจ็ทผนังเคลื่อนที่เป็น Channel Flow ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ก็จะช่วย Shed Vortex จากรอยเว้าได้รวดเร็วขึ้น รวมไปถึงการเพิ่มโมเมนตัมให้กับ Vortex ทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าใช้ผิวเว้าแบบเดียว อีกทั้งพื้นผิวเว้าให้น้ำหนักที่เบากว่าพื้นผิวเรียบจากการนำเนื้อวัสดุออก ดังนั้นที่เครื่องจักรความเร็วรอบสูง ๆ ทำให้เกิดความดันลดลงและความเค้นทางความร้อนลดลง



รูปที่ 6.1 ลักษณะการไหลแบบ Crossflow เมื่อมองจากด้านบน

2. จากน้ำหนักของวัสดุที่มากขึ้นในส่วนของพื้นผิวนูนและผลกระทบของความโค้ง อาจปรับปรุงลักษณะพื้นผิวจากการนำผิวนูนสลับกับผิวเว้าโดยจะให้น้ำหนักเท่ากับพื้นผิวตกระทอบแบบเรียบซึ่งอาจจะให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าพื้นผิวเรียบ และเป็นการลดความดันลดและความเค้นทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นอาจมีการซ่อมบำรุงตามมาซึ่งเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีน้ำหนักมาก

## อ้างอิง

- [1] K. Kanokjaruvijit, R.F. Martinez-Botas, Heat transfer correlations of perpendicularly impinging jets on a hemispherical-dimpled surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010) 3045–3056
- [2] Dae Hee Lee, Young Suk Chung, Moo Geun Kim, Turbulent heat transfer from a convex hemispherical surface to a round impinging jet, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42 (1999) 1147-1156
- [3] P. Tie, Q. Li, Y. Xuan, Heat transfer performance of Cu–water nanofluids in the jet arrays impingement cooling system, *Int. J. Thermal Sciences* 77 (2014) 199–205
- [4] O. Manca, P. Mesolella, S. Nardini, D. Ricci, Numerical study of a confined slot impinging jet with nanofluids, *Nanoscale Research Letters* 2011 6:188.
- [5] O. Zeitoun and M. Ali, Nanofluid impingement jet heat transfer, *Nanoscale Research Letters* 2012 7:139
- [6] P. Naphon, and S. Wongwises, Experimental Study of Jet Nanofluids Impingement System for Cooling Computer Processing Unit, *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 2011, 1, 38-44
- [7] E. Ersayın and F. Selimefendigil, Numerical investigation of imping jet with nanofluids on a moving plate, *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 18, No. 3, pp. 428-437, 2013
- [8] K. Kanokjaruvijit, C. Thawongamyingsakul, S.Wongwises, Numerical investigation of an axi-symmetric laminar jet impinging on a dimpled surface under uniform heat flux using a finite element method, *Journal of Mechanical Science and Technology* 24 (9) (2010) 1809–1818
- [9] วิเศษ ศักดิ์ศิริ. วิธีสร้างตาข่ายรูปสามเหลี่ยมบนโครงสร้างสองมิติสำหรับแบบวิธีไฟไนต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [10] M.J.Fagan, *Finite element analysis: theory and practice* Prentice Hall, New Jersey, (1992)
- [11] Jun-Bo Huang, Jiin-Yuh Jang, Numerical study of a confined axisymmetric jet impingement heat transfer with nanofluids, Published online January, 2013, 5, 69-74

- [12] Q. Li, Y. Xuan, F. Yu, Experimental investigation of submerged single jet impingement using Cu-water nanofluid, *Applied Thermal Engineering* 36 (2012) 426-433
- [13] C. Cornaro, A.S. Fleischer, R.J. Goldstein, Flow visualization of a round jet impinging on cylindrical surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science* 20 (1999) 66-78





ภาคผนวก ก  
ตารางบันทึกผลการทดลอง

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ตารางที่ ก.1 เลข Nusselt ที่จุดตกกระทบ

| ความเข้มข้นของ<br>ทองแดง (%) | เลข Nusselt ที่จุดตกกระทบ ( $Nu_0$ ) |             |            |
|------------------------------|--------------------------------------|-------------|------------|
|                              | พื้นผิวเรียบ                         | พื้นผิวเว้า | พื้นผิวนูน |
| 0                            | 85.60                                | 51.00       | 106.82     |
| 2                            | 88.57                                | 52.65       | 116.49     |
| 4                            | 91.39                                | 54.11       | 120.54     |
| 6                            | 94.13                                | 56.00       | 128.58     |
| 8                            | 96.49                                | 58.02       | 158.65     |
| 10                           | 98.58                                | 60.52       | 171.38     |

ตารางที่ ก.2 เลข Nusselt เฉลี่ย

| ความเข้มข้นของ<br>ทองแดง (%) | เลข Nusselt เฉลี่ย ( $Nu_{ave}$ ) |             |            |
|------------------------------|-----------------------------------|-------------|------------|
|                              | พื้นผิวเรียบ                      | พื้นผิวเว้า | พื้นผิวนูน |
| 0                            | 41.48                             | 32.96       | 46.81      |
| 2                            | 42.96                             | 34.18       | 48.51      |
| 4                            | 44.53                             | 35.46       | 50.43      |
| 6                            | 46.12                             | 36.92       | 54.00      |
| 8                            | 47.59                             | 38.44       | 67.43      |
| 10                           | 48.94                             | 39.91       | 73.42      |

