



การหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนของการกระทบของ  
เจ็ทของของไหลนาโน

Correlations of Heat Transfer of Jet Impingement of Nanofluid

นางสาวกมลทิพย์ ท้วมจั่น

นายสาวเตชินี รัตยแสงศรี

นายสาวพิมพ์วิภา ศรีรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2562



## ใบรับรองโครงการ

ชื่อหัวข้อโครงการ	การหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของเจ็ทของของไหลนาโน	
	Correlations of Heat Transfer of Jet Impingement of Nanofluid	
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวกมลทิพย์ ท้วมจัน	รหัสนิสิต 59360075
	นางสาวเดชิตี รัตน์แสงศรี	รหัสนิสิต 59361768
	นางสาวพิมพ์วิภา ศรีรัตน์	รหัสนิสิต 59363809
ที่ปรึกษาโครงการ	รศ.ดร.กฤษยา กนกजारูจิตร	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	
ปีการศึกษา	2562	

.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(รศ.ดร.กฤษยา กนกजारูจิตร)

.....กรรมการ

(รศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)

.....กรรมการ

(ดร. ปองพันธ์ โอทกานนท์)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนของการกระทบของเจ็ทของของไหลนาโน	
	Correlations of Heat Transfer of Jet Impingement of Nanofluid	
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นางสาวกมลทิพย์ ท่วมจั่น	รหัสนิสิต 59360075
	นางสาวเตชฉิณี รัตน์แสงศรี	รหัสนิสิต 59361768
	นางสาวพิมพ์วิภา ศรีรัตน์	รหัสนิสิต 59363809
ที่ปรึกษาโครงการงาน	รศ.ดร.กฤษยา กนกจรรย์จิตร	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	
ปีการศึกษา	2562	

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทของของไหลนาโนแบบสองมิติสมมาตรตามแกนของการไหลแบบปั่นป่วนที่สภาวะคงที่ด้วยแบบจำลอง  $k-\epsilon$  โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ในน้ำที่ความเข้มข้น ( $\phi$ ) 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร ออกจากหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D_j = 4$  mm ที่มีเลข Reynolds ( $Re_{D_j}$ ) เท่ากับ 2,000, 4,000, 6,000 และ 8,000 ลงบนพื้นผิวตกกระทบที่มีลักษณะเป็นพื้นผิวเรียบซึ่งมีการติดตั้งฟลักซ์ความร้อน  $500 \text{ kW/m}^2$  ตลอดความยาวของพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูนซึ่งมีขนาดเท่าชิปคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดให้ในช่วงอัตราส่วนระหว่างระยะในแนวรัศมีและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด  $r_s/D_j = 0$  ถึง 2.2875 มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่  $500 \text{ kW/m}^2$  และที่  $r_s/D_j > 2.2875$  จนถึงทางออกจะไม่มีฟลักซ์ความร้อนแต่กำหนดให้เป็นฉนวนแทน กำหนดอัตราส่วนของระยะระหว่างทางออกหัวฉีดและจุดตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด  $H/D_j = 2, 3$  และ 4 ผลของการถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปของเลข Nusselt พบว่าของไหลนาโน  $\text{TiO}_2$  ที่  $\phi = 6\% \text{ v/v}$  ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด โดยพบว่าจากการ trip ชั้นขอบเขตพื้นผิวนูนให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าพื้นผิวเรียบ เนื่องจากพื้นผิวนูนก่อให้เกิด Turbulence สูงกว่าพื้นผิวเรียบและเกิด Secondary flow ที่บริเวณขอบชิป นอกจากนี้ ยังพบว่า  $H/D_j = 2$  ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด เนื่องจากมีการสูญเสียโมเมนตัมให้แก่อากาศแวดล้อมที่อยู่เบื้องน้อยที่สุด สุดท้ายจะเป็นการ

แสดงความสัมพันธ์เชิงตัวเลขระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ย ( $Nu_{ave}$ ) กับ  $\phi$ ,  $Re_{Dj}$ ,  $H/D_j$  และเลข Prandtl ( $Pr = \nu / \alpha$ ) โดยอาศัย Regression Analysis พบว่า ความสัมพันธ์อยู่ในรูปของพหุนามเมื่อยกอันดับ 2 สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับ  $\phi$  และอยู่ในรูปยกกำลังสำหรับผลกระทบอื่นๆ



<b>Project Title</b>	Correlations of Heat Transfer of Jet Impingement of Nanofluid		
<b>Name</b>	Kamolthip	Tuamjan	ID. 59360075
	Taechinee	Rattanasangri	ID. 59361768
	Pimwipa	Srirat	ID. 59363809
<b>Project advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Koonlaya Kanokjaruvijit		
<b>Major</b>	Mechanical Engineering		
<b>Department</b>	Mechanical Engineering		
<b>Academic year</b>	2562		

---

### Abstract

This senior project 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 followed  $\kappa - \epsilon$  model. Nanoparticles made of titanium oxide ( $\text{TiO}_2$ ) in water were used at different concentrations ( $\phi$ ): 2%, 4% and 6% by volume with water as a baseline case. The nozzle diameter ( $D_j$ ) was 4 mm and Reynolds numbers based on jet diameter ( $\text{Re}_{D_j}$ ) were at 2,000, 4,000, 6,000 and 8,000 ejecting toward two types of impingement target plates: flat surface and a convex surface of the same size as a computer chip. The distance of  $r_s/D_j = 0$  to 2.2875 of the target plate was installed with a constant heat flux of  $500 \text{ kW/m}^2$ , and the distance from  $r_s/D_j > 2.2875$  to the outlet did not contain any heat flux, but was well insulated instead for convex surfaces. However, for the flat surface the entire surface was installed with the  $500 \text{ kW/m}^2$  constant heat flux. The jet-to-plate spacing ( $H/D_j$ ) was 2, 3 and 4. The nanofluid of  $\text{TiO}_2$  of  $\phi = 6\% \text{ v/v}$  led to the highest heat transfer augmentation. The heat transfer of the convex surface was more than that of the flat one, because the turbulence intensity of the convex surface was more than that of the flat one, because the boundary layer formed after impingement was trip-prd. In addition, the secondary flow was observed near the

vertical edge of the convex area. The jet-to-plat spacing ( $H/D_j$ ) = 2 led to the highest heat transfer augmentation, because it leads to the least loss of momentum to the ambient. Finally, the average Nusselt numbers were correlated with the nanofluid concentrations, Reynolds number, jet-to-plat spacing and Prandtl numbers

( $Pr = \nu / \alpha$ ).



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่านซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมด ด้านการให้คำแนะนำในการทำโครงการจาก รองศาสตราจารย์ ดร. กุลยา กนกจากรูจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการได้ให้ความรู้ คำแนะนำตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน เพื่อให้การเขียนโครงการนี้ออกมาสมบูรณ์ที่สุด คำปรึกษาแก่ผู้ดำเนินโครงการตลอดมา และให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม COMSOL ผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบ ท่านแรก รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ ท่านที่สอง ดร.ปองพันธ์ โอทกานนท์ ที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของรูปเล่มโครงการ

สุดท้ายนี้ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้ศึกษาเสมอมา ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้



คณะผู้จัดทำโครงการ

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงงาน	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 แผนการดำเนินโครงงาน	6
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์	8
2.1 ทฤษฎี	8
2.1.1 การกระแทกของเจ็ท (Impinging Jets)	8
2.1.2 ของไหลนาโน (Nanofluids)	10
2.1.3 สมการควบคุม (Governing Equations)	11
2.1.4 การถ่ายเทความร้อน	12
2.1.5 เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)	13
2.2 วรรณกรรมปริทัศน์	13
บทที่ 3 ขั้นตอนการคำนวณ	25
3.1 โดเมนการคำนวณ (Computational Domain) และขอบเขตของโจทย์	26



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 สมการสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน (Governing Equations)	29
3.3 การสร้างเมช	31
3.3.1 ขั้นตอนในการสร้างเมช	31
3.3.2 ผลกระทบของความหนาแน่นของเมชที่มีผลต่อคำตอบ	32
3.4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลจากงานวิจัยจากวรรณกรรม	36
บทที่ 4 ผลการคำนวณ	38
4.1 ผลกระทบของความเข้มข้น	38
4.1.1 กรณีพื้นผิวตกกระทบเป็นผิวเรียบ	40
4.1.2 กรณีพื้นผิวตกกระทบเป็นผิวขรุขระ	46
4.2 ผลกระทบของอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบ กับเส้นผ่านศูนย์กลาง	56
4.2.1 กรณีพื้นผิวตกกระทบเป็นแบบผิวเรียบ	56
4.2.2 กรณีพื้นผิวตกกระทบเป็นแบบผิวขรุขระ	58
4.3 การหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (Correlations)	59
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับความเข้มข้น	59
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีด ถึงพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง	61
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับเลข Reynolds	63
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับเลข Prandtl	65
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	68
เอกสารอ้างอิง	70

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	6
ตารางที่ 2.1 สรุปสหสัมพันธ์และพารามิเตอร์ต่างๆที่บทความทำการศึกษา	15
ตารางที่ 3.1 การคำนวณที่มาของฟังก์ชันความร้อนของพื้นผิวดกกระทบ	27
ตารางที่ 3.2 สมบัติเชิงความร้อนของอนุภาคนาโน	28
ตารางที่ 3.3 สมบัติของของไหลนาโน	28
ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบเมื่อความหนาแน่นของเมฆ ในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไป ที่เลข Reynolds เท่ากับ 2,000	34
ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบเมื่อความหนาแน่นของเมฆ ในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไป ที่เลข Reynolds เท่ากับ 4,000	34
ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบเมื่อความหนาแน่นของเมฆ ในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไป ที่เลข Reynolds เท่ากับ 6,000	35
ตารางที่ 3.7 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบเมื่อความหนาแน่นของเมฆ ในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไป ที่เลข Reynolds เท่ากับ 8,000	35
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่า Nu เฉลี่ยของของไหลนาโนกับน้ำกรณิพื้นผิวเรียบ	46
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า Nu เฉลี่ยของของไหลนาโนกับน้ำกรณิพื้นผิวนูน	48
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ย ( $Nu_{ave}$ ) กับความเข้มข้น, เลข Reynolds อัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวดกกระทบ กับเส้นผ่านศูนย์กลางและเลข Prandtl	67
ตารางที่ 5.1 สรุปความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ย ( $Nu_{ave}$ ) กับ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ( $\phi$ ), เลข Reynolds (Re), อัตราส่วนระยะห่างระหว่าง หัวฉีดถึงพื้นผิวดกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $H/D_j$ ) และเลข Prandtl (Pr)	69

## สารบัญรูป

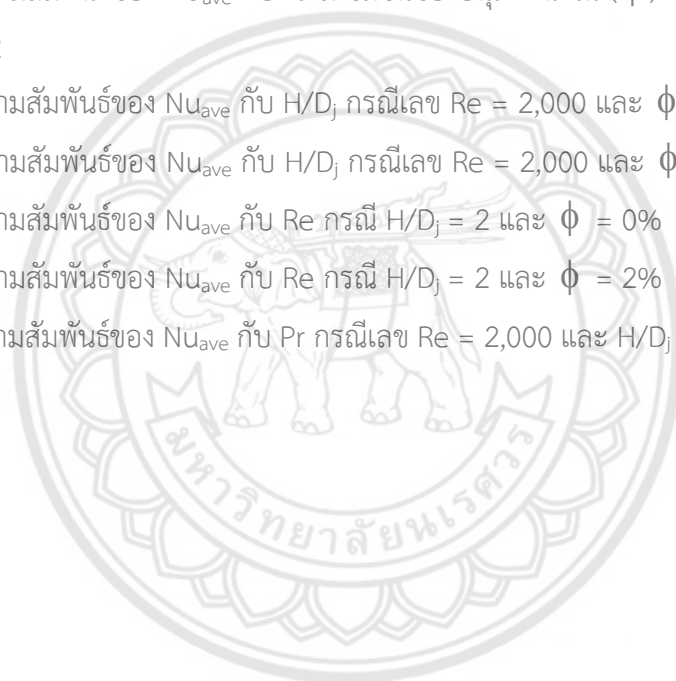
	หน้า
รูปที่ 1.1 การถ่ายเทความร้อนจากชิปโดยการไหลของน้ำผ่านท่อ	1
รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทของของไหลนาโนลงบนชิปคอมพิวเตอร์	4
รูปที่ 1.3 โดเมนการคำนวณและการกำหนดสภาวะขอบเขตของการคำนวณ	5
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของการตกกระทบของเจ็ทบนพื้นผิวเรียบ	9
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการคำนวณโจทย์การถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทที่มีของไหลนาโนเป็นของไหลทำงานโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	25
รูปที่ 3.2 โดเมนการคำนวณและการกำหนดสภาวะขอบเขตของการคำนวณสำหรับผิวเรียบ	26
รูปที่ 3.3 node ในสามเหลี่ยมไร้ระเบียบ	32
รูปที่ 3.4 การสร้างเมชที่ความหนาแน่นบริเวณผิวที่ตกกระทบที่ต่างกัน	33
รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเลข Nusselt ของการถ่ายเทความร้อนจากการตกกระทบของเจ็ทของน้ำลงบนพื้นผิวเรียบจากการคำนวณและผลการทดลอง [7]	36
รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเลข Nusselt ของการถ่ายเทความร้อนจากการตกกระทบของเจ็ทของน้ำลงบนพื้นผิวเรียบจากการคำนวณและผลการทดลอง [4]	37
รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงความร้อนของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ	39
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกกระทบแบบเรียบที่เลข Reynolds เท่ากับ 2,000	41
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกกระทบแบบเรียบที่เลข Reynolds เท่ากับ 4,000	42
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกกระทบแบบเรียบที่เลข Reynolds เท่ากับ 6,000	43
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกกระทบแบบเรียบที่เลข Reynolds เท่ากับ 8,000	44

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของ $Nu_{ave}$ กับเลข Reynolds ที่อัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีด และพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $H/D_j$ ) ต่างๆ กรณีพื้นผิวเรียบ	45
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกกระทบแบบนูนที่เลข Reynolds เท่ากับ 2,000	49
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกกระทบแบบนูนที่เลข Reynolds เท่ากับ 4,000	50
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกกระทบแบบนูนที่เลข Reynolds เท่ากับ 6,000	51
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกกระทบแบบนูนที่เลข Reynolds เท่ากับ 8,000	52
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของ $Nu_{ave}$ กับเลข Reynolds ที่อัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีด และพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $H/D_j$ ) ต่างๆ กรณีพื้นผิวนูน	53
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับพื้นผิวเรียบ และพื้นผิวนูนของของไหลฐานที่ $H/D_j = 4$ กรณี $Re = 8,000$	54
รูปที่ 4.13 การแสดงการไหลในรูปของ Vector plot ของพื้นผิวเรียบที่ $H/D_j = 4$ กรณี $Re = 8,000$	54
รูปที่ 4.14 การแสดงการไหลในรูปของ Vector plot ของพื้นผิวนูนที่ $H/D_j = 4$ กรณี $Re = 8,000$	55
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบ Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 2, 3 และ 4 บนผิวตกกระทบแบบเรียบที่เลข Reynolds เท่ากับ 8,000	57
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบ Nusselt เฉลี่ย (Average Nusselt Number) กับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 2, 3 และ 4 บนผิวตกกระทบแบบเรียบ	57

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบ Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 2, 3 และ 4 บนผิวตกกระทบแบบนูนที่เลข Reynolds เท่ากับ 8,000	58
รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบ Nusselt เฉลี่ย (Average Nusselt Number) กับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 2, 3 และ 4 บนผิวตกกระทบแบบนูน	59
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของ $Nu_{ave}$ กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ( $\phi$ ) กรณี $Re = 2,000$ และ $H/D_j = 2$	60
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของ $Nu_{ave}$ กับ $H/D_j$ กรณีเลข $Re = 2,000$ และ $\phi = 0\%$	61
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของ $Nu_{ave}$ กับ $H/D_j$ กรณีเลข $Re = 2,000$ และ $\phi = 2\%$	62
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของ $Nu_{ave}$ กับ $Re$ กรณี $H/D_j = 2$ และ $\phi = 0\%$	63
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของ $Nu_{ave}$ กับ $Re$ กรณี $H/D_j = 2$ และ $\phi = 2\%$	64
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของ $Nu_{ave}$ กับ $Pr$ กรณีเลข $Re = 2,000$ และ $H/D_j = 2$	65

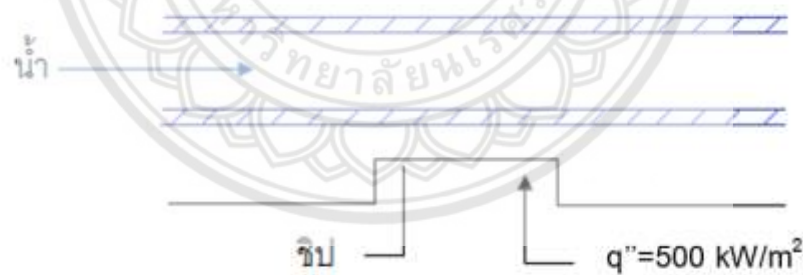


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

การระบายความร้อนมีความสำคัญต่อการทำงานของชิปคอมพิวเตอร์ กล่าวคือ การเพิ่มความเร็วในการทำงานของคอมพิวเตอร์และการลดขนาดของคอมพิวเตอร์ทำให้เกิดความสูญเสียความร้อนปริมาณมาก เนื่องจากฟลักซ์ความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดจุดร้อน (Hot Spot) บนชิป โดยวิธีทั่วไปวิธีการถ่ายเทความร้อนกระทำโดยการใช้ท่อที่มีน้ำไหลผ่านท่อที่ติดตั้งอยู่เหนือชิปเพื่อดูดซับความร้อนจากชิป ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งไม่เพียงพอในการระบายความร้อนเมื่อระบบทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานาน จึงมีการออกแบบทางเลือกในการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น เพื่อให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายน้อยที่สุด และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นการออกแบบระบบระบายความร้อนในอุปกรณ์ต่างๆ จึงมีความสำคัญต่อการผลิต



รูปที่ 1.1 การถ่ายเทความร้อนจากชิปโดยการไหลของน้ำผ่านท่อ

การตกกระทบของเจ็ทลงบนพื้นผิวตกกระทบเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง โดยอาศัยหลักการถ่ายเทโมเมนตัม และเพิ่มความปั่นป่วนของของไหลทำงาน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น ปัจจุบันได้มีงานวิจัย [1-10] ที่ปรับปรุงประสิทธิภาพการตกกระทบของเจ็ทด้วยการใช้ของไหลนาโนแทนน้ำ ซึ่งเป็นการใส่อนุภาคสารประกอบของโลหะขนาดระดับนาโนเมตร เช่น  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cu}$  และ  $\text{SiO}_2$  ลงไปในของไหลฐาน

ซึ่งได้แก่น้ำ โดยอนุภาคนาโนสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนจะส่งผลกับพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และเลข Prandtl มีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความร้อนจำเพาะมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้นมากเกินไปจะส่งผลให้ความหนืดของของไหลสูงขึ้นและทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของของไหลนาโน เช่น เลข Reynolds อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดกับแผ่นตกกระทบและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด และความเข้มข้นของของไหลนาโน เป็นต้น ดังนั้น ในโครงการนี้เราจะทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของชิปคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยการตกกระทบของเจ็ทของของไหลนาโนอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ที่สภาวะต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาเปรียบเทียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทของของไหลนาโน 2 มิติแบบสมมาตรตามแกนโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน
2. ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ในน้ำ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทในรูปของสหสัมพันธ์
3. สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างเลข Nusselt และเลขไร์หน่วยต่างๆ

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นทางเลือกในการออกแบบระบบระบายความร้อน และเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของชิปใน CPU ของคอมพิวเตอร์

## 1.4 ขอบเขตของโครงการ

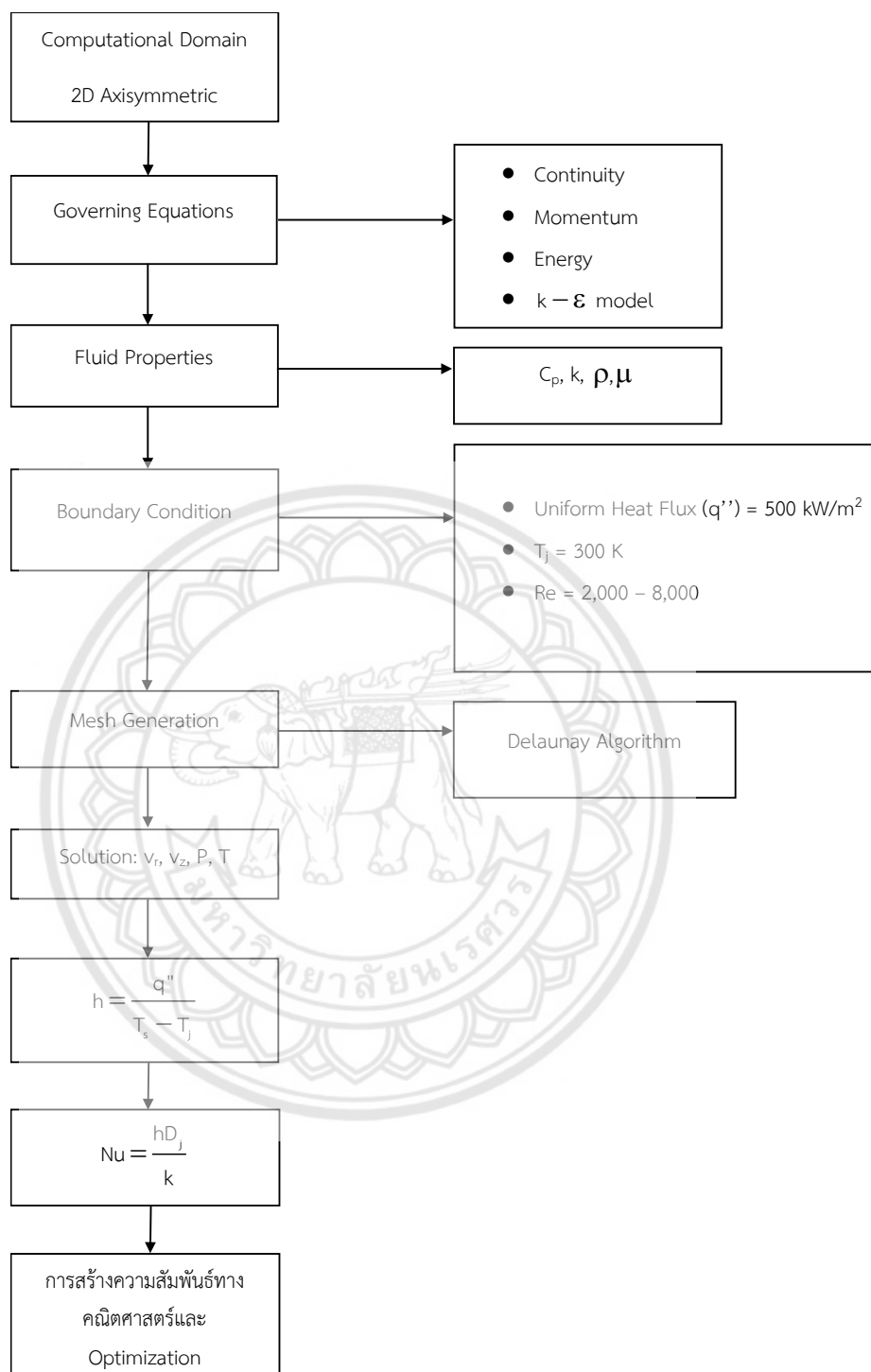
1. โดเมนการคำนวณเป็นสองมิติแบบสมมาตรตามแกน (2D Axi-symmetric)
2. กำหนดให้หัวฉีดหน้าตัดกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm
3. สภาวะคงที่ (Steady State)
4. ของไหลเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) และสมบัติของของไหลคงที่

5. การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนตามแบบจำลอง  $k - \epsilon$
6. ลักษณะพื้นผิวตกรกระทบเป็นแบบผิวหูน ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับชิปใน CPU ของคอมพิวเตอร์
7. ฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Uniform Heat Flux) ที่  $500 \text{ kW/m}^2$  ที่เฉพาะบริเวณพื้นผิวหูนของพื้นผิวตกรกระทบนอกนั้นกำหนดให้มีการหุ้มฉนวนอย่างดี กำหนดให้ชิปใน CPU มีรัศมี  $9.15 \text{ mm}$  และสูง  $1.5 \text{ mm}$
8. ใช้อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นอนุภาคนาโนโดยใช้น้ำเป็นของไหลฐาน (Base Fluid) และพิจารณาให้ของไหลนาโนเป็นเฟสเดียวเนื่องจากอนุภาค  $\text{TiO}_2$  มีขนาดในระดับนาโน
9. เลข Nominal Reynolds อยู่ในช่วง 2,000 ถึง 8,000
10. อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกรกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $H/D_j$ ) อยู่ในช่วง 2 ถึง 4
11. พื้นผิวไม่ลื่นไถล (No-Slip Condition)

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

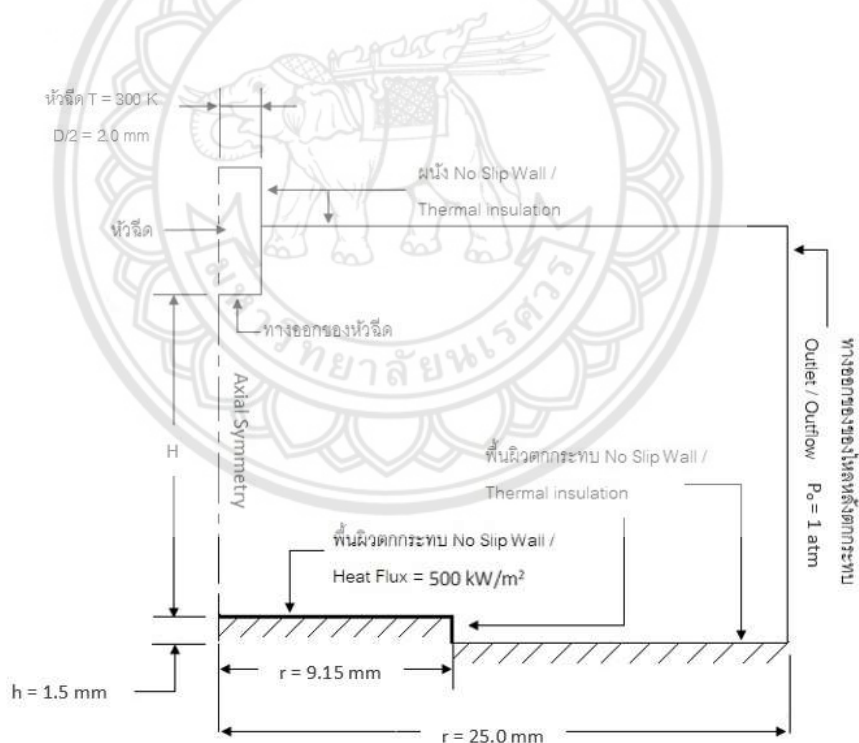
รูปที่ 1.2 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการนี้โดยเริ่มจากการสร้างโดเมนการคำนวณซึ่งในที่นี้ทำการพิจารณาเป็น 2 มิติสมมาตรตามแกน โดเมนที่ทำการศึกษาแสดงในรูปที่ 1.3 พื้นผิวหูนที่มีขนาดใกล้เคียงกับชิปใน CPU ผลของการถ่ายเทความร้อนของการตกรกระทบของของไหลนาโนลงบนพื้นผิวสามารถจำลองโดยอาศัยสมการความต่อเนื่อง (Continuity) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน โดยกำหนดให้การไหลเป็นแบบปั่นป่วนตามแบบจำลองความปั่นป่วน  $k - \epsilon$  โดยจะกล่าวถึงในรายละเอียดในบทที่ 2 สำหรับสถานะขอบเขตในที่นี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีของการไหล และกรณีของการถ่ายเทความร้อน แสดงดังรูปที่ 1.3 ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในย่อหน้าถัดไป จากนั้นทำการสร้างเมช (Mesh) ด้วย Delaunay Algorithm และใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณเพื่อให้ได้คำตอบในรูปของความเร็ว และอุณหภูมิจากนั้นใช้ Newton's Law of Cooling เพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน สุดท้ายจะแสดงผลของการถ่ายเทความร้อนให้อยู่ในรูปของเลข Nusselt





รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทของของไหลนาโนลงบน  
ชิปคอมพิวเตอร์

รูปที่ 1.3 แสดงโดเมนการคำนวณและการกำหนดสภาวะขอบเขตของการคำนวณสำหรับ โจทย์การตกกระทบบของเจ็ทแบบสองมิติสมมาตรตามแกน (2D Axi-symmetric) โดยมีเส้นผ่าน ศูนย์กลางหัวฉีดขนาด ( $D_j$ ) 4 mm ผนังที่อยู่ติดกับหัวฉีดให้เป็นผนังเรียบไม่มีการลื่นไถล (No Slip) พื้นผิวด้านล่างเป็นพื้นผิวดกกระทบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D_s$ ) 50 mm โดยกำหนดให้ไม่มีการลื่น ไถลเช่นกัน และที่ทางออกกำหนดให้ของไหลหลังตกกระทบบไหลออกสู่อากาศที่สภาวะแวดล้อมที่ ความดันบรรยากาศ โดยใช้ของไหลนาโนอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์เป็นของไหลทำงาน ระยะห่าง ระหว่างทางออกจากหัวฉีดและจุดตกกระทบบ ( $H$ ) ได้แก่ 8, 12 และ 16 mm สำหรับพื้นผิวนูน กำหนดให้บริเวณผิวนูนมีรัศมีเท่ากับ 9.15 mm และความสูงเท่ากับ 1.5 mm ตามขนาดของชิปใน CPU จากการกำหนดสภาวะขอบเขตดังรูปที่ 1.3 โจทย์ของการไหลเป็นหนึ่งในหัวฉีด กำหนดให้ Reynolds number ของหัวฉีดมีค่าอยู่ในช่วง 2,000 ถึง 8,000 และกรณีโจทย์ของการถ่ายเทความร้อนทางเข้าของหัวฉีด กำหนดอุณหภูมิ ( $T_j$ ) คงที่ ที่ 300 K พื้นผิวดกกระทบบของชิปมีฟลักซ์ความร้อน คงที่เท่ากับ  $500 \text{ kW/m}^2$



รูปที่ 1.3 โดเมนการคำนวณและการกำหนดสภาวะขอบเขตของการคำนวณ



## 1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

1.7.1 จัดทำรูปเล่ม	1,000 บาท
1.7.2 กระดาษ	1,000 บาท
1.7.3 ค่าอุปกรณ์อื่นๆ	1,000 บาท



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 ทฤษฎี

##### 2.1.1 การกระแทกของเจ็ท (Impinging Jets)

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของของไหลด้วยการกระแทกของเจ็ทบนพื้นผิวราบเรียบ โดยการกระแทกของเจ็ทสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่

1. บริเวณเจ็ทอิสระ (Free Jet Zone) เป็นบริเวณที่เจ็ทไหลออกจากหัวฉีดโดยที่แกนกลางของเจ็ทมีความเร็วสูงสุด และความเร็วของเจ็ทจะลดลงอย่างต่อเนื่องในแนวแกนรัศมีของหน้าตัดเจ็ท โดยบริเวณเจ็ทอิสระสามารถแบ่งออกได้อีก 3 บริเวณ ดังนี้

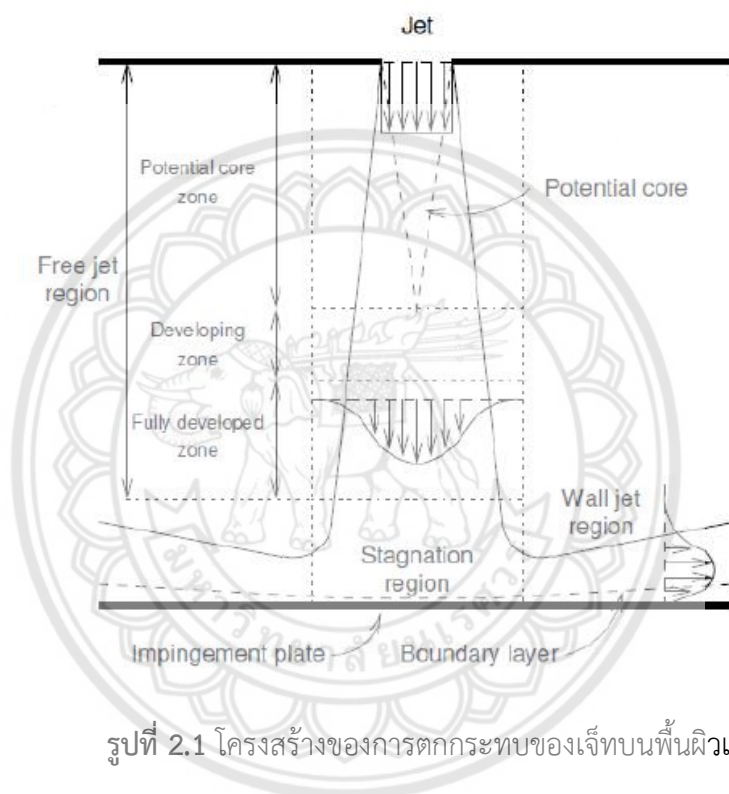
a. Potential Core Zone เป็นบริเวณที่เจ็ทเริ่มออกจากหัวฉีด โดยมีความเร็วของเจ็ทคงที่เกือบเท่ากับความเร็วที่ทางออกของหัวฉีด บริเวณนี้ไม่มีผลของความหนืด เมื่อออกนอกสามเหลี่ยมของแกนศกียจะเริ่มมีอิทธิพลของความหนืดอันเนื่องมาจากผลต่างของความเร็วระหว่างเจ็ทและ Ambient ที่อยู่นิ่ง ทำให้หน้าตัดของเจ็ทขยายกว้างขึ้นตามระยะที่ห่างจากทางออกหัวฉีด เรียกบริเวณรอบนอก Potential Core นี้ว่า Shear Layer เมื่อยิ่งห่างจากทางออกหัวฉีด ความหนาของ Shear Layer เพิ่มขึ้นและ Potential Core จะลดลง

b. Developing Zone เป็นช่วงที่ Potential Core หดไป และเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วภายในเจ็ท โดยความเร็วภายในเจ็ทจะค่อยๆ ลดลงและมีการขยายหน้าตัดเจ็ทในแนวแกนรัศมีจากการถ่ายเทโมเมนตัมไปสู่ Ambient ทำให้ Turbulent Intensity ที่ Centerline จะมีค่าสูงขึ้นในช่วงนี้

c. Fully Developed Zone เป็นบริเวณต่อจาก Developing Zone ของเจ็ทที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ทอย่างสมบูรณ์แล้ว ในบริเวณนี้โมเมนตัมของเจ็ทจะยังลดลงเมื่อห่างออกมาจากหัวฉีดมากขึ้น

2. บริเวณตกกระทบ (Impingement Zone) เป็นบริเวณที่ความเร็วเจ็ทมีค่าลดลงและมีความเร็วเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งจุดตกกระทบ (Stagnation Point) หลังจากนั้นเจ็ทจะไหลบนพื้นผิวรอบจุดตกกระทบ ซึ่งจะเกิดความเร่งของการไหล เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของเจ็ทอย่างกะทันหันหลังจากการตกกระทบ

3. เจ็ทผนัง (Wall Jet) เป็นบริเวณที่เกิดการไหลบนพื้นผิวหลังเกิดการตกกระทบ บริเวณนี้ความเร็วของเจ็ทจะเริ่มลดลงและชั้นขอบเขตของการไหลบนผนังจะค่อยๆ หนาขึ้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของการตกกระทบของเจ็ทบนพื้นผิวเรียบ

โดยทั่วไปบริเวณที่ได้รับการกระทบของเจ็ทโดยตรงจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะที่จุดตกกระทบจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างทางออกหัวฉีดกับพื้นผิวตกกระทบ ( $H$ ) และโครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนตกกระทบ ในกรณีที่บริเวณปลายของ Potential Core ตกกระทบพื้นผิว จะได้ค่าของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดตกกระทบสูงที่สุดเมื่อเทียบกับระยะตกกระทบอื่นๆ เนื่องจากเจ็ทมีโมเมนตัมและมี Turbulent Intensity สูง แต่ถ้าระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดกับพื้นผิวมากขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดตกกระทบจะมีค่าลดลงตามระยะห่างระหว่างทางออกกับพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเมนตัมของเจ็ทที่ตกกระทบพื้นผิวลดลงจากการถ่ายเทโมเมนตัมให้แก่ Ambient ระหว่างการเดินทางของเจ็ท

### 2.1.2 ของไหลนาโน (Nanofluids)

ของไหลนาโน (Nanofluids) เป็นการใส่อนุภาคขนาดนาโนเมตร (Nanoparticles) ลงไปในของไหลฐาน (Base Fluid) โดยที่อนุภาคนาโนมักอยู่ในรูปของสารประกอบของโลหะ ซึ่งมีค่าการนำความร้อนสูง ดังนั้นของไหลที่มีอนุภาคนาโนผสมอยู่จึงน่าจะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าของไหลฐาน เราจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนโดยการเติมอนุภาคนาโนจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการนำความร้อนเพิ่มขึ้น และยังเป็น การเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลเพราะสมบัติในการฟุ้งกระจาย เนื่องจากในโครงการนี้เราจะใช้อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ในน้ำ สำหรับของไหลนาโน ดังนั้น เราจึงพิจารณาสมบัติเชิงความร้อนของของไหลนาโนของ  $\text{TiO}_2$  เท่านั้น โดยมีความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของของไหลนาโน ( $\rho_{nf}$ ) และความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน ( $c_{p,nf}$ ) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ( $\phi$ ) แสดงดังต่อไปนี้

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

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

เมื่อ ตัวห้อย nf แสดงสมบัติของของไหลนาโน (Nanofluid)

bf แสดงสมบัติของของไหลฐาน (Base fluid)

P แสดงสมบัติของอนุภาคนาโน (Particles)

นอกจากนี้ความหนืดพลวัตและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลนาโนหาได้จาก

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

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

### 2.1.3 สมการควบคุม (Governing Equations)

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

การอนุรักษ์มวล:

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

การอนุรักษ์โมเมนตัม:

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

การอนุรักษ์พลังงาน:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [\rho u_i (pE + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right] \quad (2.7)$$

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + c_{3\varepsilon} G_b) - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.9)$$

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

เมื่อ  $G_b$  คือ พลังงานจลน์เนื่องจากแรงลอยตัว

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

$\mu_t$  คือ ความหนืดแบบปั่นป่วน



โดยมีค่าคงที่ของรูปแบบจำลอง  $k - \epsilon$  ดังนี้ คือ  $C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_{\mu} = 0.09, \sigma_k = 1.0,$   
 $\sigma_{\epsilon} = 1.3$  และ  $C_{3\epsilon} = \tanh\left|\frac{U}{u}\right|$  เมื่อ  $U$  ความหนืดเชิงจลน์ และ  $u$  คือ ความเร็ว

#### 2.1.4 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนที่อุณหภูมิ ( $T_j$ ) ออกจากหัวฉีดมาตกระทบกับผิวกระทบที่มี ฟลักซ์ความร้อนคงที่ ( $q_s''$ ) เมื่อได้อุณหภูมิที่ผิวกระทบ ( $T_s$ ) จากการคำนวณในหัวข้อที่แล้ว เราจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h$ ) ได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

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

จากนั้นแสดงในรูปของตัวแปรไร้มิติ เลข Nusselt ดังนี้

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

เมื่อ  $q_s''$  คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวตกระทบ (Heat flux),  $W/m^2$  ในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $500 \text{ kW/m}^2$  สำหรับชิปคอมพิวเตอร์รุ่น [11-12] รุ่น Intel Core i7 920, 940 และ 965

$T_s$  คือ อุณหภูมิที่ผิวกระทบซึ่งเป็นปริมาณที่ได้จากการคำนวณ, K.

$T_j$  คือ อุณหภูมิที่ทางออกของหัวฉีด ในที่นี้กำหนดให้เป็นค่าคงที่ที่  $300 \text{ K}$

$k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล (Thermal conductivity),  $W/m-k$

### 2.1.5 เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)

สำหรับเจ็ทตกกระทบเลขเรย์โนลด์ ( $Re_{D_j}$ ) นิยามโดย

$$Re_{D_j} = \frac{\rho V_j D_j}{\mu} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล,  $kg/m^3$

$V_j$  คือ ความเร็วของของไหลที่ทางออกจากหัวฉีด,  $m/s$

$D_j$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด,  $m$

$\mu$  คือ ความหนืดพลวัตของของไหล,  $Pa-s$

## 2.2 วรรณกรรมปริทัศน์

ของไหลนาโน (Nanofluids) เป็นการใส่อนุภาคนาโน (Nanoparticles) ที่มีขนาดระดับนาโนเมตรในของไหลฐาน (Base Fluid) ซึ่งอนุภาคนาโนเป็นโลหะที่อยู่ในสถานะของแข็ง ในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหลสามารถทำได้โดยการเติมอนุภาคนาโน ซึ่งอนุภาคนาโนมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง ดังนั้นของเหลวที่มีอนุภาคนาโนผสมอยู่จึงมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าของไหลฐาน นอกจากนี้การเติมอนุภาคนาโนจะเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพราะมีสมบัติของการกระจายตัว กล่าวคือ ขนาดของอนุภาคนาโนเล็กจะช่วยให้การกระจายตัวดีขึ้น อนุภาคนาโนที่มีการใช้มากที่สุด ได้แก่ อลูมินาออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) [2-3], [5-6] ทองแดง (Cu) [5], [8] ซิลิคอนออกไซด์ ( $SiO_2$ ) [1], [4] คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) [5], [9] ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) [7] เงิน (Ag) [5] และไทเทเนียมออกไซด์ ( $TiO_2$ ) [5]

จากการศึกษาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทของของไหลนาโนลงบนพื้นผิวเรียบ (Flat Surface) ในรูปของเลข Nusselt พบว่า ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น เลข Reynolds [1-4], [6-10] อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดกับแผ่นตกกระทบและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ( $H/D_j$ ) [1-4], [7] ความเข้มข้นของของไหลนาโน [1-4], [6-8], [10] และเลข Prandtl นอกจากนี้จากการศึกษาของ Lv และคณะ [1-2] แสดงในรูปของ Peclet Number (Pe) ซึ่ง  $Pe = Re \times Pr$  ในความสัมพันธ์ด้วย จากการเปรียบเทียบบทความของ Lv และคณะ [2] ที่ศึกษาการตกกระทบของเจ็ทของของไหลนาโนของอนุภาค  $Al_2O_3$  และบทความของ Modak และคณะ [3] โดยบทความแรกพบว่าสัมพัทธ์ของเลข Nusselt เป็น

ความสัมพันธ์กับ เลข Reynolds เลข Prandtl และอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดกับแผ่นตกกระทบและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ( $H/D_j$ ) ในขณะที่บทความของ Modak และคณะ [3] แสดงให้เห็นว่าเลข Nusselt สัมพันธ์กับเลข Reynolds เลข Prandtl, อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดกับแผ่นตกกระทบและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ( $H/D_j$ ) และความเข้มข้น

ตารางที่ 2.1 สรุปความสัมพันธ์และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่บทความทำการศึกษา เช่น ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน, Reynolds number, อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดกับแผ่นตกกระทบและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ( $H/D_j$ ) หรืออัตราส่วนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดและผิวตกกระทบกับความกว้างของหัวฉีด ( $H/W$ ), Prandtl number และมีสหสัมพันธ์ของเลข Nusselt ที่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ โดยที่รายละเอียดจะกล่าวต่อไป



ตารางที่ 2.1 สรุปสหสัมพันธ์และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่บทความทำการศึกษา

บทความ ที่	ผู้แต่ง	อนุภาคนาโน	ความเข้มข้น % V/V ( $\phi$ )	Re	H/D <sub>j</sub> หรือ H/W	Pr	method		สหสัมพันธ์	อื่นๆ
							Experiment	Numerical method		
1	Lv และ คณะ [1]	SiO <sub>2</sub>	1% 2% 3%	8,000 – 13,000	2, 3, 4, 5	Pr (1) Pr > 3, m = 1/3 (2) 0.15 < Pr < 3, m = 0.4 (3) Pr > 5.42, m = 1/3	✓		$Nu_{nf} = 0.00078(1+0.27622\phi^{0.021}Pe^{0.68555})$ $Re^{0.58999}Pr^m \times [1 - 0.47033(H/D_j) + 0.08819(H/D_j)^2 + 0.01762(H/D_j)^3 - 0.00398(H/D_j)^4]$	ห้วงนิตทำมุมกับพื้น ผิวตกกระทบ 50°, 70° และ 90°
2	Lv และ คณะ [2]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5% 1.0% 1.5% 2.0%	4,000 – 12,000	2, 3, 4, 5	Pr (1) Pr > 3, m = 1/3 (2) 0.15 < Pr < 3, m = 0.4 (3) Pr > 7.44, m = 1/3	✓		$Nu_{nf} = (1.4510 \times 10^{-19} + 0.00746\phi^{0.06242}$ $Pe^{-2.4849}) Re^{-3.7224}Pr^m[1 - 4.3599(H/D_j)^2 + 1.2045(H/D_j)^3 - 0.1134(H/D_j)^4]$	ห้วงนิตทำมุมกับพื้น ผิวตกกระทบ 50°, 70° และ 90°
3	Modak และ คณะ [3]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15% 0.60%	5,000 – 12,000	6, 12	5.29 ≤ Pr ≤ 5.54	✓		$Nu = 10.56 \times 10^3(Re)^{0.453}(Pr)^{-6.24} (H/D_j)^{0.16}$	6 ≤ H/D ≤ 12