ตารางที่ ก.3 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเลข Nusselt ที่จุดตกกระทบของพื้นผิวเว้ากับพื้นผิวเรียบ และของพื้นผิวนูนกับพื้นผิวเรียบ

| ความเข้มข้นของ<br>ทองแดง (%) | % ความแตกต่างของ $Nu_0$  |                         |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------|
|                              | พื้นผิวเว้า-พื้นผิวเรียบ | พื้นผิวนูน-พื้นผิวเรียบ |
| 0                            | -40.42                   | 24.79                   |
| 2                            | -40.55                   | 31.53                   |
| 4                            | -40.79                   | 31.91                   |
| 6                            | -40.51                   | 36.59                   |
| 8                            | -39.87                   | 64.42                   |
| 10                           | -38.60                   | 73.85                   |

$$\text{หมายเหตุ \% ความแตกต่างของ } Nu_0 = \frac{Nu_0|_{\text{พื้นผิวเว้าหรือพื้นผิวนูน}} - Nu_0|_{\text{พื้นผิวเรียบ}}}{Nu_0|_{\text{พื้นผิวเรียบ}}} \times 100$$



ตารางที่ ก.4 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเลข Nusselt ระหว่างของพื้นผิวเว้ากับพื้นผิวเรียบและระหว่างของพื้นผิวนูนกับพื้นผิวเรียบ

| ความเข้มข้นของ<br>ทองแดง (%) | % ความแตกต่างของ $Nu_{ave}$ |                         |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
|                              | พื้นผิวเว้า-พื้นผิวเรียบ    | พื้นผิวนูน-พื้นผิวเรียบ |
| 0                            | -20.53                      | 12.86                   |
| 2                            | -20.44                      | 12.91                   |
| 4                            | -20.37                      | 13.24                   |
| 6                            | -19.94                      | 17.07                   |
| 8                            | -19.23                      | 41.69                   |
| 10                           | -18.44                      | 50.02                   |

หมายเหตุ % ความแตกต่างของ  $Nu_{ave} = \frac{Nu_{ave}|_{\text{พื้นผิวเว้าหรือพื้นผิวนูน}} - Nu_{ave}|_{\text{พื้นผิวเรียบ}}}{Nu_{ave}|_{\text{พื้นผิวเรียบ}}} \times 100$

ตารางที่ ก.5 การเปรียบเทียบ  $Nu_0$  ของของไหลนาโนกับของของไหลฐาน (น้ำ)

| ความเข้มข้นของ<br>ทองแดง (%) | % ความแตกต่างของ $Nu_0$ |             |            |
|------------------------------|-------------------------|-------------|------------|
|                              | พื้นผิวเรียบ            | พื้นผิวเว้า | พื้นผิวนูน |
| 2                            | 3.46                    | 3.24        | 9.05       |
| 4                            | 6.76                    | 6.11        | 12.85      |
| 6                            | 9.97                    | 9.80        | 20.37      |
| 8                            | 12.73                   | 13.77       | 48.52      |
| 10                           | 15.16                   | 18.67       | 60.44      |

หมายเหตุ % ความแตกต่างของ  $Nu_0 = \frac{Nu_0|_{\text{ความเข้มข้นต่างๆ}} - Nu_0|_{\text{น้ำ}}}{Nu_0|_{\text{น้ำ}}} \times 100$

ตารางที่ ก.6 การเปรียบเทียบ  $Nu_{ave}$  ของของไหลนาโนกับของไหลฐาน (น้ำ)

| ความเข้มข้นของ<br>ทองแดง (%) | % ความแตกต่างของ $Nu_{ave}$ |             |            |
|------------------------------|-----------------------------|-------------|------------|
|                              | พื้นผิวเรียบ                | พื้นผิวเว้า | พื้นผิวนูน |
| 2                            | 3.58                        | 3.70        | 3.63       |
| 4                            | 7.37                        | 7.58        | 7.73       |
| 6                            | 11.20                       | 12.02       | 15.35      |
| 8                            | 14.73                       | 16.61       | 44.04      |
| 10                           | 17.99                       | 21.09       | 56.84      |

หมายเหตุ % ความแตกต่างของ  $Nu_{ave} = \frac{Nu_{ave}|_{ความเข้มข้นต่างๆ} - Nu_{ave}|_{น้ำ}}{Nu_{ave}|_{น้ำ}} \times 100$



## ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ - สกุล นางสาวธัญญารัตน์ พลสี  
 วัน เดือน ปี เกิด 1 ตุลาคม พ.ศ. 2536  
 ที่อยู่ปัจจุบัน 153 หมู่ที่ 5 ตำบลนาเสี้ยว อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ 36000  
 ประวัติการศึกษา  
 2558 วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยนเรศวร  
 2554 มัธยมศึกษา โรงเรียนสตรีศึกษา

ชื่อ - สกุล นางสาวรัชรี พรประทุม  
 วัน เดือน ปี เกิด 2 เมษายน พ.ศ. 2537  
 ที่อยู่ปัจจุบัน 39/3 หมู่ที่ 8 ตำบลบ้านกาศ อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน 58110  
 ประวัติการศึกษา  
 2558 วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยนเรศวร  
 2554 มัธยมศึกษา โรงเรียนแม่สะเรียง(บริพัตรศึกษา)

ชื่อ - สกุล นางสาวหทัยรัตน์ กันทะอินทร์  
 วัน เดือน ปี เกิด 4 ธันวาคม พ.ศ. 2536  
 ที่อยู่ปัจจุบัน 9 หมู่ที่ 1 ตำบลบวกค้าง อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ 50130  
 ประวัติการศึกษา  
 2558 วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยนเรศวร  
 2554 มัธยมศึกษา โรงเรียนนวมินทราชูทิศ พายัพ