บทความ ที่	ผู้แต่ง	อนุภาคนาโน	ความเข้มข้น % V/V ( $\phi$ )	Re	H/D <sub>j</sub> หรือ H/W	Pr	method		สหสัมพันธ์	อื่นๆ
							Experiment	Numerical method		
4	Sorour และคณะ [4]	SiO <sub>2</sub>	0% - 8.5%	2,148 - 40,004	0.5, 1, 2, 4, 8	5.378 - 12.237		✓	$Nu_{avg} = 634 \times 10^{-6} Pe + \frac{654.5}{13.61 + \frac{r}{d} + (1-\Phi)^2} + \frac{283 \times 10^{-6} Pe}{\frac{r}{d} \times \frac{z}{d}} - \frac{r}{d} - 146 \times 10^{-7} \frac{r}{d} Pe$	อัตราส่วนระหว่างรัศมีของแผ่นตกกระทบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ท (r/d) โดยที่ (r/d) = 2.5, 5, 7.5, 12.5)
5	Abdelrehim และคณะ [5]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0% - 4%	100 - 400	0.5 - 4			✓	SPM: $\overline{Nu}_{nf} = 1 + \phi(-0.169 + 44.966\phi + 0.650307\phi^2)$ MPM: $\overline{Nu}_{nf} = 1 + \phi(44.0049 - 236.4944\phi + 3.437\phi^2)$	Single phase model (SPM) และ Multi-phase model (MPM)
6	Barewar และคณะ [6]	ZnO	0.02%, 0.04%, 0.06%, 0.1%	2,192 - 9,241	2 - 7.5	5.99 - 6.44	✓		$Nu = 3.953(1 - 0.53\phi^{1.411} Pe^{2.4e-4}) Re^{0.134} Pr^{1/3} [H/D_j]^{0.161}$	
7	Li และคณะ [7]	Cu	1.5%, 2.0%	2,000 - 16,000	1, 2, 3		✓		$Nu_{nf} = 0.2464(1.0 + 2.2061\Phi^{0.8464} Pe_d^{0.2715}) Re_{nf}^{0.5375} Pr_{nf}^{1/3} \times [1.0 + 0.3923(H/D_j) + 0.0086(H/D_j)^2 - 0.0259(H/D_j)^3]$	

บทความ ที่	ผู้แต่ง	อนุภาคนาโน	ความเข้มข้น % V/V ( $\phi$ )	Re	H/D <sub>j</sub> หรือ H/W	Pr	method		สหสัมพันธ์	อื่นๆ
							Experiment	Numerical method		
			2.5%, 3.0%							
8	Kareem และคณะ [8]	CuO	0.1% - 0.3%	1,000 - 8,000	13.3 - 23.3		✓		Nusselt number จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้น	มีสารลดแรงตึงผิว คือ Sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS)
9	ปิ่นทาวรีย์ ผ่องสุวรรณ และมนตรีหมีไพรพฤกษ์ [9]	Cu, TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0% - 6%	8000	4			✓	<p>หัวฉีดที่ 1 (พื้นผิวเรียบ)</p> <p>Cu : <math>Nu_{ave} = 0.4248\phi^2 - 2.41\phi + 97.984</math></p> <p>TiO<sub>2</sub> : <math>Nu_{ave} = 0.3676\phi^2 + 0.5803\phi + 98.047</math></p> <p>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : <math>Nu_{ave} = 0.3721\phi^2 + 0.9924\phi + 98.053</math></p> <p>หัวฉีดที่ 1 (พื้นผิวนูน)</p> <p>Cu : <math>Nu_{ave} = 0.416\phi^2 - 2.3713\phi + 95.192</math></p> <p>TiO<sub>2</sub> : <math>Nu_{ave} = 0.3598\phi^2 + 0.5638\phi + 95.254</math></p> <p>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : <math>Nu_{ave} = 0.3644\phi^2 + 0.9671\phi + 95.259</math></p> <p>หัวฉีดที่ 2 (พื้นผิวเรียบ)</p> <p>Cu : <math>Nu_{ave} = 0.4433\phi^2 - 2.1705\phi + 101.5</math></p> <p>TiO<sub>2</sub> : <math>Nu_{ave} = 0.3756\phi^2 + 1.0089\phi + 101.55</math></p>	พื้นผิวดกกระทบ เป็นพื้นผิวเรียบ นูน, ฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ 500 kW/m <sup>2</sup> , r <sub>s</sub> /D <sub>j</sub> ตั้งแต่ 0-2.2875 และ r <sub>s</sub> /D <sub>j</sub> > 2.2875

บทความ ที่	ผู้แต่ง	อนุภาคนาโน	ความเข้มข้น % V/V ( $\phi$ )	Re	H/D <sub>j</sub> หรือ H/W	Pr	method		สหสัมพันธ์	อื่นๆ
							Experiment	Numerical method		
									$\text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{Nu}_{\text{ave}} = 0.3781\phi^2 + 1.4494\phi + 101.55$ หัวฉีดที่ 2 (พื้นผิวเรียบ) $\text{Cu}$ : $\text{Nu}_{\text{ave}} = 0.4379\phi^2 - 2.1057\phi + 101.95$ $\text{TiO}_2$ : $\text{Nu}_{\text{ave}} = 0.3625\phi^2 + 1.065\phi + 102.01$ $\text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{Nu}_{\text{ave}} = 0.365\phi^2 + 1.499\phi + 102.02$	

Lv และคณะ [1] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทแบบหัวฉีดเดี่ยว ลงบนพื้นผิวตกกระทบ โดยหัวฉีดทำมุมกับพื้นผิวตกกระทบที่ 50°, 70° และ 90° กำหนดให้อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบและเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $H/D_j$ ) เท่ากับ 2, 3, 4, และ 5 โดยใช้ของไหลนาโนของอนุภาคซิลิคอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ในน้ำ ที่มีขนาดอนุภาค 30 nm ที่ความเข้มข้น ( $\phi$ ) 1%, 2%, และ 3% โดยปริมาตร โดยกำหนดเลข Re ตั้งแต่ 8,000 ถึง 13,000 พบว่า ความเข้มข้นที่ 3% โดยปริมาตร และที่  $H/D_j = 4$  ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไหลนาโนสูงที่สุด และ  $H/D_j = 2$  ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไหลนาโนต่ำที่สุด เนื่องจากมีระยะทางที่สั้นทำให้เจ็ทไม่สามารถพัฒนาได้อย่างสมบูรณ์ก่อนที่เจ็ทจะไปถึงพื้นผิวตกกระทบ เมื่อพิจารณาหัวฉีดทำมุมตกกระทบกับพื้นผิวที่เลข Re เดียวกัน พบว่าที่หัวฉีดทำมุมกับพื้นผิวตกกระทบ 90° ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด สุดท้ายเพื่อหาความสัมพันธ์

$$\text{Nu}_{\text{nf}} = 0.00078(1 + 0.27622\phi^{0.021} \text{Pe}^{0.68555}) \text{Re}^{0.58999} \text{Pr}^m \times [1 - 0.47033(H/D_j) + 0.08819(H/D_j)^2 + 0.0176(H/D_j)^3 - 0.00398(H/D_j)^4] \quad (2.14)$$

โดยที่  $\text{Pe} = \text{Re} \times \text{Pr}$  และ  $m = 1/3$  เมื่อ  $\text{Pr} > 3$ ,  $m = 0.4$  เมื่อ  $0.15 < \text{Pr} < 3$ ,  $m = 1/3$  เมื่อ  $\text{Pr} > 5.42$

Lv และคณะ [2] ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทแบบหัวฉีดเดี่ยว ลงบนพื้นผิวตกกระทบ โดยหัวฉีดทำมุมกับพื้นผิวตกกระทบ 50°, 70° และ 90° กำหนดให้  $H/D_j = 2, 3, 4,$  และ 5 โดยการใชของไหลนาโนของอนุภาค อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในน้ำที่มีขนาดอนุภาค 30 nm ที่ความเข้มข้น 0.5%, 1.0%, 1.5% และ 2% โดยกำหนดเลข Re ตั้งแต่ 4,000 ถึง 12,000 ที่อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้าคงที่ที่ 20°C พบว่า ที่ความเข้มข้นของของไหลนาโน 2% โดยปริมาตร ที่เลข  $\text{Re} = 8,000$  ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด เนื่องจากความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น และที่เลข Re เดียวกัน  $H/D_j = 4$  ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนสูงที่สุด  $H/D_j = 2$  ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนต่ำสุด เมื่อพิจารณาหัวฉีดทำมุมตกกระทบกับพื้นผิวที่เลข Re เดียวกัน พบว่าที่หัวฉีดทำมุมกับพื้นผิวตกกระทบ 90° ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากเกิดการถ่ายเทโมเมนตัมได้มากที่สุด และแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Nu}_{\text{nf}} = (1.4520 \times 10^{-19} + 0.00746\phi^{0.06242} \text{Pe}^{-2.4849}) \text{Re}^{-3.7224} \text{Pr}^m [1 + 6.8732(H/D_j) - 4.3599(H/D_j)^2 + 1.2045(H/D_j)^3 - 0.1134(H/D_j)^4] \quad (2.15)$$

โดยที่  $\text{Pe} = \text{Re} \times \text{Pr}$  และ  $m = 1/3$  เมื่อ  $\text{Pr} > 3$ ,  $m = 0.4$  เมื่อ  $0.15 < \text{Pr} < 3$ ,  $m = 1/3$  เมื่อ  $\text{Pr} > 7.44$



Modak และคณะ [3] ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทของของไหลนาโน ลงบนพื้นผิวตกกระทบเจ็ทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.38 mm ด้วยวิธีการถ่ายภาพความร้อนด้วยกล้องอินฟราเรด โดยใช้ของไหลนาโนอนุภาค อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในน้ำ ที่ความเข้มข้น 0.15% และ 0.60% โดยปริมาตร และ  $H/D_j = 6$  และ 12 ทำการทดลองโดยใช้เลข Re ในช่วง 5,000-12,000 พบว่า ของไหลอนุภาคนาโนความเข้มข้น 0.60% โดยปริมาตร ที่เลข Re = 12,000 ให้ค่าเลข Nusselt สูงสุด และที่เลข Re = 5,000 และ 9,500 ที่  $H/D_j = 6$  ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด และแสดงความสัมพันธ์ในรูปของเลขไร์หน่วยได้ดังนี้

$$\text{Nu} = 10.56 \times 10^3 (\text{Re})^{0.453} (\text{Pr})^{-6.24} (H/D_j)^{0.16} \quad (2.16)$$

โดยมีเงื่อนไขดังนี้  $5,000 \leq \text{Re} \leq 12,000$ ,  $5.29 \leq \text{Pr} \leq 5.54$  และ  $6 \leq H/D_j \leq 12$

Sorour และคณะ [4] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างการตกกระทบของเจ็ทของของไหลนาโนของ  $\text{SiO}_2$  ลงบนพื้นผิวสแตนเลส โดยหัวฉีดมีเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 6 mm และอนุภาคซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มีขนาด 8 nm โดยน้ำทำหน้าที่เป็นของไหลฐาน ใช้ความเข้มข้นระหว่าง 0% ถึง 8.5% โดยปริมาตร ในช่วงเลข Re ระหว่าง 2,148 ถึง 40,004 และ  $H/D_j$  ที่ 0.5, 1, 2, 4 และ 8 นอกจากนี้ยังศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆของพื้นผิวตกกระทบในรูปของอัตราส่วนของรัศมีและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ( $r/D_j$ ) ที่ 2.5, 5, 7.5 และ 12.5 พบว่าของไหลนาโนที่ความเข้มข้น 8.5% โดยปริมาตร ให้การถ่ายเทความร้อนดีที่สุดและได้ค่าเลข Nusselt ที่สูงที่สุด  $H/D_j$  ที่ 0.5 และ 1 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเลข Nusselt สูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เลข Re ลดลง และสามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{Nu}_{\text{avg}} = 634 \times 10^{-6} \text{Pe} + \frac{654.5}{13.61 + \frac{r}{d} + (1 - \phi)^2} + \frac{283 \times 10^{-6} \text{Pe}}{\frac{r}{d} \times \frac{z}{d}} - \frac{r}{d} - 146 \times 10^{-7} \frac{r}{d} \text{Pe} \quad (2.17)$$

Abdelrehim และคณะ [5] ศึกษาเชิงตัวเลขของการตกกระทบของเจ็ทสองมิติและเปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลองของของไหลนาโนแบบเฟสเดียวซึ่งพิจารณาอนุภาคนาโนเป็นเนื้อเดียวกับน้ำและแบบหลายเฟสพิจารณาอนุภาคนาโนที่เป็นของแข็งกับน้ำ โดยใช้อนุภาคอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ขนาด 20 nm ที่  $25^\circ\text{C}$  โดยน้ำทำหน้าที่เป็นของไหลฐาน ใช้ความเข้มข้นระหว่าง 0% ถึง 4% โดยปริมาตร ในช่วงเลข Re ระหว่าง 100 ถึง 400 และอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดและผิวตกกระทบกับความกว้างของหัวฉีด ( $H/W$ ) ระหว่าง 0.5 ถึง 4 โดเมนการคำนวณของการตกกระทบของเจ็ทมีอัตราส่วนความยาวของผนังร้อนถึงความกว้างของเจ็ทตกกระทบ ( $L/W=6$ ) และผนังร้อนมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่  $70 \text{ W/cm}^2$  พบว่าความเข้มข้นที่ 1% และ 4% โดยปริมาตร ได้เลข Nusselt สูงสุด โดยเกิดขึ้นที่  $H/W$  มีค่าน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าที่เลข Re สูงสุดทำให้เลข

Nusselt ลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ  $H/W$  เมื่อความเข้มข้นมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นและส่งผลให้เลข Nusselt เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อเทียบค่าระหว่าง Single-phase model (SPM) กับ Multi-phase model (MPM) พบว่าเลข Nusselt ที่ MPM มีค่าสูงกว่า SPM เพราะ MPM มีสมดุลทางความร้อนระหว่างอนุภาคนาโนและของไหลฐาน โดยเลข Nusselt มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\overline{\text{Nu}}_{\text{nf}} = 1 + \phi(-0.169 + 44.966\phi + 0.650307\phi^2) \quad (2.18)$$

$$\overline{\text{Nu}}_{\text{nf}} = 1 + \phi(44.0049 - 236.4944\phi + 3.437\phi^2) \quad (2.19)$$

Barewar และคณะ [6] ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนของบนพื้นผิวตกรกกระทบที่เป็นแผ่นกลมเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 mm หนา 9 mm ด้วยวิธีการตกรกกระทบของเจ็ทที่กำหนด  $H/D_j$  ระหว่าง 2 ถึง 7.5 โดยใช้ของไหลนาโนของอนุภาค ZnO ขนาด 25 ถึง 40 nm ในน้ำ ทำหน้าที่เป็นของไหลทำงานที่ความเข้มข้น ( $\phi$ ) 0.02%, 0.04%, 0.06% และ 0.10% โดยปริมาตร อนุภาค ZnO มีโครงสร้างเป็น Hexagonol ที่มีความเสถียรช่วยเพิ่มสมบัติความจุความร้อนและการนำความร้อนของของไหลนาโน ทำการทดลองที่เลข Re ในช่วง 2192 ถึง 9241 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เลข Re = 9241 พบว่าที่ความเข้มข้น 0.10% โดยปริมาตร มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดตกรกกระทบเพิ่มขึ้น 54.70% และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุดคิดเป็น 51 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำ เกิดจากการกระจายตัวของอนุภาคนาโนบนพื้นผิวตกรกกระทบทำให้ชั้นขอบเขตบางลงและยังเพิ่ม wettability ของของไหลช่วยให้อุณหภูมิการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น การถ่ายเทความร้อนที่สูงสุดเกิดขึ้นที่  $H/D_j = 3.5$  เนื่องจากการชนกันระหว่างอนุภาคช่วยลดแรงตึงผิวและเพิ่มความจุความร้อนของของไหล และพบว่าที่  $H/D_j$  มากกว่า 3.5 มีการสูญเสียพลังงานและความปั่นป่วนของการไหลลดลง เลข Nusselt พิจารณาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Nu} = 3.953(1 - 0.53\phi^{1.411} \text{Pe}^{2.4e-4}) \text{Re}^{0.134} \text{Pr}^{1/3} (H/D_j)^{0.161} \quad (2.20)$$

โดยที่  $2000 < \text{Re} < 10000$ ,  $5.99 < \text{Pr} < 6.44$ ,  $2 < H/D_j < 7.5$

Li และคณะ [7] ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนบนพื้นผิวที่ทำจากทองแดงด้วยการตกรกกระทบของเจ็ทของของไหลจากหัวฉีดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm อัตราส่วน  $H/D_j = 1, 2$ , และ 3 ใช้อนุภาคนาโนทองแดง (Cu) ขนาด 25 และ 100 nm ที่ความเข้มข้น ( $\phi$ ) 1.5%, 2.0%, 2.5% และ 3.0% โดยปริมาตร โดยใช้น้ำเป็นของไหลฐาน ในการทดลองพบว่าที่เลข Re ค่าเดียวกัน อนุภาคนาโนขนาด 25 nm ให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดีกว่าขนาด 100 nm และที่ความเข้มข้น 3.0% โดยปริมาตร อนุภาคนาโนขนาด 25 nm ให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าน้ำอยู่ 52% เพราะอนุภาคที่ขนาดเล็กกว่า สามารถเคลื่อนที่และถ่ายเทพลังงานภายในได้เร็วกว่าขนาดใหญ่ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของอนุภาคนาโนขนาด 25 nm ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน พบว่า ของไหลนาโนที่มีความเข้มข้น 2.0% โดยปริมาตร ให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่ความเข้มข้นอื่นๆ เนื่องจากความหนืดของของไหลที่มีความเข้มข้นที่

2.5% และ 3.0% โดยปริมาตร มีค่าสูงซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ของของไหลช้าลงทำให้ไปขัดขวางการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลนาโนกับพื้นผิวตกรกระทบ และแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{Nu}_{\text{nf}} = 0.2464(1.0 + 2.2061\phi^{0.8464}\text{Pe}_d^{0.2715})\text{Re}_{\text{nf}}^{0.5375}\text{Pr}_{\text{nf}}^{1/3} \times [1.0 + 0.3923(H/D_j) + 0.0086(H/D_j)^2 - 0.0259(H/D_j)^3] \quad (2.21)$$

Kareem และคณะ [8] ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการตกรกระทบของเจ็ทหัวฉีดกลมขนาด 3 mm. บนพื้นผิวแผ่นเหล็กขนาด 50 mm.  $H/D_j = 13.33$  ถึง  $23.33$  ของไหลทำงานที่ใช้คือของไหลนาโนของอนุภาคทองแดง (CuO) ขนาด 50 nm ที่ความเข้มข้น ( $\phi$ ) 0.10%, 0.15%, 0.20%, 0.25% และ 0.30% โดยปริมาตร มีสารลดแรงตึงผิวคือ Sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) ที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของอนุภาคนาโน กำหนดอุณหภูมิทางเข้าเท่ากับ  $25^\circ\text{C}$  ทดลองที่เลข Re ระหว่าง 1000 ถึง 8000 พบว่า การถ่ายเทความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเลข Re และความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น และที่เลข Re สูงที่สุด พบว่าที่ความเข้มข้น 0.30% ให้ค่า Nusselt สูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อระยะห่างระหว่างหัวฉีดและผิวตกรกระทบ (H) มากขึ้น ของไหลทำงานจะมีโมเมนตัมไม่มากพอที่จะทำลายชั้นขอบเขตได้ จึงเป็นอุปสรรคต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้การกระจายตัวและการถ่ายเทโมเมนตัมลดลง มีผลต่อค่า Nusselt เมื่อพิจารณาที่  $H/D_j = 13.33$ ,  $\text{Re} = 8000$  และความเข้มข้นที่ 0.30% พบว่า ให้ Nusselt สูงที่สุด

ปัทมาธิ์ ผ่องสุวรรณ และ มนต์รี หมีไพรพุกฤษ์ [9] ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนของการตกรกระทบของเจ็ทของของไหลนาโนแบบสมมาตามแกนในสองมิติ ด้วยแบบจำลอง k- $\epsilon$  โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการคำนวณการตกรกระทบของเจ็ทลงบนพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูนที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่  $500\text{ kW/m}^2$  และใช้ของไหลนาโนของอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ทองแดง (Cu) ไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ในน้ำ ที่ความเข้มข้น 0 – 6% โดยปริมาตร ออกจากหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D_{j1} = 4\text{ mm}$  ที่มี Reynolds คงที่ที่ 8,000 โดยกำหนดในช่วง  $r_s/D_j = 0$  ถึง  $2.2875$  และที่  $r_s/D_j > 2.2875$  กำหนดอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างทางออกหัวฉีดและจุดตกรกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด  $H/D_j = 4$  พบว่า ของไหลนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ความเข้มข้น 6% โดยปริมาตร ให้ค่าถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด และสำหรับพื้นผิวนูนให้การถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าพื้นผิวเรียบ เนื่องจากเกิด Secondary flow ที่บริเวณขอบของพื้นผิวนูน ผลของการถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปของเลข Nusselt ที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้น ในรูปของโพลีโนเมียลอันดับ 2 ดังนี้

หัวฉีดที่ 1 (พื้นผิวเรียบ)

$$\text{Cu} : \text{Nu}_{\text{ave}} = 0.4248\phi^2 - 2.41\phi + 97.984 \quad (2.22)$$

$$\text{TiO}_2 : \text{Nu}_{\text{ave}} = 0.3676\phi^2 + 0.5803\phi + 98.047 \quad (2.23)$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Nu}_{\text{ave}} = 0.3721\phi^2 + 0.9924\phi + 98.053 \quad (2.24)$$

หัวฉีดที่ 1 (พื้นผิวนูน)

$$\text{Cu} : \text{Nu}_{\text{ave}} = 0.416\phi^2 - 2.3713\phi + 95.192 \quad (2.25)$$

$$\text{TiO}_2 : \text{Nu}_{\text{ave}} = 0.3598\phi^2 + 0.5638\phi + 95.254 \quad (2.26)$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Nu}_{\text{ave}} = 0.3644\phi^2 + 0.9671\phi + 95.259 \quad (2.27)$$

หัวฉีดที่ 2 (พื้นผิวเรียบ)

$$\text{Cu} : \text{Nu}_{\text{ave}} = 0.4433\phi^2 - 2.1705\phi + 101.5 \quad (2.28)$$

$$\text{TiO}_2 : \text{Nu}_{\text{ave}} = 0.3756\phi^2 + 1.0089\phi + 101.55 \quad (2.29)$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Nu}_{\text{ave}} = 0.3781\phi^2 + 1.4494\phi + 101.55 \quad (2.30)$$

หัวฉีดที่ 2 (พื้นผิวนูน)

$$\text{Cu} : \text{Nu}_{\text{ave}} = 0.4379\phi^2 - 2.1057\phi + 101.95 \quad (2.31)$$

$$\text{TiO}_2 : \text{Nu}_{\text{ave}} = 0.3625\phi^2 + 1.065\phi + 102.01 \quad (2.32)$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Nu}_{\text{ave}} = 0.365\phi^2 + 1.499\phi + 102.02 \quad (2.33)$$

จากการทำวรรณกรรมปริทัศน์ พบว่า การนำเสนอสหสัมพันธ์ของเลข Nusselt สำหรับการศึกษเชิงตัวเลข [5], [9] แสดงความสัมพันธ์อยู่ในรูปของความเข้มข้น เนื่องจากส่วนใหญ่จะพิจารณาของไหลนาโนเป็นสารเนื้อเดียว โดยมีสมบัติเชิงความร้อนเปลี่ยนแปลงจากของไหลฐาน เช่น ความหนาแน่น ( $\rho$ ) เพิ่มขึ้น ความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ลดลง ความหนืด ( $\mu$ ) เพิ่มขึ้น และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น สำหรับการทดลอง [1-4], [6-8] บทความส่วนใหญ่อธิบายถึงการทำงานของอนุภาคนาโนในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการปลดความหนาของชั้นขอบเขตลง แต่เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนสูงขึ้นกลับทำให้การถ่ายเทความ

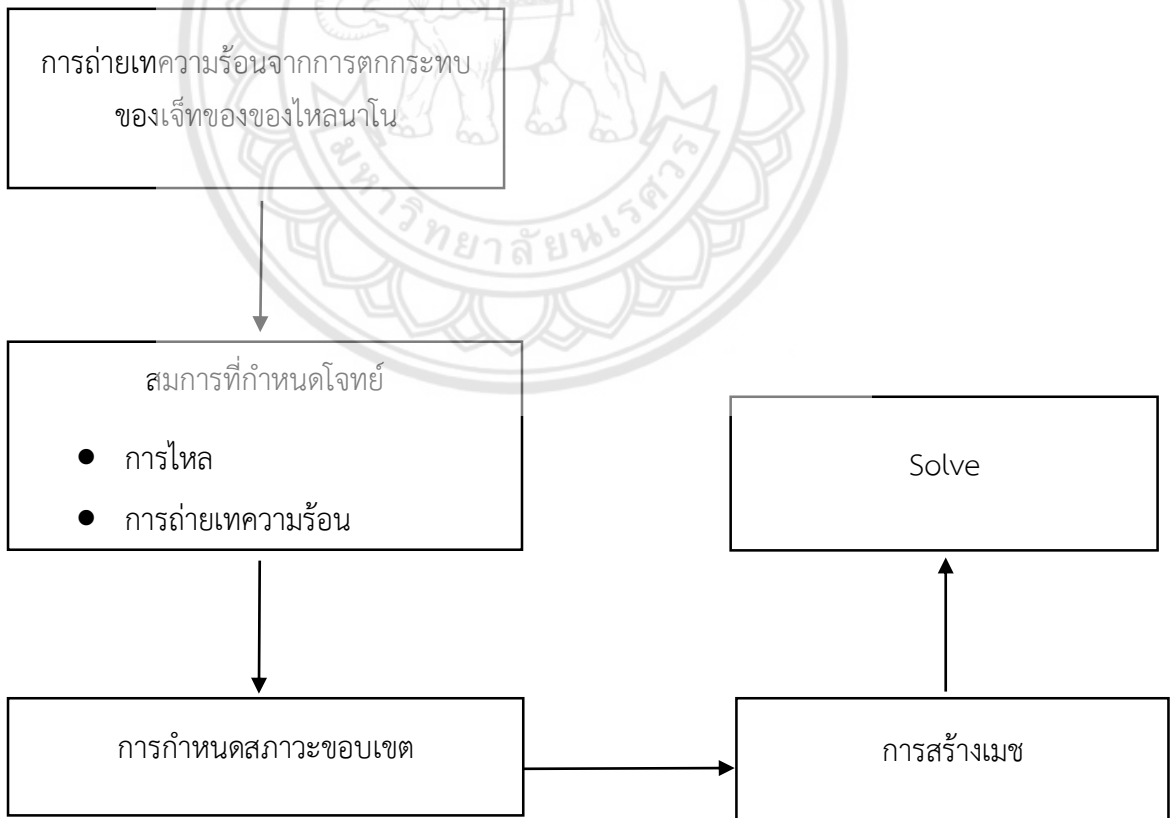
ร้อนลดลงเนื่องจากความหนืดมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การนำเสนอความสัมพันธ์เชิงตัวเลขอยู่ในรูปของ  
ตัวแปรต่างๆ นอกเหนือไปจากความเข้มข้น



### บทที่ 3

#### ขั้นตอนการคำนวณ

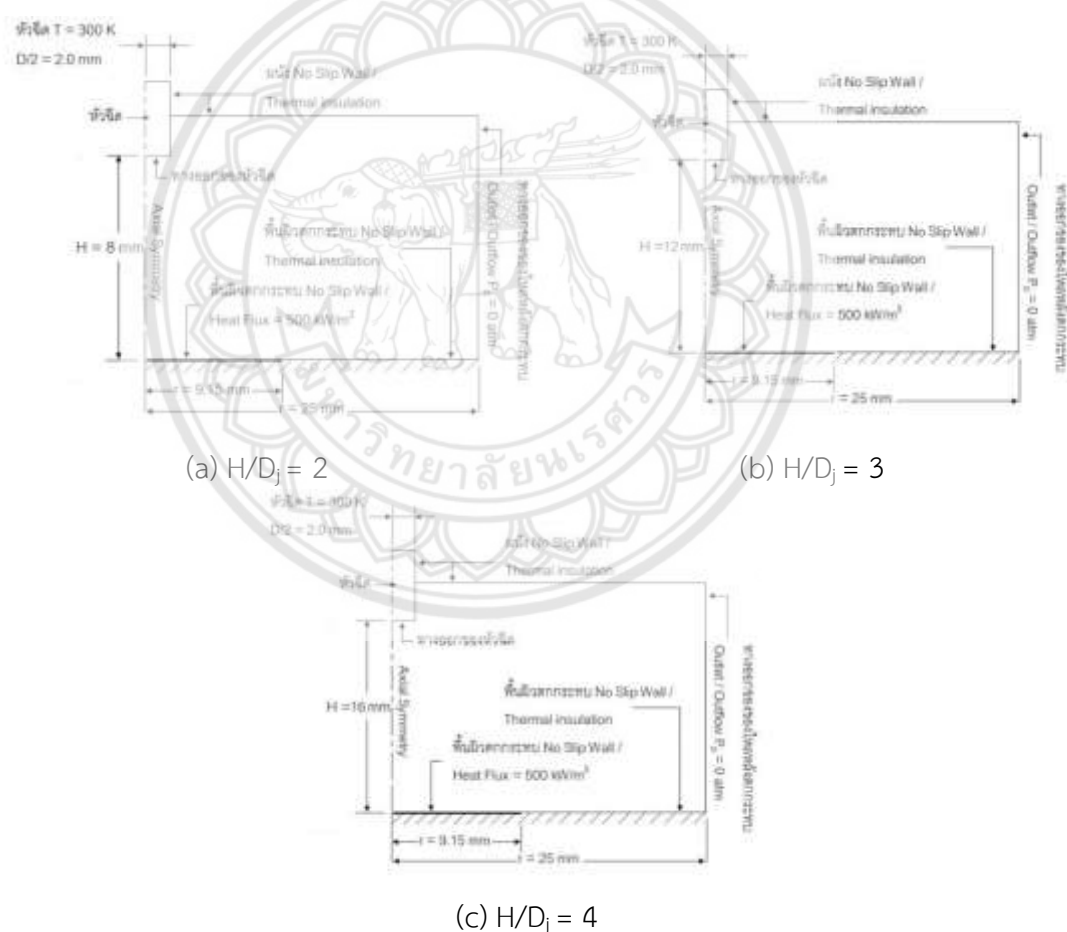
งานวิจัยนี้ต้องอาศัยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในที่นี้เราใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ COMSOL ในการหาคำตอบของการถ่ายเทความร้อนบนผิวตกระทบแบบเรียบและนูน จากการตกระทบของเจ็ท โดยมีของไหลนาโนเป็นของไหลทำงาน กล่าวคือ จากโจทย์ของไหลนาโนไหลออกจากหัวฉีดเข้ามาแทนที่อากาศที่อยู่ข้างๆที่ ตกระทบบลงบนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนเพื่อระบายความร้อน จึงได้กำหนดสมการของการไหลและการถ่ายเทความร้อน จากนั้นกำหนดสภาวะขอบเขต โดยจะอธิบายในหัวข้อ 3.1 และสร้างเมชด้วย Delaunay Algorithm ซึ่งเป็นรูปแบบการสร้างเมชแบบ 2D Axisymmetric และใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบ Direct (PARDISO) โดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการคำนวณโจทย์การถ่ายเทความร้อนของการตกระทบของเจ็ทที่มีของไหลนาโนเป็นของไหลทำงานโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

### 3.1 โดเมนการคำนวณ (Computational Domain) และขอบเขตของโจทย์

รูปที่ 3.2 แสดงโดเมนการคำนวณสำหรับโจทย์การตกกระทบของเจ็ทแบบสองมิติสมมาตรตามแกน (2D Axi-symmetric) ลงบนพื้นผิวตกรกระทบแบบเรียบและนูน โดยเป็นหนึ่งหัวฉีด มีเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่ขนาด ( $D_j$ ) 4 mm กำหนดให้ผนังที่อยู่ติดกับหัวฉีดเป็นผนังเรียบไม่มีการลื่นไหล (No Slip) และพื้นผิวตกรกระทบกำหนดให้ไม่มีการลื่นไหลเช่นกัน โดยที่ทางออกกำหนดให้ของไหลหลังตกกระทบไหลออกสู่อากาศแวดล้อมที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ของไหลนาโนเป็นของไหลทำงาน ระยะ ( $H$ ) เป็นระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดและพื้นผิวตกรกระทบ ซึ่งทำการทดสอบที่อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกรกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $H/D_j$ ) = 2, 3 และ 4 ทำให้  $H = 8, 12$  และ  $16$  mm ตามลำดับ สำหรับกรณีพื้นผิวนูน เรากำหนดให้มีรัศมี 9.15 mm และหนา 1.5 mm ซึ่งมีขนาดเท่ากับชิปคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.2 โดเมนการคำนวณและการกำหนดสถานะขอบเขตของการคำนวณสำหรับผิวเรียบ

ตัวแปรที่ใช้ศึกษามีดังนี้

1. เลข Reynolds (Re) มีค่าเท่ากับ 2,000, 4,000, 6,000, และ 8,000
2. อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดมีค่า  $H/D_j = 2, 3,$  และ  $4$
3. ของไหลบริเวณทางเข้า ( $T_j$ ) 300 K
4. พื้นผิวนูน มีรัศมี 9.15 mm และสูง 1.5 mm
5. ฟลักซ์ความร้อนของพื้นผิวตกกระทบ ( $q''$ ) คงที่ที่ 500 kW/m<sup>2</sup>

**ตารางที่ 3.1** การคำนวณที่มาของฟลักซ์ความร้อนของพื้นผิวตกกระทบ

CPU รุ่น Intel Core i7-920 specifications มีข้อมูลดังนี้	
ขนาด (กว้าง x ยาว x สูง)	19.45 mm x 13.52 mm x 1.5 mm
พื้นที่หน้าตัดของชิป (m <sup>2</sup> )	0.000263
น้ำหนัก (g)	33.2
อุณหภูมิต่ำสุด/สูงสุด ที่ชิปทำงาน	5°C – 67.9°C
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	0.8V – 1.375V
Minimum/Maximum power dissipation	15 Watt / 230.14 Watt
Thermal Design Power (Watt)	130 Watt
$q''_s$	494.297 kW/m <sup>2</sup>

จากการกำหนดปัญหาของการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทโดยใช้ของไหลนาโนเป็นของไหลทำงาน ซึ่งสมบัติของของไหลนาโนที่เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน โดยในงานวิจัยนี้ใช้อนุภาคนาโนเป็นไทเทเนียมออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ที่ความเข้มข้น 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร โดยมีน้ำเป็นของไหลฐาน โดยมีความสัมพันธ์ของสมบัติของของไหลนาโนดังสมการ

$$\text{ความหนาแน่น :} \quad \rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (3.1)$$

$$\text{ความร้อนจำเพาะ :} \quad c_{p,nf} = (1 - \phi)c_{p,bf} + \phi c_{p,p} \quad (3.2)$$

ทั้งนี้ความหนืดพลวัตและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลนาโนหาได้จาก

$$\text{ความหนืดพลวัต :} \quad \mu_{nf} = \mu_{bf} (123\phi^2 + 7.3\phi + 1) \quad (3.3)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การนำความร้อน :} \quad k_{nf} = k_{bf} (4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1) \quad (3.4)$$



เมื่อ	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของไหล มีหน่วย $\text{kg/m}^3$
	$C_p$	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล มีหน่วย $\text{J/kg-K}$
	$\mu$	คือ ความหนืดพลวัตของของไหล มีหน่วย $\text{Pa-s}$
	$k$	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีหน่วย $\text{W/m-K}$
	$\phi$	คือ ความเข้มข้นของของไหลนาโน มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ตัวห้อย	nf	หมายถึง ของของไหลนาโน (Nanofluid)
	bf	หมายถึง ของของไหลฐาน (Base Fluid) ซึ่งในที่นี้ ได้แก่ น้ำ
	P	หมายถึง ของอนุภาคนาโน ซึ่งในที่นี้ ได้แก่ ไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ )

ตารางที่ 3.2 สมบัติเชิงความร้อนของอนุภาคนาโน

Material	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$C_p$ ( $\text{J/kg-K}$ )	$\mu$ ( $\text{Pa-s}$ )	$k$ ( $\text{W/m-K}$ )
$\text{TiO}_2$ (s)	4,500	522	N/A	21.9

ซึ่งมีผลการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 3.3 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) จะให้ความหนาแน่น ความหนืด สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และเลข Prandtl มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความจุความร้อนจำเพาะมีค่าลดลง

ตารางที่ 3.3 สมบัติของของไหลนาโน

	$\phi$ (%v/v)	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$C_p$ ( $\text{J/kg-K}$ )	$\mu$ ( $\text{Pa-s}$ )	$k$ ( $\text{W/m-K}$ )	V (m/s)				Pr
						Re = 2,000	Re = 4,000	Re = 6,000	Re = 8,000	
Water	0%	997.01	4,179	0.000860	0.6130	0.43	0.86	1.29	1.73	5.8629
TiO	2%	1067.07	4105.86	0.001028	0.6476	0.48	0.96	1.44	1.93	6.5172
	4%	1137.13	4032.72	0.001280	0.6846	0.56	1.13	1.69	2.25	7.5425
	6%	1207.19	3959.58	0.001617	0.7240	0.67	1.34	2.01	2.68	8.8460

### 3.2 สมการสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน (Governing Equations)

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการไหลนั้นจะเริ่มพิจารณาจากสมการการอนุรักษ์ ซึ่งประกอบไปด้วยกฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัมและพลังงาน ดังแสดงในสมการ

การอนุรักษ์มวล:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.5)$$

การอนุรักษ์โมเมนตัม:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (3.6)$$

การอนุรักษ์พลังงาน:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}[\rho u_j (e + P)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + \rho u_j (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (3.7)$$

เมื่อ	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล (Thermal conductivity), 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-s
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของไหล มีหน่วย kg/m <sup>3</sup>
	$\tau$	คือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง มีหน่วย kg/

กำหนดให้ของไหลอยู่ที่สภาวะคงตัว มีการไหลแบบปั่นป่วนตามแบบจำลอง  $k - \epsilon$  โดยมีความสัมพันธ์ของสมการการเคลื่อนที่ของของไหล ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + (G_k + G_b) - \rho \epsilon \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.9)$$

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

เมื่อ  $k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีหน่วย W/m-K

$G_b$  คือ พลังงานจลน์เนื่องจากแรงลอยตัว

$G_k$  คือ พลังงานจลน์สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่  $G_k = -\rho u_i' \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$

$\epsilon$  คือ อัตราการกระจายพลังงานความร้อนปั่นป่วน

$\mu_t$  คือ ความหนืดแบบปั่นป่วน

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล มีหน่วย kg/m<sup>3</sup>

$\sigma$  คือ Turbulent Prandtl number

ตัวห้อย  $t$  หมายถึง ความปั่นป่วน

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

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

สำหรับการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนออกจากหัวฉีดมาตกระทบกับผิวกระทบบที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ ( $q_s''$ ) เมื่อได้อุณหภูมิที่ผิวกระทบบ ( $T_s$ ) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h$ ) ได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{q_s''}{T_s - T_j} \quad (3.11)$$

จากนั้นแสดงในรูปของตัวแปรไร้มิติ เลข Nusselt (Nu) ดังนี้

$$Nu = \frac{hD_j}{k} \quad (3.12)$$

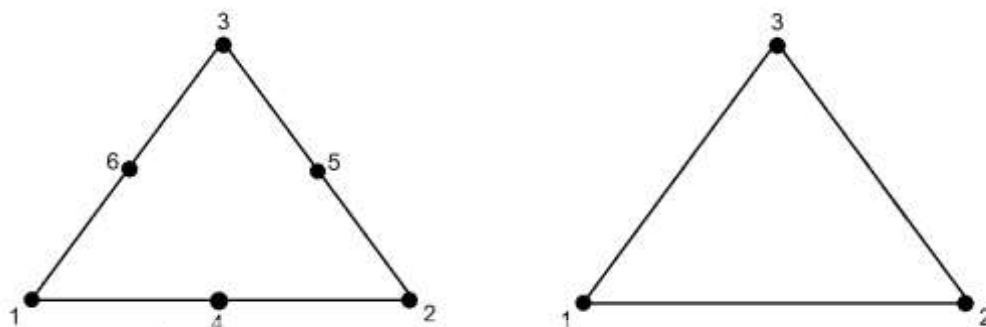
โดยที่จะแสดงผลลัพธ์ในรูปของ (1). Local Nusselt number (Nu) ซึ่งหมายถึง เลข Nusselt ณ ตำแหน่งใดๆ บนพื้นผิวตกระทบ (2). Stagnation Nusselt Number ( $Nu_0$ ) หมายถึง เลข Nusselt ที่จุดตกระทบ และ (3). Average Nusselt Number ( $Nu_{ave}$ ) หมายถึง เลข Nusselt เฉลี่ยของทั้งพื้นผิวตกระทบ

### 3.3 การสร้างเมช

#### 3.3.1 ขั้นตอนในการสร้างเมช

หลังจากกำหนดโดเมนการคำนวณเป็นแบบ 2 มิติสมมาตรตามแกน เราจะทำการสร้างเมชแบบสามเหลี่ยมไร้ระเบียบโดยอาศัย Delaunay Algorithm แนวคิดของวิธีดังกล่าวคือ เริ่มจากการสร้างวงกลม แล้วสร้างสามเหลี่ยมขึ้นมาภายในวงกลม โดยเลือกสามเหลี่ยมที่ให้พื้นที่มากที่สุดแล้วสร้างไปเรื่อยๆ จนครบโดเมนการคำนวณ ในโปรแกรม COMSOL เมชที่ใช้เป็น Lagrange Elements สำหรับระบบสมการ Navier-Stokes เพื่อคำนวณหาองค์ประกอบความเร็ว  $u, v$  อุณหภูมิ  $T$  และความดัน  $P$  โดยในการคำนวณหา  $u, v$  และ  $T$  โปรแกรมจะกำหนดเมชเป็น Quadratic Element โดยมี node ทั้งหมด 6 node คือมี node 1-3 อยู่ที่มุมของสามเหลี่ยม และมี node 4-6 ที่จุดกึ่งกลางของแต่ละด้านของสามเหลี่ยม กำหนดตำแหน่งทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูป 3.3(a) โดยที่ node แต่ละจุด ( $p_i$ ) จะมี Degrees Of Freedom คือ  $u_i = u(p_i)$  และให้ Shape functions คือ  $\varphi_i$  โดยที่  $u = \sum_i u_i \varphi_i$  และให้ Shape functions ดังนี้  $\varphi_1 = \zeta(2\zeta - 1)$ ,  $\varphi_2 = \eta(2\eta - 1)$ ,  $\varphi_3 = \zeta(2\zeta - 1)$ ,  $\varphi_4 = 4\zeta\eta$ ,  $\varphi_5 = 4\eta\zeta$  และ  $\varphi_6 = 4\zeta\zeta$  เมื่อ  $\zeta, \eta$  คือ Master element coordinates ที่มีค่าอยู่ระหว่าง -1 กับ 1 และ  $\zeta = 1 - \zeta - \eta$  และในการคำนวณหา  $P$  กำหนดเมชเป็น Linear Element ดัง

แสดงในรูปที่ 3.3(b) กล่าวคือมี node ที่มุมของสามเหลี่ยมโดยกำหนดตำแหน่งทวนเข็มนาฬิกา ให้ Shape functions คือ  $\varphi_1 = \xi$ ,  $\varphi_2 = \eta$  และ  $\varphi_3 = 1 - \xi - \eta$  เมื่อ  $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 1$



(a) Quadratic Element

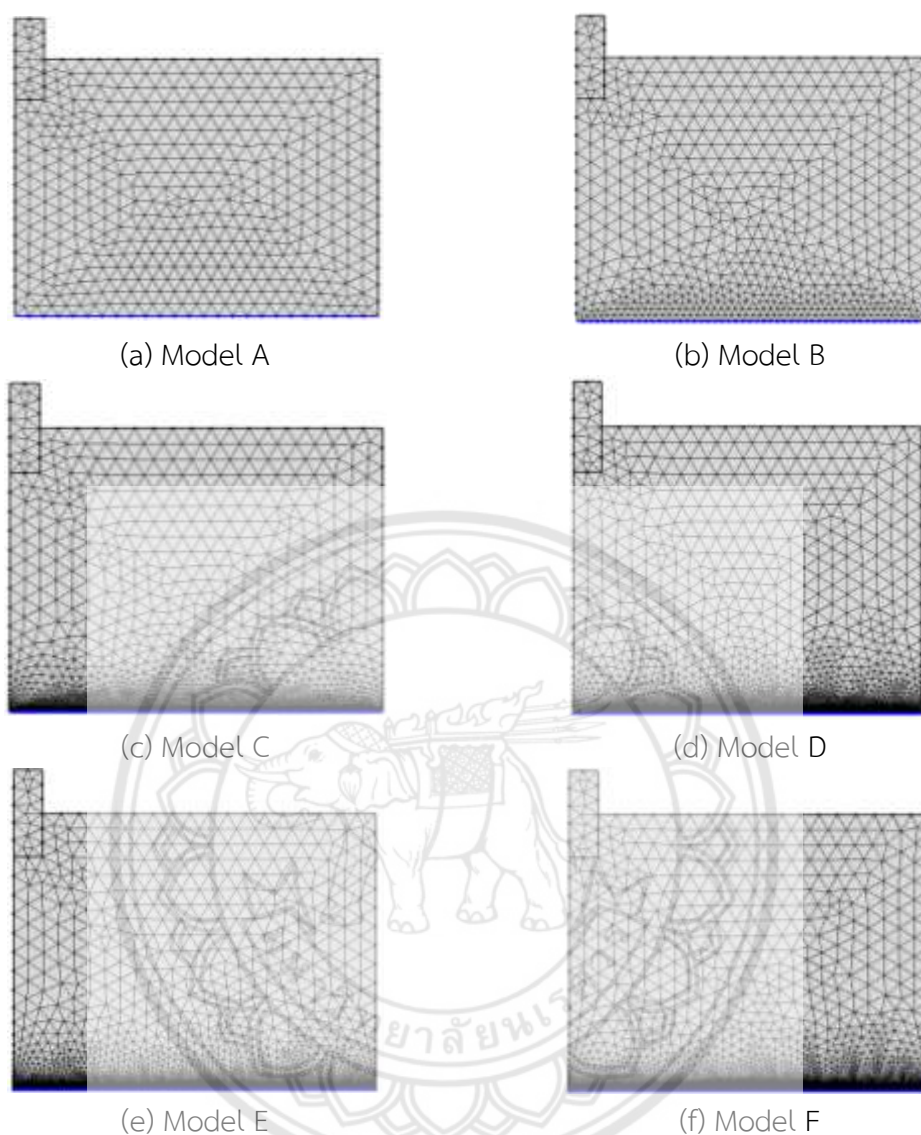
(b) Linear Element

รูปที่ 3.3 node ในสามเหลี่ยมไร้ระเบียบ

### 3.3.2 ผลกระทบของความหนาแน่นของเมชที่มีต่อคำตอบ

สำหรับระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณโดเมนสองมิติ ความหนาแน่นของเมชที่มีค่าสูงจะนำไปสู่คำตอบที่มีความถูกต้องสูงด้วย ดังนั้นความหนาแน่นของเมชยังอาจส่งผลต่อคำตอบที่ได้ นอกจากนี้ข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ เช่น ความเร็วของ CPU และหน่วยความจำ ยังเป็นขีดจำกัดของความละเอียดของเมช ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบเพื่อหาค่าความหนาแน่นของเมชที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการคำนวณต่อไป

การทดสอบความหนาแน่นของเมชกระทำโดยการเปรียบเทียบเลข Nusselt โดยกำหนดขอบเขตของโดเมนคำนวณดังนี้ อุณหภูมิที่ของหัวฉีดเท่ากับ 300K เลข Reynolds (Re) เท่ากับ 2,000, 4,000, 6,000 และ 8,000 อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างทางออกของหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $H/D_j$ ) = 4 โดยมีน้ำเป็นของไหลทำงานการไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนตามแบบจำลอง  $k - \epsilon$  เนื่องจากผลลัพธ์สุดท้ายที่เราต้องการคำนวณ คือ อุณหภูมิที่ผิวตกกระทบ ( $T_s$ ) ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h$ ) ดังนั้นความถูกต้องของคำตอบที่ผิวจึงมีความสำคัญกว่า ในการปรับค่าความหนาแน่นของเมชนั้นจึงได้พิจารณาเฉพาะบริเวณพื้นผิวตกกระทบ โดยกำหนด Growth Rate ของเมชเท่ากับ 1.3 ในทุกกรณีดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การสร้างเมชที่ความหนาแน่นบริเวณผิวที่ตกกระทบที่ต่างกัน

การตรวจสอบจะแบ่งความหนาแน่นของเมชเป็น 6 แบบจำลองตามความหนาแน่นเฉลี่ยทั้งหมดจากหยาบไปละเอียดดังนี้ (1) แบบจำลอง A มีความหนาแน่น 1.8149 เมช/mm<sup>2</sup> (2) แบบจำลอง B มีความหนาแน่น 2.4927 เมช/mm<sup>2</sup> (3) แบบจำลอง C มีความหนาแน่น 9.9792 เมช/mm<sup>2</sup> (4) แบบจำลอง D มีความหนาแน่น 19.7089 เมช/mm<sup>2</sup> (5) แบบจำลอง E มีความหนาแน่น 103.1767 เมช/mm<sup>2</sup> และ (6) แบบจำลอง F มีความหนาแน่น 209.3076 เมช/mm<sup>2</sup> รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.4 ถึง 3.7 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบของแบบจำลอง A, B, C, D, และ E กับแบบจำลอง F พบว่า แบบจำลอง E มีความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลอง F น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามที่ในการเลือกความหนาแน่นของเมชนั้นต้องคำนึงถึงการคำนวณสำหรับพื้นผิวฉนวน (ซีป) ด้วย โดยบริเวณพื้นผิวฉนวนจะมีความหนาแน่นของเมชสูงกว่าบริเวณอื่น

ซึ่งอาจส่งผลให้การคำนวณเกินขีดจำกัดของคอมพิวเตอร์ได้ เพราะฉะนั้นเราจึงเลือกแบบจำลอง E ซึ่งให้ค่า  $Nu_{ave}$  ต่างแบบจำลอง F ประมาณ 0.00% ในตารางที่ 3.4 และ 3.6 0.11% ในตารางที่ 3.5 และ 0.09% ในตารางที่ 3.7 แต่ใช้เวลาและหน่วยความจำในการคำนวณน้อยกว่า

**ตารางที่ 3.4** การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบเมื่อความหนาแน่นของเมชในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไป ที่เลข Reynolds เท่ากับ 2,000

Model	ขนาดของเมชที่ผิดพลาดกระทบ (mm)	จำนวนเมช	พื้นที่ ( $mm^2$ )	ความหนาแน่นเฉลี่ยของเมช (เมช/ $mm^2$ )	Mesh Quality	$Nu_{ave}$	RAM (GB)	เวลาที่ใช้ (s)	ผลต่างจาก F (%)
A	1	873	481	1.8149	0.6068	27.21	1.25	19	42.8346
B	0.5	1199	481	2.4927	0.6068	21.58	1.34	22	13.2808
C	0.1	4800	481	9.9792	0.5949	18.49	1.51	39	2.9396
D	0.05	9480	481	19.7089	0.5666	18.89	1.60	68	0.8399
E	0.01	49,628	481	103.1767	0.5416	19.05	1.89	328	0.0000
F	0.005	100,677	481	209.3076	0.4804	19.05	2.32	712	0.0000

**ตารางที่ 3.5** การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบเมื่อความหนาแน่นของเมชในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไป ที่เลข Reynolds เท่ากับ 4,000

Model	ขนาดของเมชที่ผิดพลาดกระทบ (mm)	จำนวนเมช	พื้นที่ ( $mm^2$ )	ความหนาแน่นเฉลี่ยของเมช (เมช/ $mm^2$ )	Mesh Quality	$Nu_{ave}$	RAM (GB)	เวลาที่ใช้ (s)	ผลต่างจาก F (%)
A	1	873	481	1.8149	0.6068	56.23	1.85	15	62.6084
B	0.5	1199	481	2.4927	0.6068	43.28	1.73	19	25.1591
C	0.1	4800	481	9.9792	0.5949	32.76	1.77	38	5.2732
D	0.05	9480	481	19.7089	0.5666	33.69	1.77	74	2.5737
E	0.01	49,628	481	103.1767	0.5416	34.62	2.02	375	0.1156
F	0.005	100,677	481	209.3076	0.4804	34.58	2.36	685	0.0000

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบเมื่อความหนาแน่นของเมชในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไป ที่เลข Reynolds เท่ากับ 6,000

Model	ขนาดของเมชที่ผิดพลาดกระทบ (mm)	จำนวนเมช	พื้นที่ (mm <sup>2</sup> )	ความหนาแน่นเฉลี่ยของเมช (เมช/mm <sup>2</sup> )	Mesh Quality	Nu <sub>ave</sub>	RAM (GB)	เวลาที่ใช้ (s)	ผลต่างจาก F (%)
A	1	873	481	1.8149	0.6068	85.88	1.82	14	75.9115
B	0.5	1199	481	2.4927	0.6068	65.13	1.74	20	33.4084
C	0.1	4800	481	9.9792	0.5949	46.06	1.70	40	5.6534
D	0.05	9480	481	19.7089	0.5666	46.46	1.73	72	4.8341
E	0.01	49,628	481	103.1767	0.5416	48.82	2.00	397	0.0000
F	0.005	100,677	481	209.3076	0.4804	48.82	2.36	685	0.0000

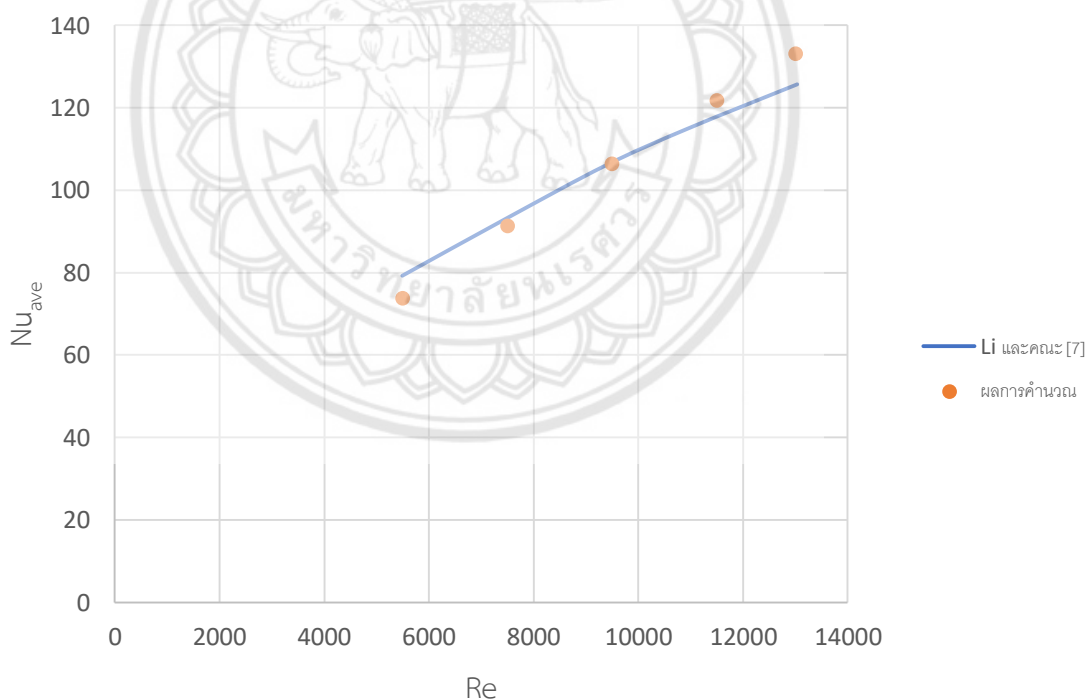
ตารางที่ 3.7 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบเมื่อความหนาแน่นของเมชในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไป ที่เลข Reynolds เท่ากับ 8,000

Model	ขนาดของเมชที่ผิดพลาดกระทบ (mm)	จำนวนเมช	พื้นที่ (mm <sup>2</sup> )	ความหนาแน่นเฉลี่ยของเมช (เมช/mm <sup>2</sup> )	Mesh Quality	Nu <sub>ave</sub>	RAM (GB)	เวลาที่ใช้ (s)	ผลต่างจาก F (%)
A	1	873	481	1.8149	0.6068	118.05	1.22	17	87.0839
B	0.5	1199	481	2.4927	0.6068	88.50	1.27	23	40.2535
C	0.1	4800	481	9.9792	0.5949	60.02	1.42	44	4.8811
D	0.05	9480	481	19.7089	0.5666	58.76	1.49	71	6.8779
E	0.01	49,628	481	103.1767	0.5416	63.04	1.65	367	0.0951
F	0.005	100,677	481	209.3076	0.4804	63.10	2.15	619	0.0000



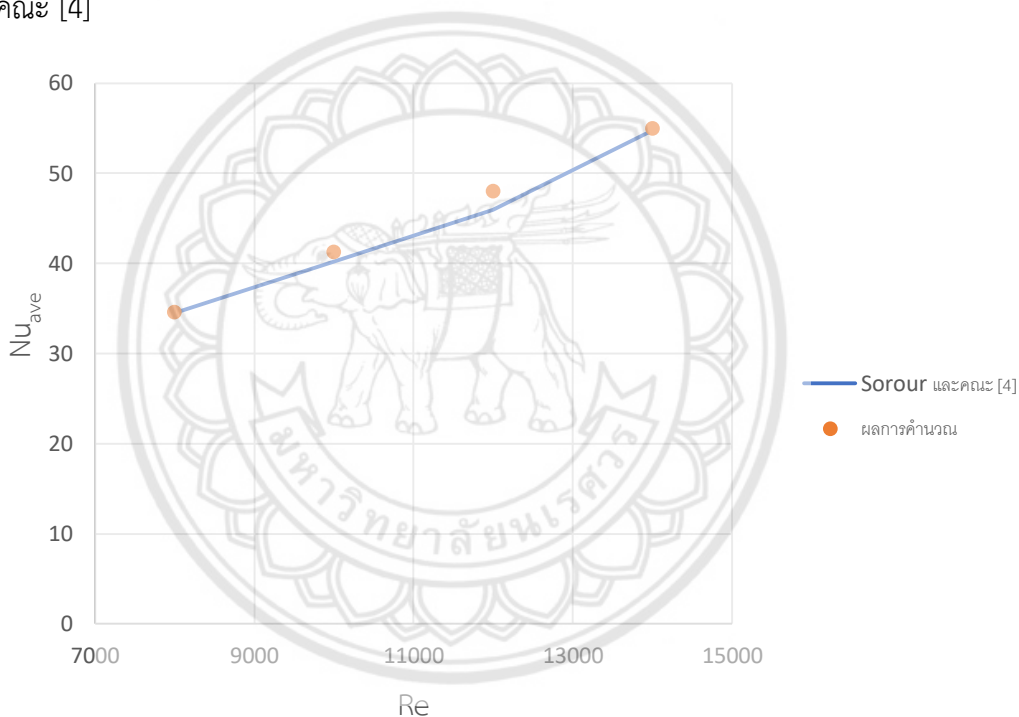
### 3.4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลจากงานวิจัยจากรณกรรม

การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลเป็นกระบวนการหนึ่งที่จะลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบงานและเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ด้วย จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลองของ Li และคณะ [7] ซึ่งใช้หัวฉีดเดี่ยวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm อัตราส่วนระหว่างระยะห่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $H/D_j$ ) = 3 อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของเรากำหนดขอบเขตดังนี้ อุณหภูมิที่ทางออกของหัวฉีดเท่ากับ 300 K พลังส์ความร้อนคงที่ที่ 497.636 kW/m<sup>2</sup> ที่เลข Reynolds ระหว่าง 2,000 ถึง 16,000 โดยใช้ น้ำ เป็นของไหลทำงาน ผลการเปรียบเทียบ พบว่าที่ Reynolds < 11,000 ให้ค่า Nu ที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Li และคณะ [7] คิดเป็น 7.1%, 2.2% และ 0.3% ที่ Re = 5,500, 7,500 และ 9,500 ตามลำดับ ซึ่งที่ Re = 9,500 มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เนื่องจากในการเปรียบเทียบเราใช้ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหา โดยกำหนดให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วนตามแบบจำลอง  $k - \epsilon$  ซึ่งเหมาะสมกับ Re ที่ไม่สูงนัก นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเมื่อ Re > 11,000 ผลต่างจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยที่ ที่ Re = 11,500 ให้ผลต่างคิดเป็น 3.3% และที่ Re = 13,000 ให้ 6.3%



รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเลข Nusselt ของการถ่ายเทความร้อนจากการตกกระทบของเจ็ทของน้ำลงบนพื้นผิวเรียบจากการคำนวณและผลการทดลอง [7]

นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบค่าของ Nusselt เหนือจากการคำนวณกับผลงานวิจัยของ Sorour และคณะ [4] โดยเลือกข้อมูลที่หัวฉีดเดี่ยวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm อัตราส่วนระหว่างระยะห่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด  $H/D_j = 0.5$  อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของเรา กำหนดขอบเขตดังนี้ อุณหภูมิที่ทางออกของหัวฉีดเท่ากับ 300 K พลักซ์ความร้อนคงที่ที่  $500 \text{ kW/m}^2$  ที่เลข Reynolds ระหว่าง 8,000 ถึง 14,000 โดยใช้ น้ำ เป็นของไหลทำงาน พบว่า ที่  $Re = 12,000$  ให้ ความคลาดเคลื่อนของ Nu ที่มากที่สุดคิดเป็น 4.48% และที่  $Re = 8,000, 10,000$  และ  $14,000$  พบว่า ให้ผลต่างคิดเป็น 0.44% 2.64% และ 0.51% ตามลำดับ และช่วง  $Re > 12,000$  พบว่าจะมีความคลาดเคลื่อนคิดเป็น 0.51% ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สังเกตได้ว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยแบบจำลอง  $k - \epsilon$  นั้นมีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sorour และคณะ [4]



รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเลข Nusselt ของการถ่ายเทความร้อนจากการตกกระทบของเจ็ทของน้ำลงบนพื้นผิวเรียบจากการคำนวณและผลการทดลอง [4]

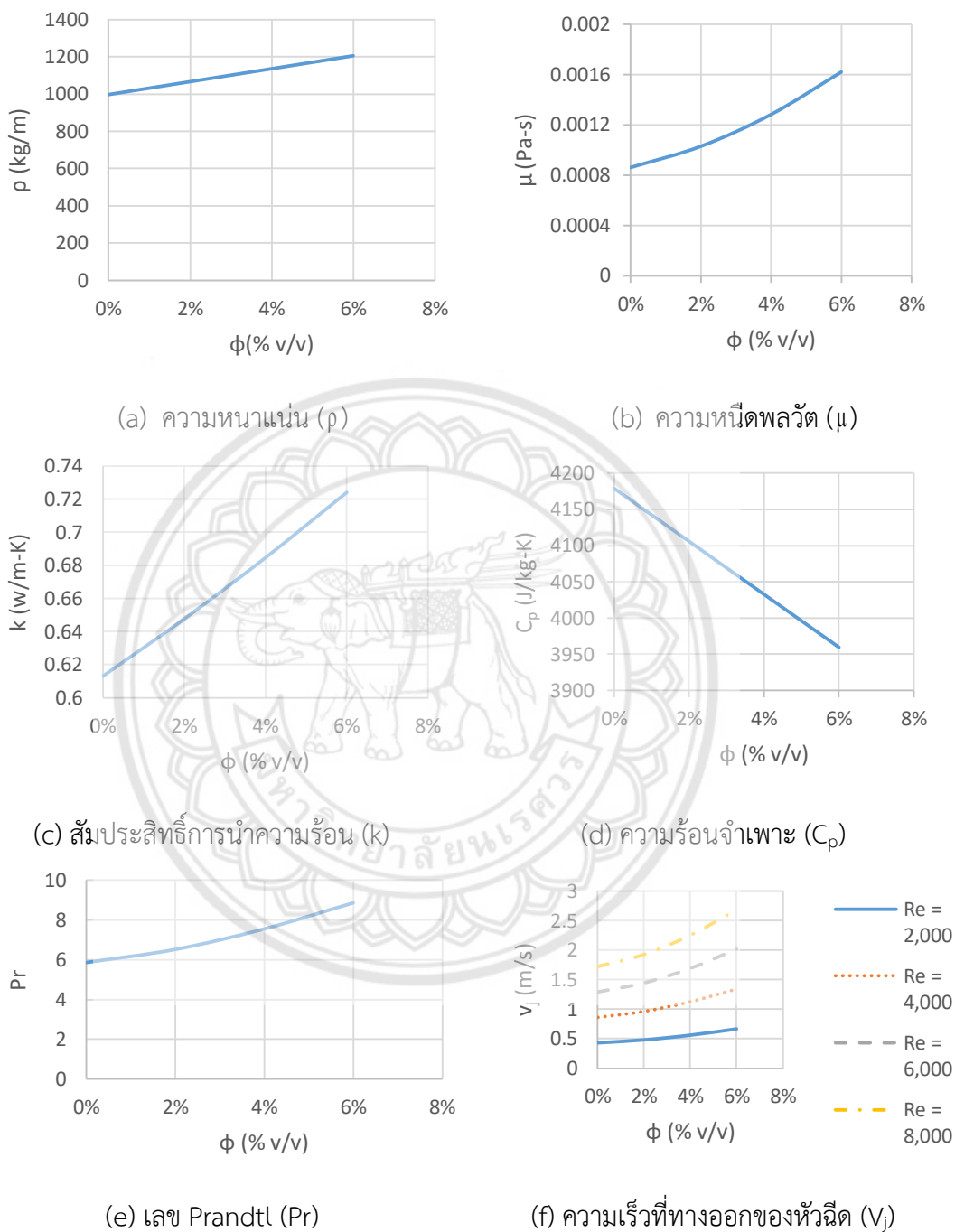
## บทที่ 4

### ผลการคำนวณ

บทนี้กล่าวถึงผลการคำนวณในรูปของการถ่ายเทความร้อนโดยแสดงผลในรูปของเลขไร้นาม Nusselt (Nu) ของการตกกระทบของเจ็ทลงบนพื้นผิวตกกระทบแบบเรียบและบนขีป โดยหัวฉีดหนึ่งหัวฉีด ดังแสดงในบทที่ 3 โดยกำหนดพลักซ์ความร้อนคงที่ที่  $500 \text{ kW/m}^2$  ในงานวิจัยนี้ใช้อนุภาคนาโนเป็นอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) โดยมีน้ำเป็นของไหลฐาน และศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้น ( $\phi$ ), เลข Reynolds (Re) และ อัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $H/D_j$ ) ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากการตกกระทบของเจ็ทที่ความเข้มข้น ( $\phi$ ) 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร ที่เลข Reynolds 2,000, 4,000, 6,000 และ 8,000 และ  $H/D_j$  ที่ 2, 3 และ 4

#### 4.1 ผลกระทบของความเข้มข้น ( $\phi$ )

ในหัวข้อนี้เราพิจารณาผลกระทบของความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทลงบนพื้นผิวเรียบและพื้นผิวขีป ในที่นี้เราติดตั้งหัวฉีดที่กึ่งกลางของแผ่นตกกระทบ โดยอาศัยสมบัติเชิงความร้อนของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ จะทำให้ความหนาแน่น ( $\rho$ ) ความหนืดพลวัต ( $\mu$ ) เลข Prandtl (Pr) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) และความเร็วที่ทางออกของหัวฉีด ( $V_j$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) มีค่าลดลง เนื่องจาก ความเข้มข้น ( $\phi$ ) ไปเปลี่ยนสมบัติของของไหลฐาน (น้ำ) ดังนั้นส่งผลให้เลข Prandtl (Pr) สูงขึ้น เมื่อความหนืดพลวัต ( $\mu$ ) และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่มากกว่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) ที่มีค่าลดลง นอกจากนี้ความเร็วที่ทางออกของหัวฉีด ( $V_j$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $D_j$ ) คงที่ที่ 4 mm และ Re คงที่ที่ 2,000, 4,000, 6,000 และ 8,000 จึงพบว่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) และความหนืดพลวัต ( $\mu$ ) มีอัตราการเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบเลข Reynolds ต่างๆ ที่ความเข้มข้น 6% v/v พบว่า ที่  $Re = 8,000$  ให้ค่าความเร็วที่ทางออกของหัวฉีด ( $V_j$ ) สูงสุดเมื่อเทียบกับน้ำ โดยคิดเป็น 55.33% และที่ความเข้มข้น 2% และ 4% v/v เพิ่มขึ้น คิดเป็น 11.67% และ 30.53% ตามลำดับ



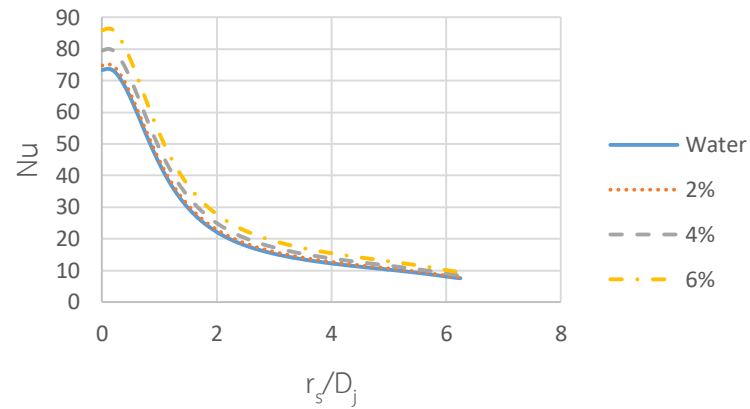
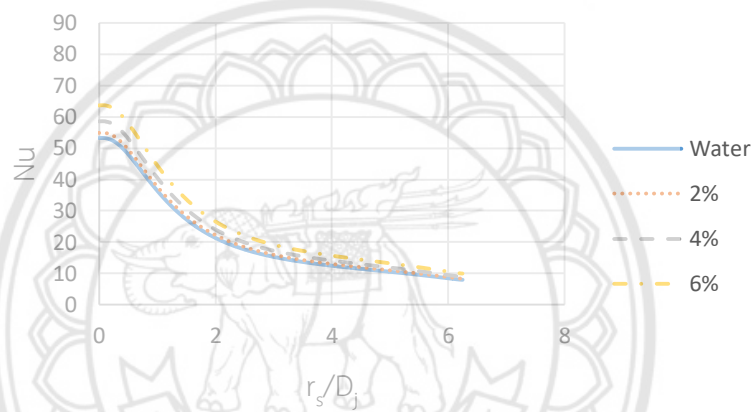
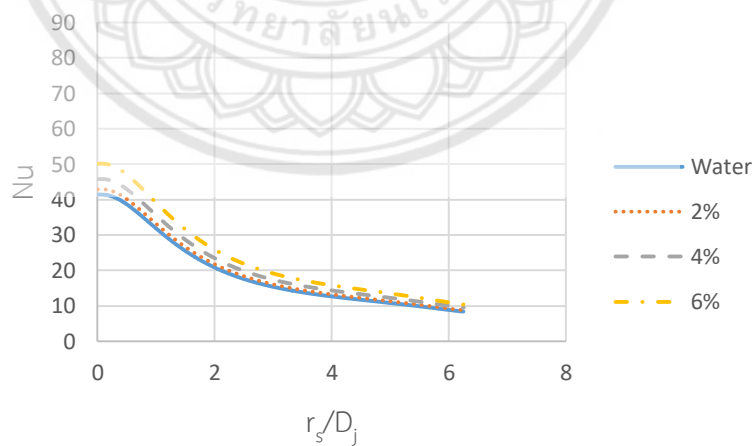
รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงความร้อนของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ

#### 4.1.1 กรณีพื้นผิวตกกระทบเป็นผิวเรียบ

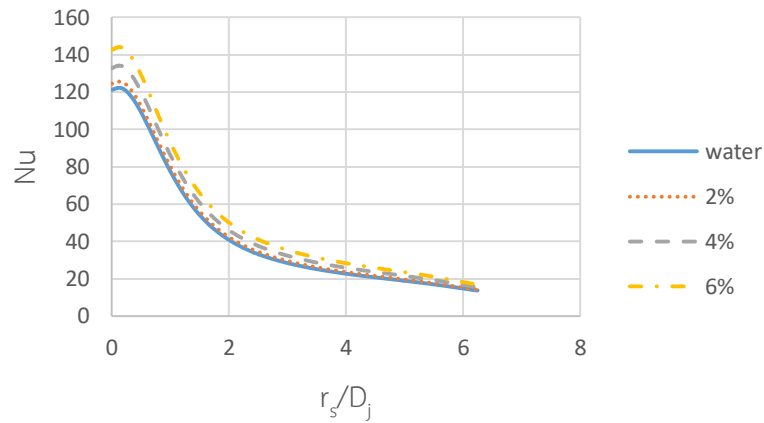
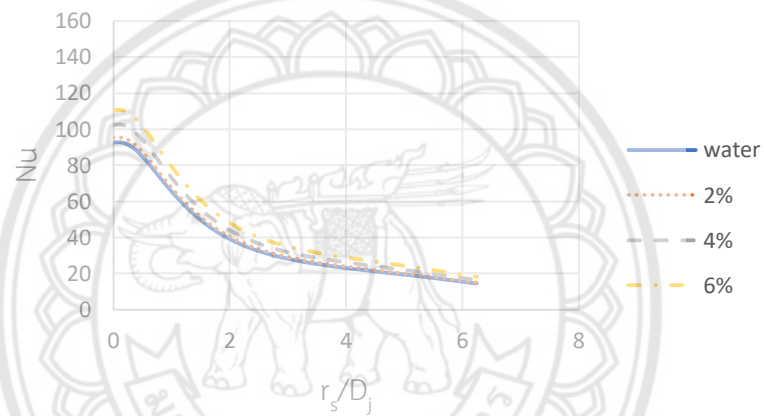
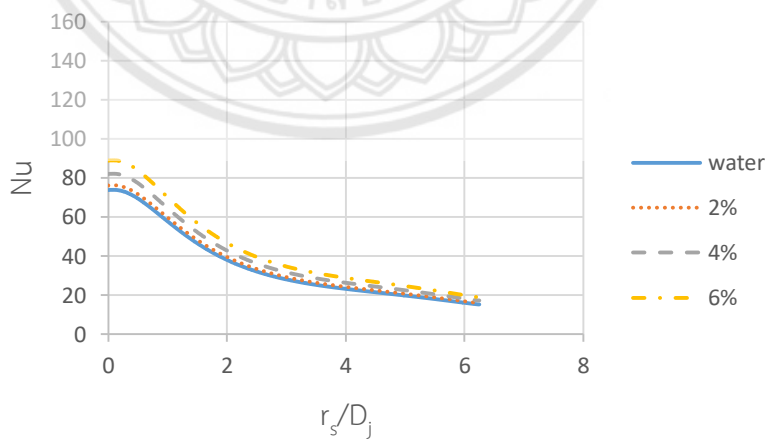
หัวข้อนี้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทของของไหลนาโนลงบนพื้นผิวเรียบ โดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของอนุภาคนาโนระหว่าง 0 ถึง 6% โดยปริมาตร การถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปของ  $Nu$  ที่ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นผิว และที่เลข Reynolds ต่างๆ โดยกำหนดอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ ( $H/D_j$ ) เท่ากับ 2, 3 และ 4 และให้มีฟลักซ์ความร้อนในระหว่างที่  $r_s/D_j = 0$  ถึง 6.25 สำหรับพื้นผิวเรียบ

รูปที่ 4.2 ถึง 4.5 แสดง Local Nusselt Number ของน้ำและของไหลนาโนของ  $TiO_2$  บนพื้นผิวเรียบ สำหรับ  $H/D_j = 2, 3$  และ 4 โดยกำหนดให้  $Re$  คงที่ ที่ 2,000, 4,000, 6,000 และ 8,000 พบว่าที่  $\phi = 6\% v/v$  ให้ค่า  $Nu$  สูงกว่า  $\phi = 4\%, 2\% v/v$  และน้ำ ในทุกกรณี เนื่องจาก  $\phi$  ไปเปลี่ยนสมบัติเชิงความร้อนของของไหลฐาน (น้ำ) ทำให้ความหนาแน่น ( $\rho$ ) ความหนืดพลวัต ( $\mu$ ) และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อค่า  $\phi$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น เมื่อพิจารณา  $H/D_j = 2$  ที่  $Re = 2,000, 4,000, 6,000$  และ 8,000 พบว่า  $Nu$  สูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง  $r_s/D_j = 0.115$  เนื่องจากอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าน้อย ทำให้ระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบมีระยะที่แคบ เมื่อของไหลนาโนไหลออกจากหัวฉีดจึงเกิดการผลึกกันของของไหลนาโนเพื่อให้อยู่ห่างออก ทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุดไม่ได้เกิดขึ้นที่ตำแหน่งตกกระทบที่  $r_s/D_j = 0$  นอกจากนี้ที่  $H/D_j = 3$  และ 4 ให้ค่า  $Nu$  สูงสุดที่บริเวณจุดตกกระทบ  $r_s/D_j = 0$  เนื่องจากที่จุดตกกระทบจะมีการถ่ายเทโมเมนตัมสูงสุด

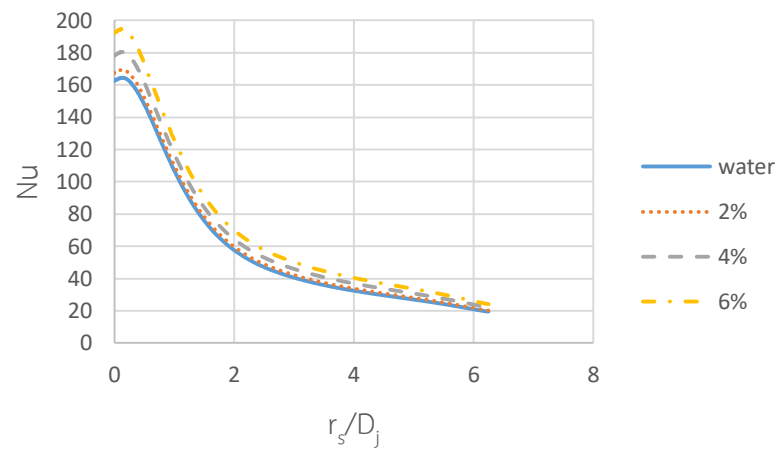
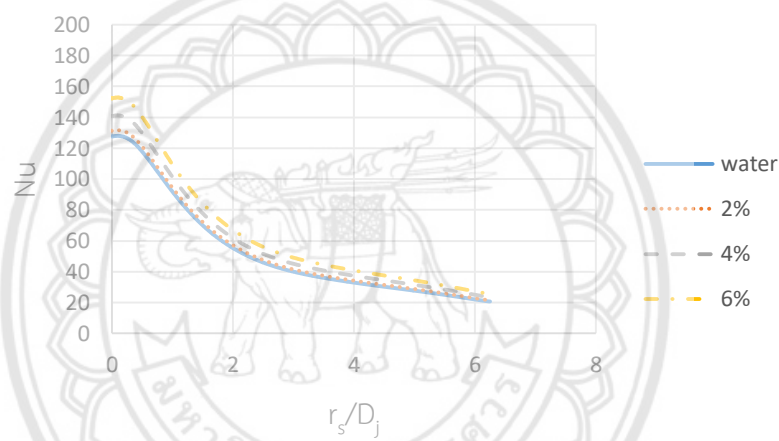
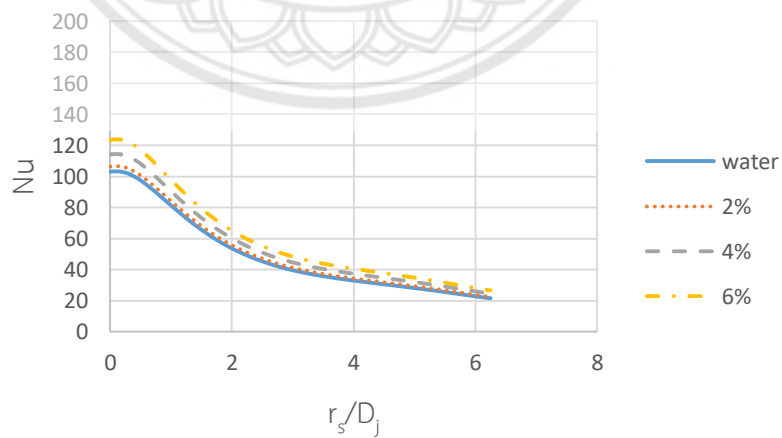
รูปที่ 4.6 แสดง  $Nu_{ave}$  สำหรับน้ำและของไหลนาโนของ  $TiO_2$  บนพื้นผิวเรียบ ที่  $Re = 2,000, 4,000, 6,000$  และ 8,000 เมื่อกำหนดให้  $H/D_j = 2, 3$  และ 4 พบว่าทุกความเข้มข้นให้ค่า  $Nu_{ave}$  สูงกว่าน้ำ โดยที่  $\phi = 6\% v/v$  จะให้ค่า  $Nu_{ave}$  สูงที่สุด รองลงมาเป็นที่  $\phi = 4\%$  และ  $2\% v/v$  ตามลำดับ เนื่องจาก  $\phi$  ไปเปลี่ยนสมบัติของของไหลฐาน (น้ำ) ให้ความหนาแน่น ( $\rho$ ) ความหนืดพลวัต ( $\mu$ ) และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) เพิ่มขึ้น ดังนั้นของไหลนาโนของ  $TiO_2$  ให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าน้ำ เมื่อพิจารณา  $\phi = 2\% v/v$  พบว่ามีค่ามากกว่าน้ำประมาณ 3-4% เมื่อพิจารณา  $Re$  ที่  $H/D_j = 2, 3$  และ 4 พบว่า ที่  $Re = 8,000$  ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด ตามมาด้วย  $Re = 6,000, 4,000$  และ 2,000 ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณโมเมนตัมจากมากไปหาน้อยตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบ  $Nu_{ave,nf}/Nu_{ave,water}$  ดังแสดงในตารางที่ 4.1

(a)  $H/D_j = 2$ (b)  $H/D_j = 3$ (c)  $H/D_j = 4$ 

**รูปที่ 4.2** การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกกระทบแบบเรียบที่เลข Reynolds เท่ากับ 2,000

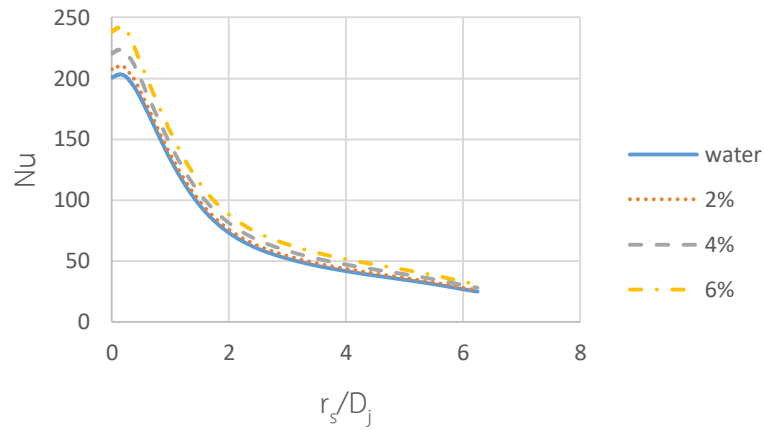
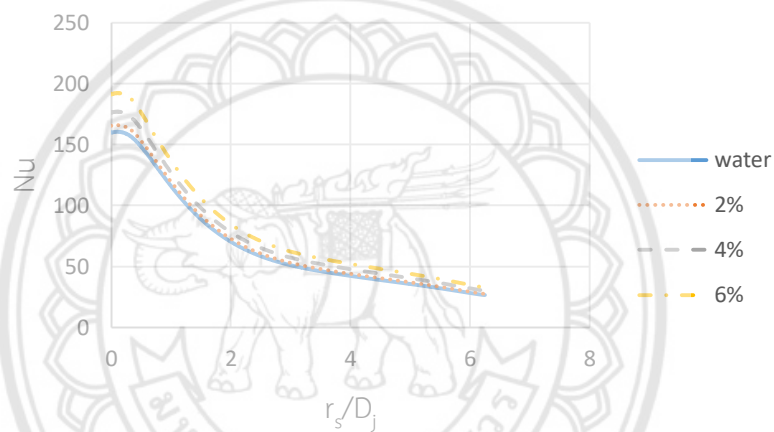
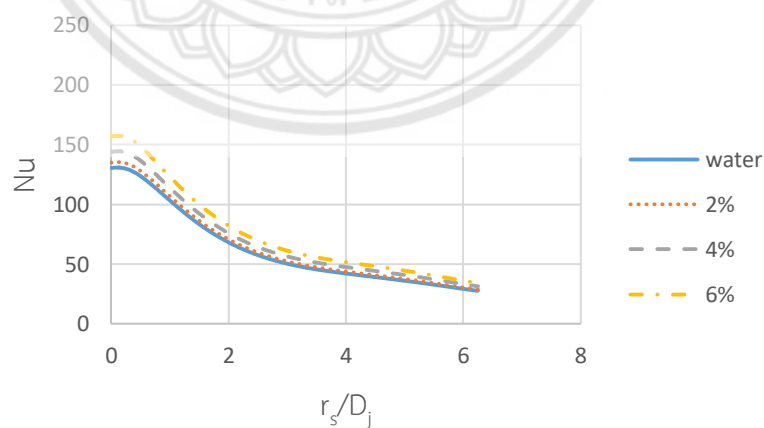
(a)  $H/D_j = 2$ (b)  $H/D_j = 3$ (c)  $H/D_j = 4$ 

**รูปที่ 4.3** การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกระทบแบบเรียบที่เลข Reynolds เท่ากับ 4,000

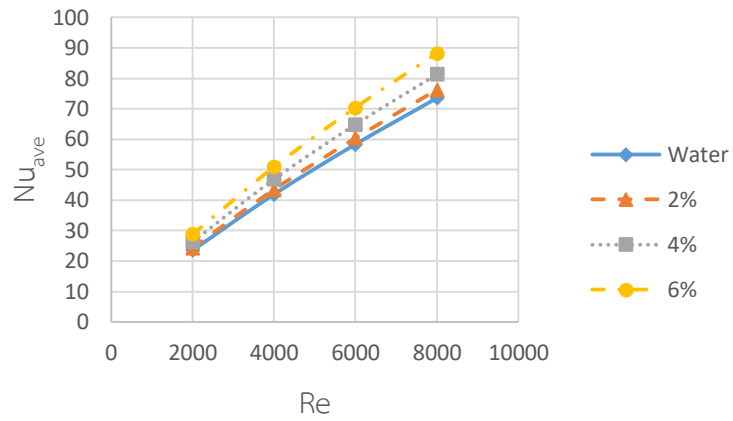
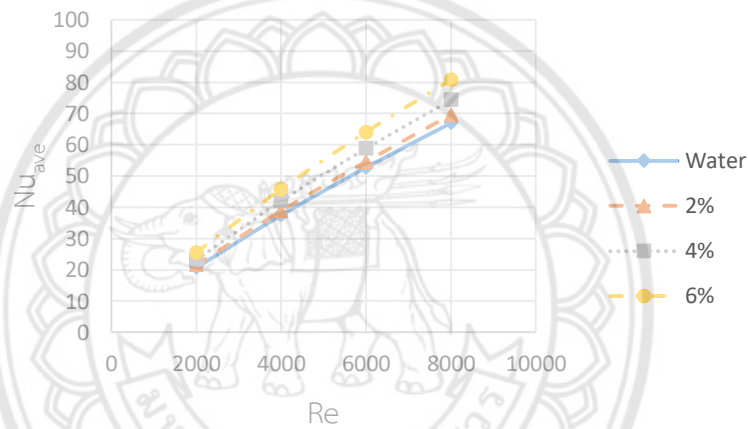
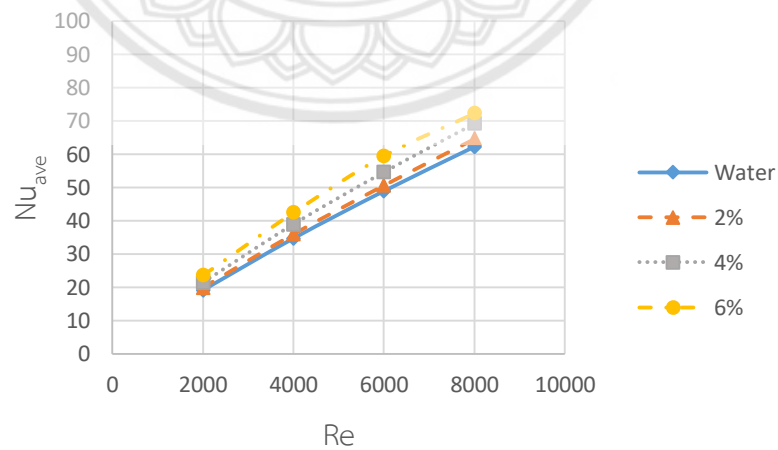
(a)  $H/D_j = 2$ (b)  $H/D_j = 3$ (c)  $H/D_j = 4$ 

**รูปที่ 4.4** การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกกระทบแบบเรียบที่เลข Reynolds เท่ากับ 6,000



(a)  $H/D_j = 2$ (b)  $H/D_j = 3$ (c)  $H/D_j = 4$ 

**รูปที่ 4.5** การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกกระทบแบบเรียบที่เลข Reynolds เท่ากับ 8,000

(a)  $H/D_j = 2$ (b)  $H/D_j = 3$ (c)  $H/D_j = 4$ 

**รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับเลข Reynolds ที่อัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิว ตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $H/D_j$ ) ต่างๆ กรณีพื้นผิวเรียบ

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่า Nu เฉลี่ยของของไหลนาโนกับน้ำกรณิพื้นผิวเรียบ

H/D <sub>j</sub>	Re	Nu <sub>ave,nf</sub> /Nu <sub>ave,water</sub>		
		φ = 2%	φ = 4%	φ = 6%
2	2000	1.0301	1.1145	1.2222
	4000	1.0351	1.1178	1.2132
	6000	1.0336	1.1110	1.2051
	8000	1.0366	1.1060	1.1983
3	2000	1.0391	1.1197	1.2321
	4000	1.0365	1.1224	1.2217
	6000	1.0351	1.1157	1.2139
	8000	1.0384	1.1107	1.2070
4	2000	1.0394	1.1207	1.2341
	4000	1.0370	1.1237	1.2242
	6000	1.0358	1.1176	1.2179
	8000	1.0391	1.1128	1.1629

#### 4.1.2 กรณิพื้นผิวตกรหบเป็นผิวเรียบ

หัวข้อนี้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนของการตกรหบของเจ็ทของอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ลงบนพื้นผิวเรียบซึ่งมีขนาดเท่ากับชิปคอมพิวเตอร์ โดยใช้หนึ่งหัวฉีดและความเข้มข้น (φ) ของ TiO<sub>2</sub> ระหว่าง 0 ถึง 6% v/v การถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปของ Local Nu ที่ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นผิว โดยกำหนดให้มีฟลักซ์ความร้อนที่ชิปในระยระหว่าง  $r_s/D_j = 0$  ถึง 2.2875 และที่บริเวณผิวเรียบ  $r_s/D_j > 2.2875$  จนถึงทางออกจะไม่มีฟลักซ์ความร้อนแต่กำหนดเป็นฉนวนแทน

รูปที่ 4.7 ถึง 4.10 แสดง Local Nusselt Number ของน้ำและของไหลนาโนของ TiO<sub>2</sub> บนพื้นผิวเรียบ สำหรับ φ = 2%, 4% และ 6% v/v โดยที่ Re = 2,000, 4,000, 6,000 และ 8,000 ตามลำดับ พบว่าทุกค่า φ ให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าน้ำ โดยที่ φ = 6% v/v ให้ค่า Nu สูงที่สุด รองลงมาเป็น φ = 4% และ 2% v/v ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งของชิปที่  $r_s/D_j = 0$  ถึง 2.2875 ค่า Nu มีค่าลดลง เนื่องจากบริเวณนี้ มีการให้ ฟลักซ์ความร้อนคงที่ เมื่อของไหลนาโนตกรหบลงบนชิปจะทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิว (T<sub>s</sub>) กับอุณหภูมิที่ทางออกของหัวฉีด (T<sub>j</sub>) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนลดลง และที่บริเวณขอบของชิปจนถึงบริเวณทางออกของ

พื้นผิว  $r_s/D_j > 2.2875$  ไม่มีการให้ฟลักซ์ความร้อนแต่กำหนดให้เป็นฉนวน จึงทำให้ผลต่างของ  $T_s - T_j$  ค่าน้อยกว่าบริเวณชิป ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นจากบริเวณขอบชิปไปจนถึงที่ทางออกของพื้นผิว

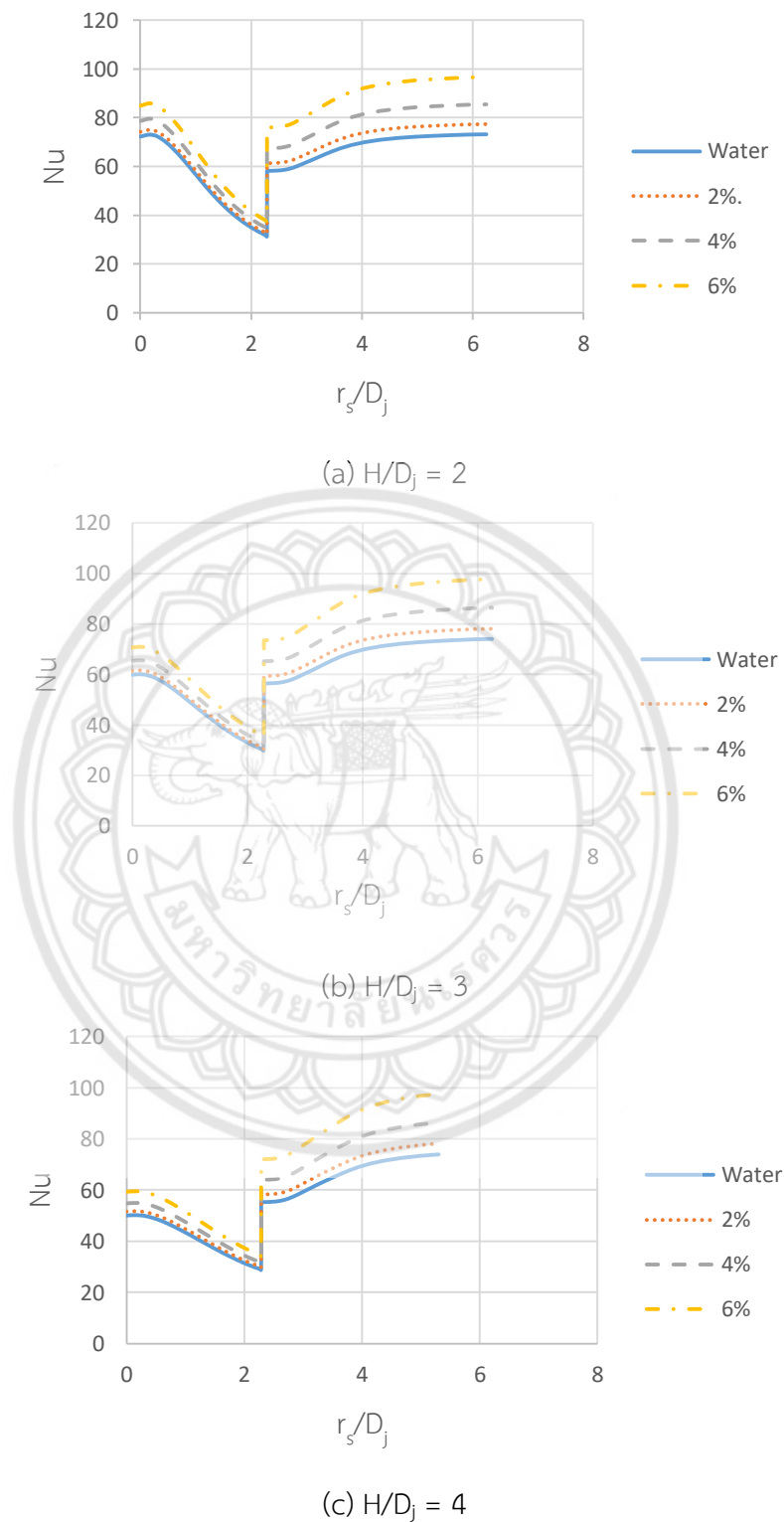
เมื่อพิจารณา  $H/D_j = 2$  พบว่า  $Nu$  สูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง  $r_s/D_j = 0.1725$  ที่ทุกค่าของ  $Re$  แทนที่จะเป็นที่  $r_s/D_j = 0$  เนื่องจากระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบแคบ เมื่อของไหลไหลออกจากหัวฉีดจึงเกิดการปลักกันอย่างรุนแรงไปยังทางออก ทำให้จุดสูงสุดของ  $Nu$  ไม่ได้เกิดขึ้นที่ตำแหน่งตกกระทบ  $r_s/D_j = 0$  เหมือนกับที่ค่า  $H/D_j = 3$  และ  $4$

รูปที่ 4.11 แสดง  $Nu_{ave}$  สำหรับน้ำและของไหลนาโนของ  $TiO_2$  บนพื้นผิวเรียบ ที่  $Re = 2,000, 4,000, 6,000$  และ  $8,000$  เมื่อกำหนดให้  $H/D_j = 2, 3$  และ  $4$  พบว่า ผลการเปรียบเทียบคล้ายคลึงกับกรณีพื้นผิวเรียบในรูปที่ 4.6 โดยทุกความเข้มข้นให้ค่า  $Nu_{ave}$  สูงกว่าน้ำ โดยที่  $\phi = 6\% v/v$  จะให้ค่า  $Nu_{ave}$  สูงที่สุด รองลงมาเป็นที่  $\phi = 4\%$  และ  $2\% v/v$  ตามลำดับ เนื่องจาก  $\phi$  ไปเปลี่ยนสมบัติของของไหลฐาน (น้ำ) ให้ความหนาแน่น ( $\rho$ ) ความหนืดพลวัต ( $\mu$ ) และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา  $\phi = 2\% v/v$  พบว่า  $Nu_{ave}$  มีค่ามากกว่าน้ำประมาณ 2-3% เมื่อพิจารณา  $Re$  ที่  $H/D_j = 2, 3$  และ  $4$  พบว่า ที่  $Re = 8,000$  ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด ตามมาด้วย  $Re = 6,000, 4,000$  และ  $2,000$  ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณโมเมนตัมจากมากไปหาน้อยตามลำดับ ดังแสดงในรูปอัตราส่วนของ  $Nu_{ave,nf}/Nu_{ave,water}$  ในตารางที่ 4.2

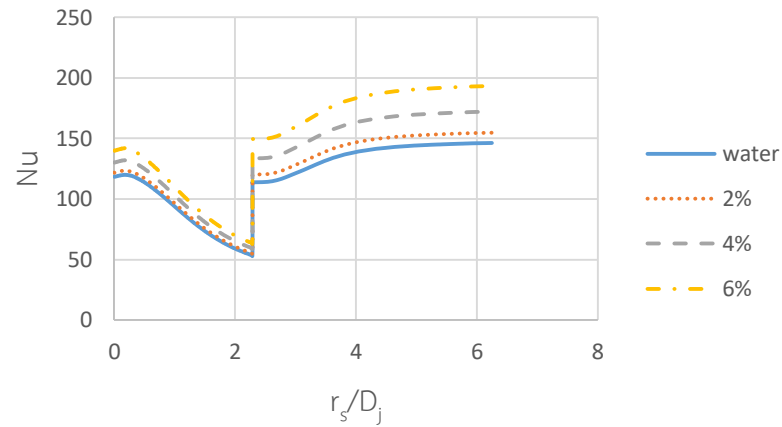
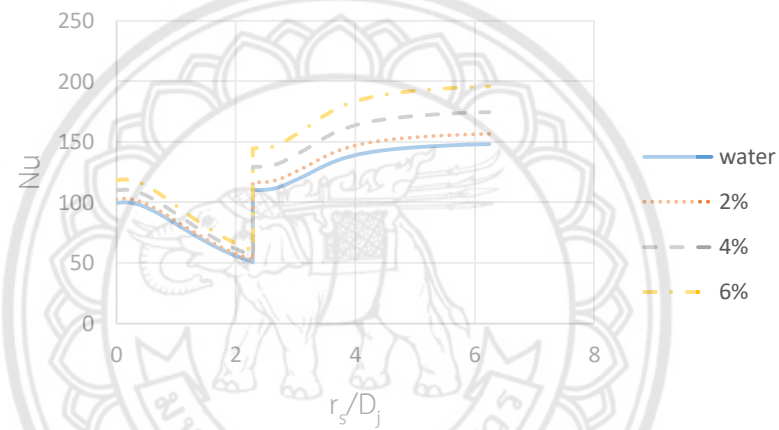
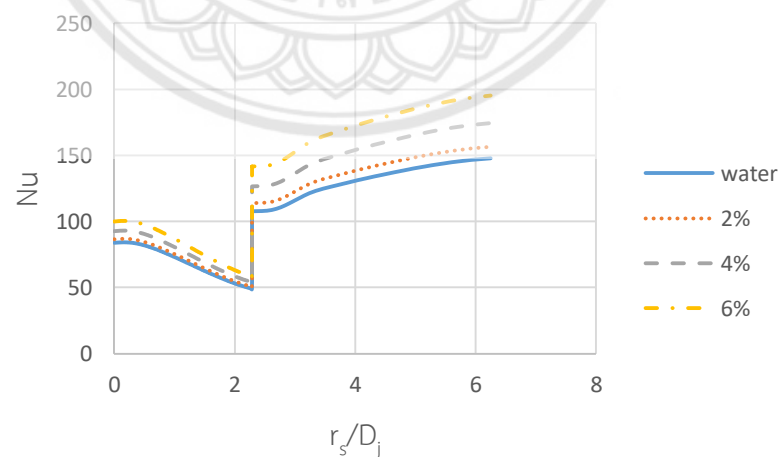
รูปที่ 4.12 แสดง Local Nusselt Number ของพื้นผิวเรียบเทียบกับพื้นผิวเรียบ พบว่าค่า  $Nu$  ของพื้นผิวเรียบมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงบริเวณทางออกของพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 4.13 ในขณะที่ค่า  $Nu$  ของพื้นผิวเรียบมีค่าลดลงที่บริเวณชิป และเพิ่มขึ้นจนถึงบริเวณทางออกของพื้นผิว เนื่องจากพื้นผิวเรียบเกิด Turbulence สูงกว่าพื้นผิวเรียบ ส่งผลมาจากชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้นหลังตกกระทบของพื้นผิวเรียบเกิดการถูกรบกวนที่ตำแหน่ง  $r_s/D_j > 2.2875$  นอกจากนี้ ที่บริเวณนี้ของพื้นผิวเรียบกำหนดให้มีการหุ้มฉนวน ทำให้ผลต่างของอุณหภูมิ ( $\Delta T = T_s - T_j$ ) มีค่าน้อยกว่า  $\Delta T$  ของพื้นผิวเรียบ ในขณะที่ฟลักซ์ความร้อนมีค่าคงที่ ( $500 \text{ kW/m}^2$ ) ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณนี้ของพื้นผิวเรียบเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง  $r_s/D_j = 2.2875$  พบว่า  $Nu$  ของพื้นผิวเรียบให้ค่าสูงกว่า  $Nu_{flat}$  ประมาณ 45.87% เนื่องจากเกิดการไหลทุติยภูมิ (Secondary Flow) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งเกิดจากของไหลตกกระทบลงบนพื้นผิวตกกระทบ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหลจึงเกิดกระแสหมุนวนที่ขอบชิปและของไหลหลังตกกระทบยังไหลผ่าน Secondary Flow ไปยังทางออกของพื้นผิว ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนบริเวณขอบชิปมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า Nu เฉลี่ยของของไหลนาโนกับน้ำกรณิพื้นผิวขุ่น

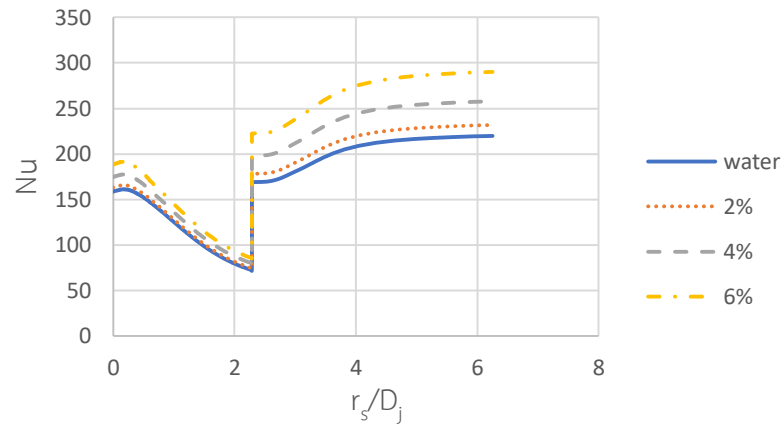
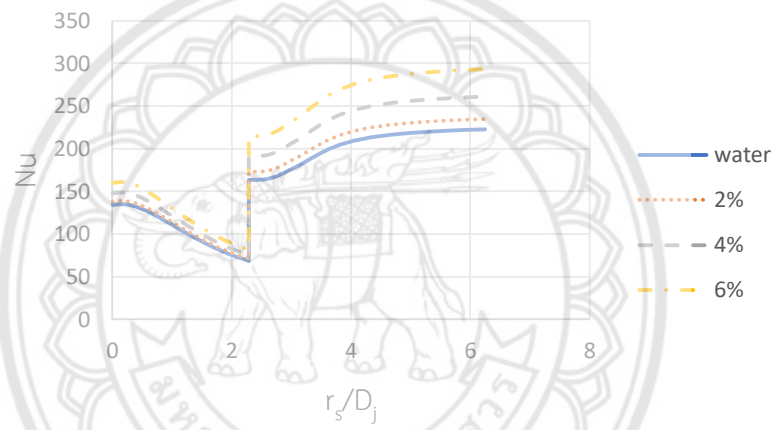
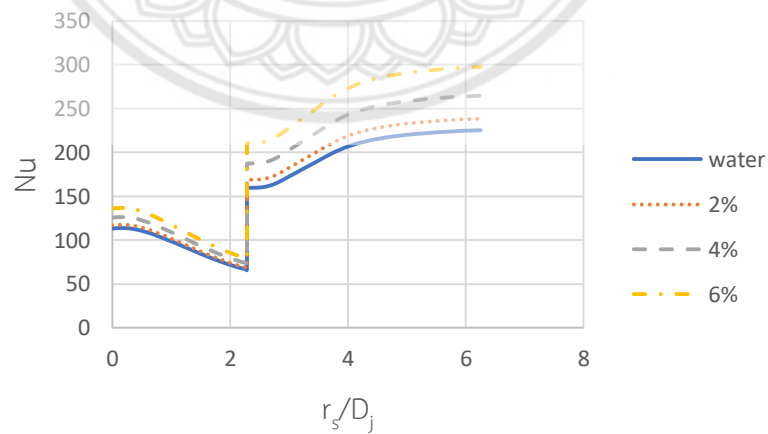
H/D <sub>j</sub>	Re	Nu <sub>ave,nf</sub> /Nu <sub>ave,water</sub>		
		φ = 2%	φ = 4%	φ = 6%
2	2000	1.0274	1.0903	1.1788
	4000	1.0277	1.0972	1.1766
	6000	1.0269	1.0918	1.1701
	8000	1.0256	1.0838	1.1616
3	2000	1.0287	1.0933	1.1846
	4000	1.0294	1.1020	1.1859
	6000	1.0296	1.0991	1.1830
	8000	1.0281	1.0904	1.1727
4	2000	1.0292	1.0950	1.1874
	4000	1.0300	1.1040	1.1902
	6000	1.0302	1.1018	1.1894
	8000	1.0296	1.0963	1.1822



**รูปที่ 4.7** การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกระทบแบบนูนที่เลข Reynolds เท่ากับ 2,000

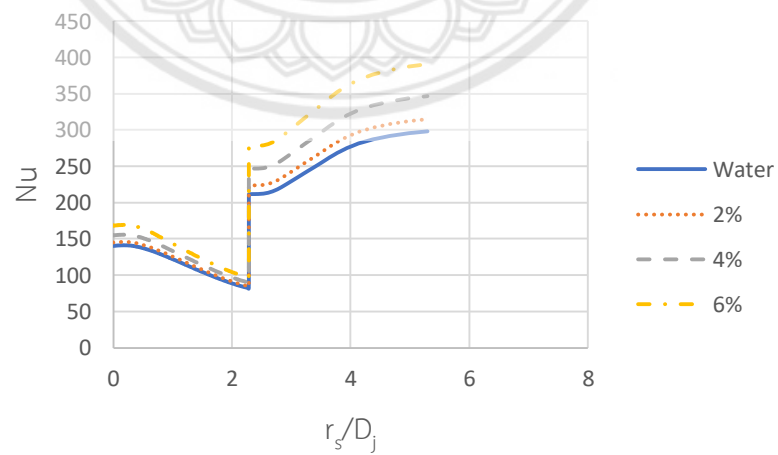
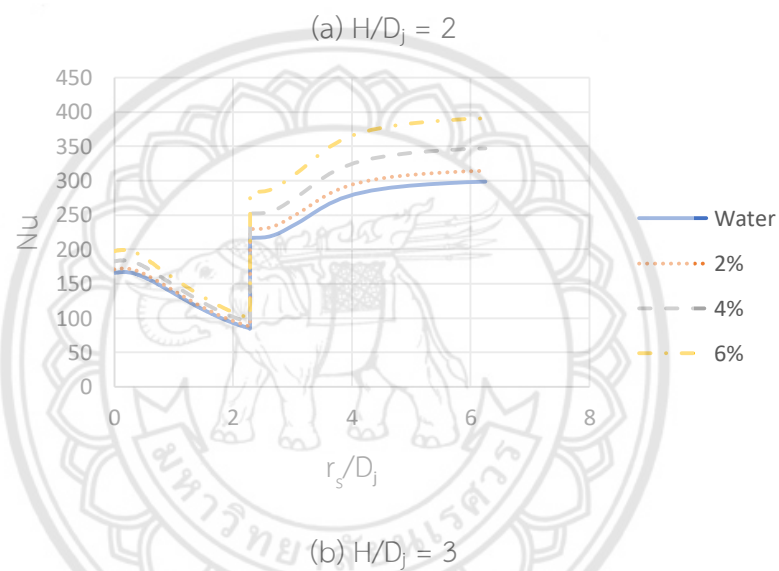
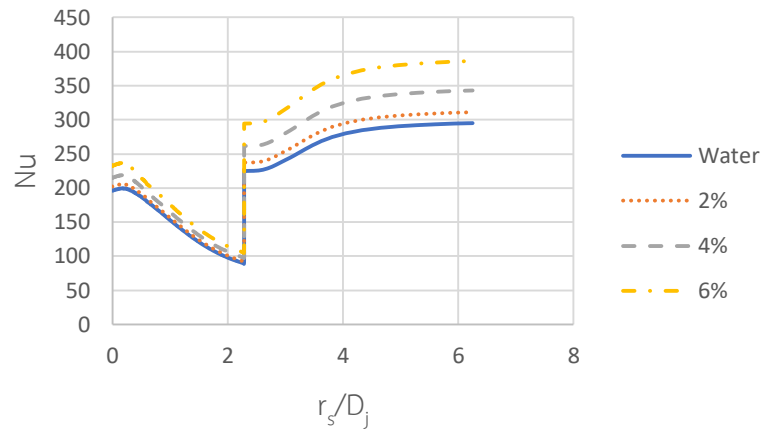
(a)  $H/D_j = 2$ (b)  $H/D_j = 3$ (c)  $H/D_j = 4$ 

**รูปที่ 4.8** การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกระทบแบบนูนที่เลข Reynolds เท่ากับ 4,000

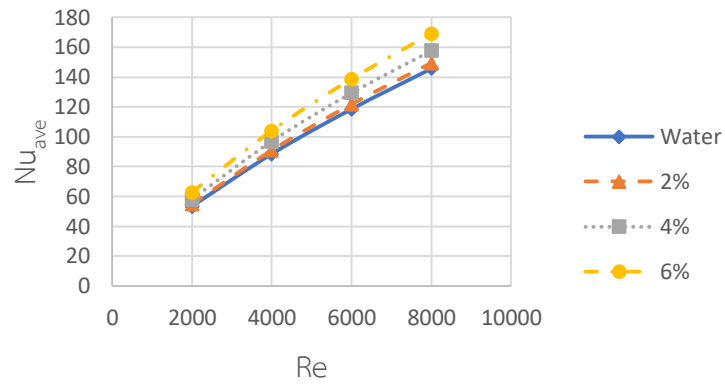
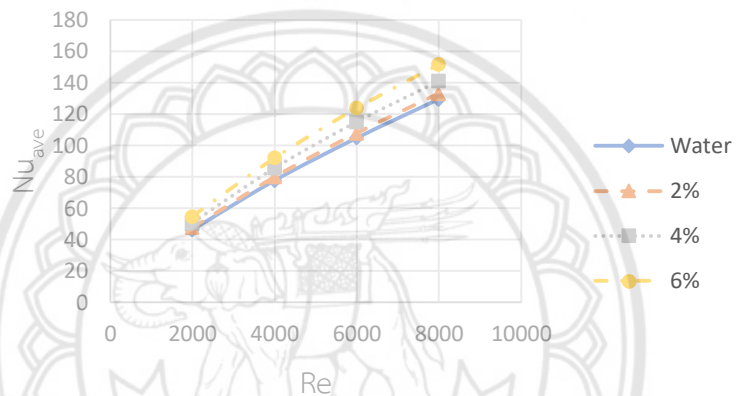
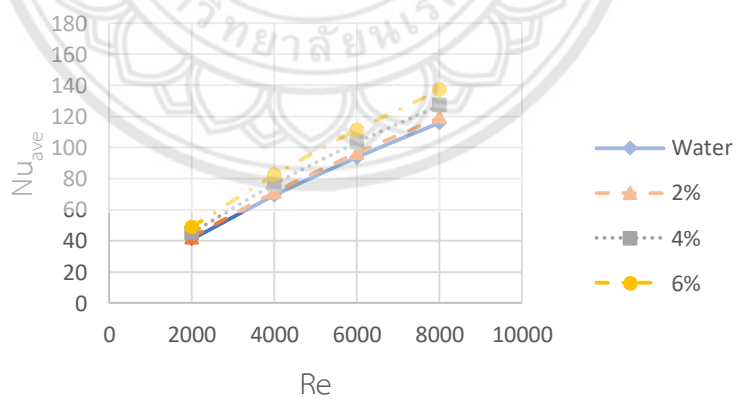
(a)  $H/D_j = 2$ (b)  $H/D_j = 3$ (c)  $H/D_j = 4$ 

**รูปที่ 4.9** การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกระทบแบบหมุนที่เลข Reynolds เท่ากับ 6,000

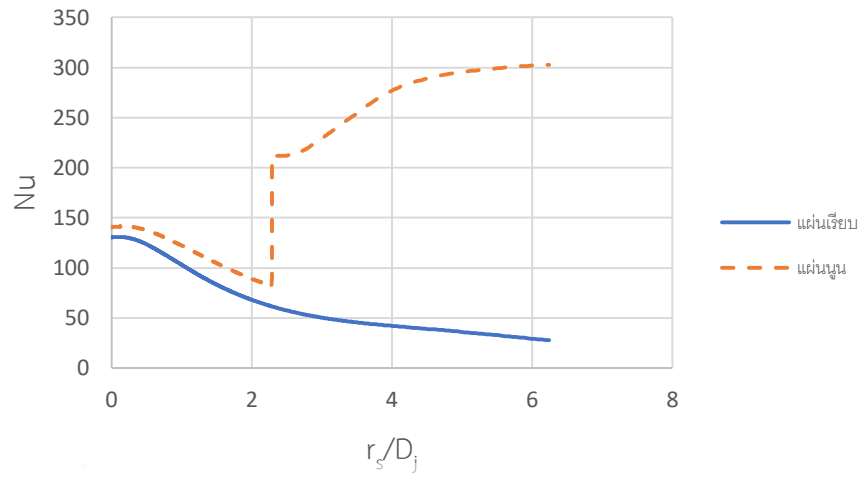




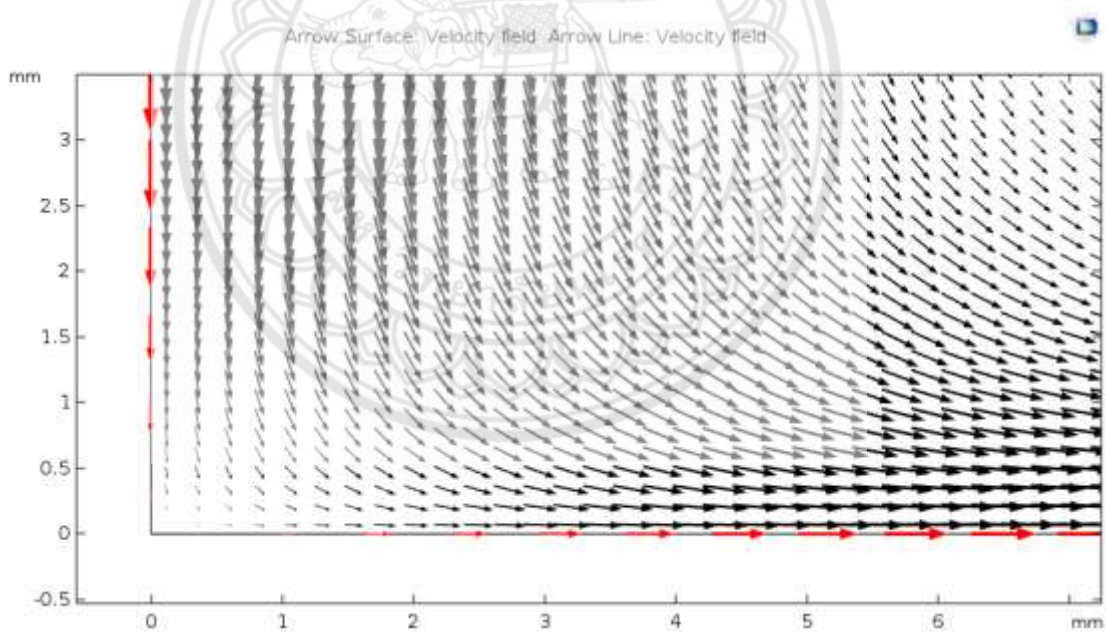
**รูปที่ 4.10** การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตร บนผิวตกระทบแบบนูนที่เลข Reynolds เท่ากับ 8,000

(a)  $H/D_j = 2$ (b)  $H/D_j = 3$ (c)  $H/D_j = 4$ 

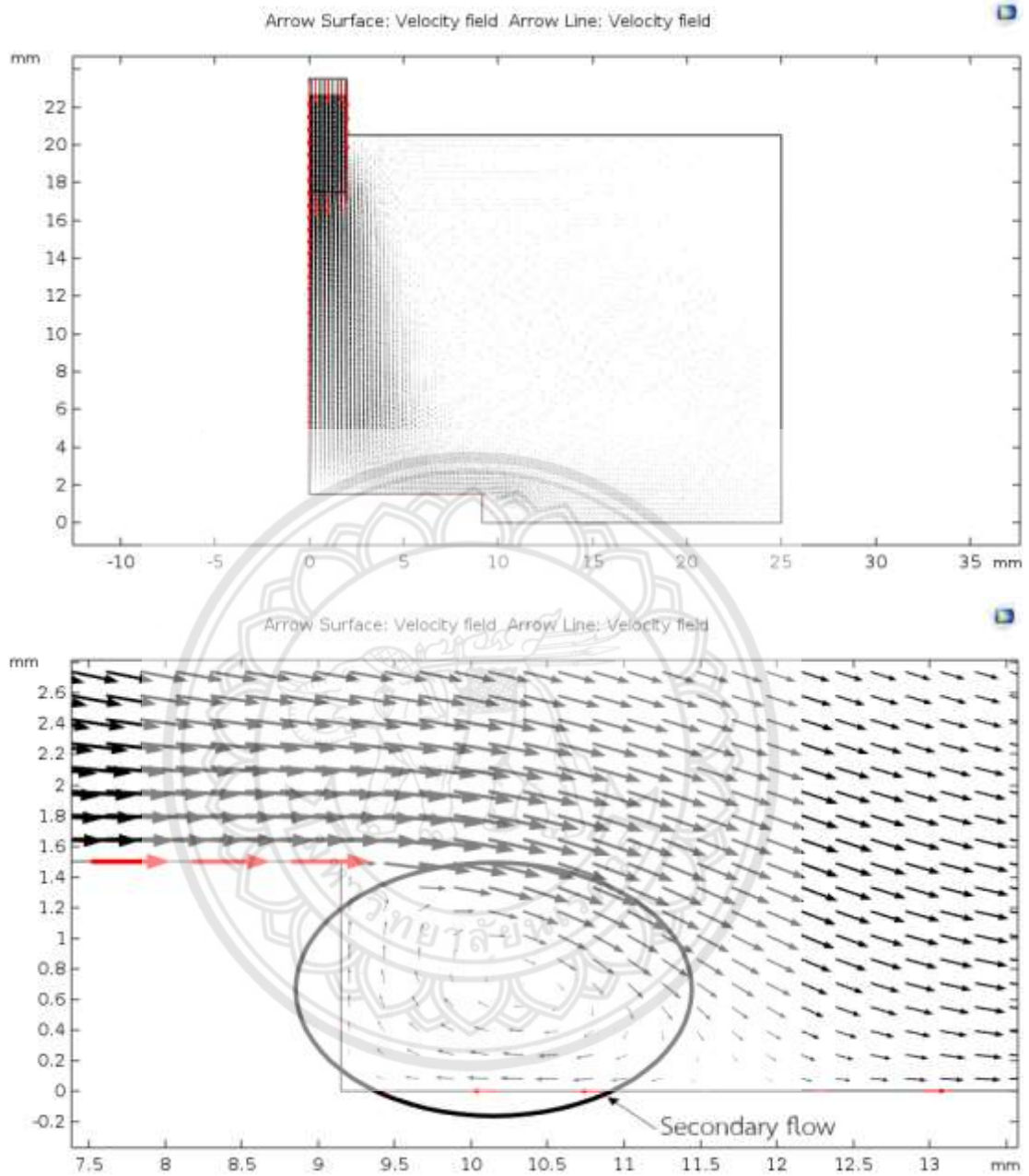
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับเลข Reynolds ที่อัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $H/D_j$ ) ต่างๆ กรณีพื้นผิวเรียบ



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่า Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูนของของไหลฐานที่  $H/D_j = 4$  กรณี  $Re = 8,000$



รูปที่ 4.13 การแสดงการไหลในรูปของ Vector plot ของพื้นผิวเรียบที่  $H/D_j = 4$ ,  $Re = 8,000$



รูปที่ 4.14 การแสดงการไหลในรูปของ Vector plot ของพื้นผิววงนที่  $H/D_j = 4$  กรณี  $Re = 8,000$

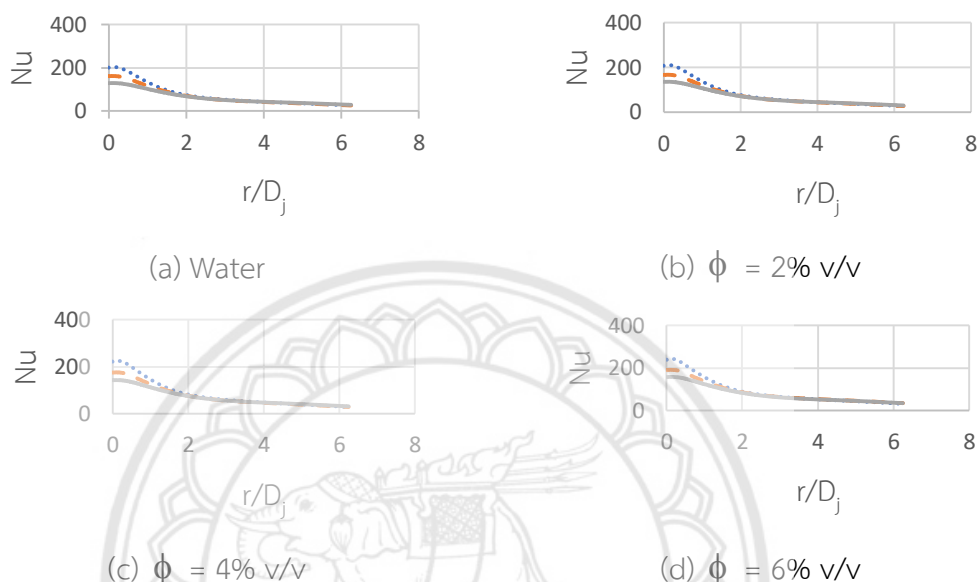
## 4.2 ผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $H/D_j$ )

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $H/D_j$ ) ที่ค่า 2, 3 และ 4 ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทของของไหลนาโนลงบนพื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระ ซึ่งพื้นผิวขรุขระมีขนาดเท่ากับชิปคอมพิวเตอร์ โดยใช้หนึ่งหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm ติดตั้งที่ด้านบนที่ระยะห่างขึ้นอยู่กับการ  $H/D_j$  โดยวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด การถ่ายเทความร้อนแสดงในรูป Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) และ Nusselt เฉลี่ย (Average Nusselt Number) โดยพื้นผิวเรียบกำหนดให้มีฟลักซ์ความร้อนตลอดพื้นผิวตกกระทบเป็นระยะ  $r/D_j = 6.25$  และพื้นผิวขรุขระกำหนดให้มีฟลักซ์ความร้อนที่ระยะ  $r/D_j = 0$  ถึง 2.2875 ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับที่วางชิปและที่  $r/D_j > 2.2875$  จนถึงทางออกจะไม่มีฟลักซ์ความร้อนแต่กำหนดให้เป็นฉนวนแทน กำหนดของไหลนาโนที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนระหว่าง 0 ถึง 6% โดยปริมาตร และที่เลข Re เท่ากับ 2000, 4000, 6000 และ 8000

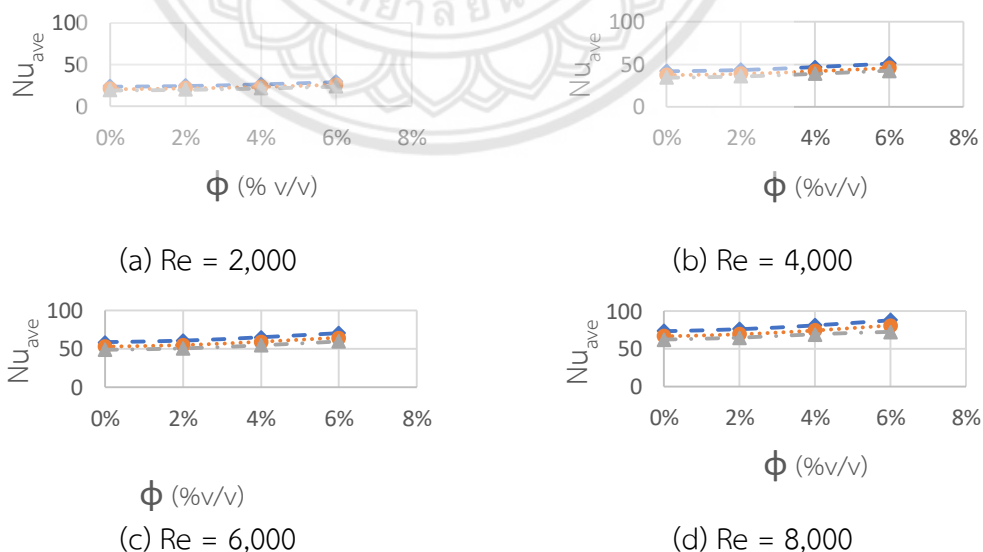
### 4.2.1 กรณีพื้นผิวตกกระทบเป็นแบบผิวเรียบ

รูปที่ 4.15 แสดงการกระจายของ Local Nu ที่ระยะ  $r/D_j$  ตั้งแต่ตำแหน่งตกกระทบจนถึงทางออกที่ค่า  $H/D_j$  ต่างๆของพื้นผิวตกกระทบแบบเรียบที่เลข Re เท่ากับ 8000 สำหรับของไหลนาโนที่  $\phi$  ระหว่าง 0 ถึง 6% โดยปริมาตร พบว่าทุกค่าของ  $H/D_j$  มีแนวโน้มของการถ่ายเทความร้อนคล้ายคลึงกัน กล่าวคือที่จุดตกกระทบให้ค่า Nu สูงที่สุด เนื่องจากการถ่ายเทโมเมนตัมสูงที่สุด หลังจากตกกระทบ มีความเร็วเป็น 0 แล้วสร้าง wall jet ซึ่งมีลักษณะคล้ายจุดเริ่มต้นของชั้นขอบเขตจากรูปที่ 4.15(d) ที่เลข Re เดียวกัน ที่  $\phi = 6\%$  พบว่า  $H/D_j = 2$  ให้ค่า Nu ที่จุดตกกระทบสูงกว่าที่  $H/D_j = 3$  และ 4 คิดเป็น 19.82%, 34.38% ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อค่า H มีค่ามากขึ้นการถ่ายเทความร้อนจะลดลง เพราะโมเมนตัมของเจ็ทที่กำลังเคลื่อนที่ลงมามีค่าลดลงจากการถ่ายเทโมเมนตัมให้แก่อากาศแวดล้อมที่อยู่หนึ่ง หลังจากการตกกระทบการถ่ายเทโมเมนตัมจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงตำแหน่ง  $r/D_j = 2.5$  ที่ทุกค่าของ  $H/D_j$  แสดงเป็นบริเวณ Wall jet และให้ค่า Nu ใกล้เคียงกันจนถึงทางออก ทั้งนี้ที่ตำแหน่งทางออกของหัวฉีดเจ็ทมีปริมาณโมเมนตัมเท่ากันที่ Re เดียวกัน และที่ตำแหน่ง  $r/D_j = 2.5$  จนถึงทางออก การไหลคล้ายกับการไหลภายในท่อ (Channel Flow) นอกจากนี้ยังพบว่าที่  $H/D_j = 2$  ที่ทุกค่า Re มีแนวโน้มที่จะเกิด Secondary Peak ที่ตำแหน่ง  $r/D_j = 0.115$  เนื่องจากของไหลที่ออกจากหัวฉีดจะมีความเร็วสูงและตกลงมาในระยะทางสั้นๆ ซึ่งก่อนที่ของไหลจะถึงจุดตกกระทบความเร็วจะลดลง ของไหลที่ตกกระทบก่อนจะถูกผลักโดยของไหลที่มาถึงทีหลัง จึงทำให้ของไหลไม่ลงที่จุด  $(r,z) = (0,0)$  โดยตรง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่  $(r,z) = (0,0)$  คิดเป็น 1.15%, 1.14%, 1.13% และ 1.12% สำหรับ  $\phi = 6\%, 4\%, 2\%$  v/v และน้ำ ตามลำดับ พิจารณารูปที่ 4.16 แสดงค่าเฉลี่ยของ Nu ที่  $H/D_j$  และ  $\phi$  ต่างๆของพื้นผิวเรียบ พบว่าแนวโน้มของ

การถ่ายเทความร้อนคล้ายคลึงกัน โดยที่  $H/D_j = 2$  และ  $\phi = 6\% \text{ v/v}$  ให้ค่า  $Nu_{ave}$  สูงสุด เนื่องจากการถ่ายเทโมเมนตัมสูงที่สุด แต่เมื่อระยะ  $H/D_j$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะมีการสูญเสียโมเมนตัมให้แก่อากาศรอบข้างของเจ็ทก่อนตกกระทบบากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทโมเมนตัมของเจ็ทที่บริเวณตกกระทบบมีค่าลดลง



**รูปที่ 4.15** การเปรียบเทียบ Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบบกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 2, 3 และ 4 บนผิวตกกระทบบแบบเรียบที่เลข Reynolds เท่ากับ 8,000   
 .....  $H/D_j = 2$     - - -  $H/D_j = 3$     —  $H/D_j = 4$

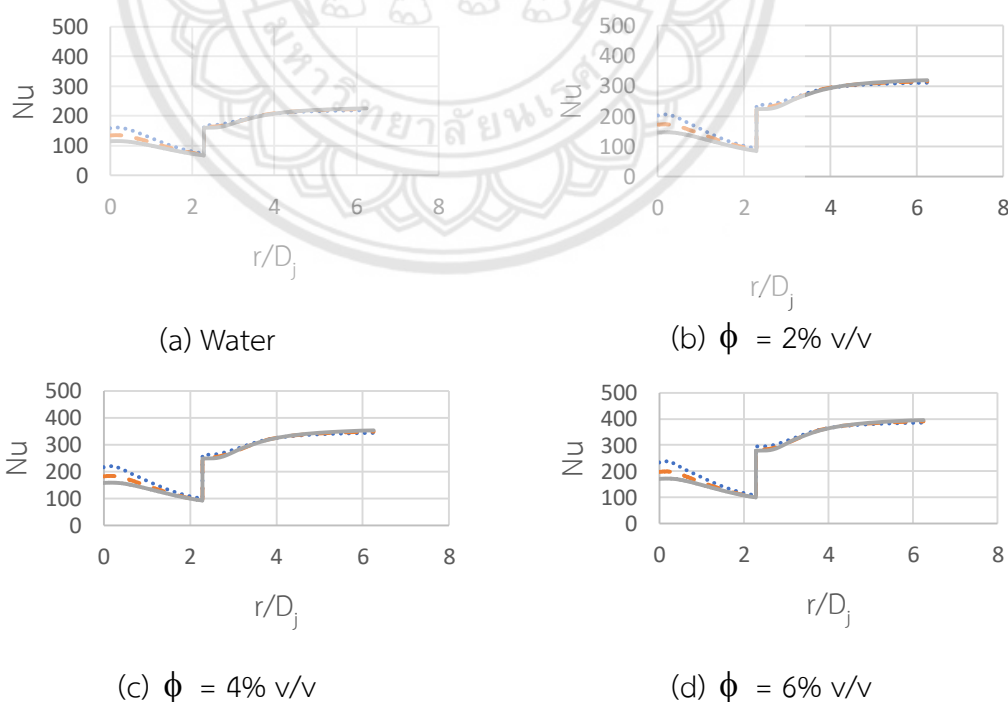


**รูปที่ 4.16** การเปรียบเทียบ Nusselt เฉลี่ย (Average Nusselt Number) กับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบบกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 2, 3 และ 4 บนผิวตกกระทบบแบบเรียบ

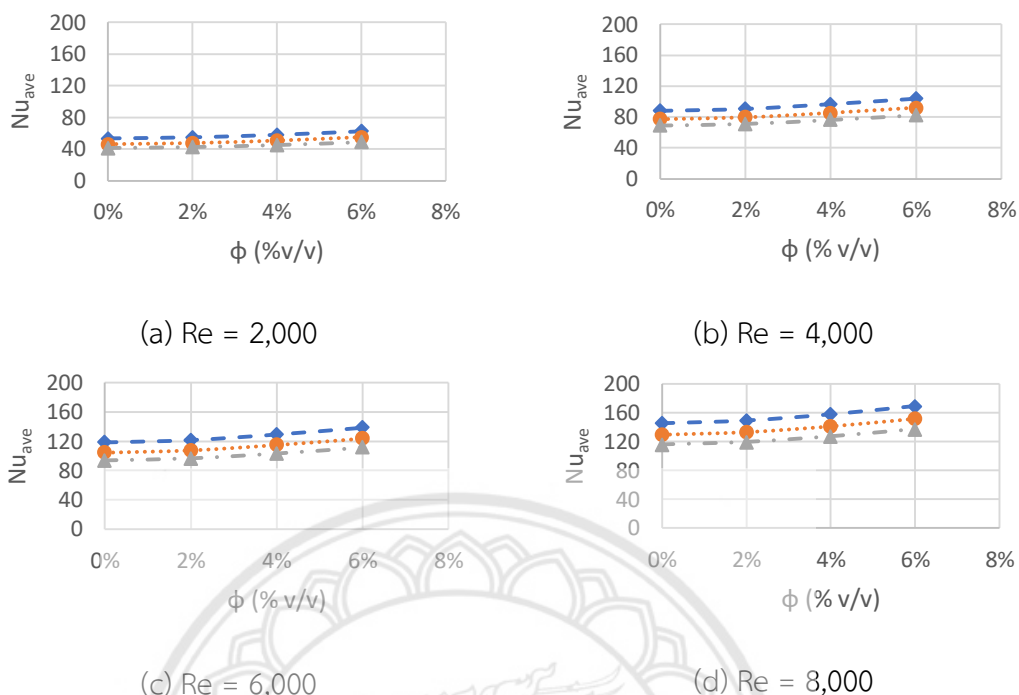
—◆—  $H/D_j = 2$     .....●.....  $H/D_j = 3$     —▲—  $H/D_j = 4$

#### 4.2.2 กรณีพื้นผิวตกกระทบเป็นแบบผิวนูน

รูปที่ 4.17 แสดงการกระจายของ Local Nu ที่ระยะ  $r/D_j$  ตั้งแต่ตำแหน่งตกกระทบจนถึงทางออกที่ค่า  $H/D_j$  ต่างๆของพื้นผิวตกกระทบแบบนูนที่เลข Re เท่ากับ 8000 สำหรับของไหลนาโนที่  $\phi$  ระหว่าง 0 ถึง 6% โดยปริมาตร พบว่าทุกค่าของ  $H/D_j$  ที่จุดตกกระทบให้ค่า Nu สูงที่สุด เนื่องจากการถ่ายเทโมเมนตัมสูงที่สุด จากรูปที่ 4.17(d) ที่เลข Re เดียวกัน ที่  $\phi = 6\%$  พบว่า  $H/D_j = 2$  ให้ค่า Nu ที่จุดตกกระทบสูงกว่าที่  $H/D_j = 3$  และ 4 คิดเป็น 15.07%, 27.38% ตามลำดับ หลังจากการตกกระทบการถ่ายเทโมเมนตัมจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงตำแหน่ง  $r/D_j = 2.2875$  ค่า Nu เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากของไหลมีการเปลี่ยนทิศทางการไหลอย่างฉับพลันจากขอบซิปตกลงไปที่พื้นผิวที่เป็นนูน นอกจากนี้ยังพบว่าที่  $H/D_j = 2$  ที่ทุกค่า Re มีแนวโน้มที่จะเกิด Secondary Peak ที่ระยะ  $r/D_j = 0.1725$  ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่  $(r,z) = (0,0)$  คิดเป็น 1.63%, 1.59%, 1.58% และ 1.57% สำหรับ  $\phi = 6\%$ , 4%, 2% v/v และน้ำ ตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.18 แสดงค่าเฉลี่ยของ Nu ที่  $H/D_j$  และ  $\phi$  ต่างๆของพื้นผิวนูน พบว่า  $H/D_j = 2$  และ  $\phi = 6\%$  v/v ให้ค่า  $Nu_{ave}$  สูงสุด เนื่องจากการถ่ายเทโมเมนตัมสูงที่สุด แต่เมื่อระยะ  $H/D_j$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะมีการสูญเสียโมเมนตัมให้แก่อากาศรอบข้างของเจ็ทก่อนตกกระทบมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทโมเมนตัมของเจ็ทที่บริเวณตกกระทบมีค่าลดลง



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบ Nusselt เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) กับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 2, 3 และ 4 บนผิวตกกระทบแบบนูนที่เลข Reynolds เท่ากับ 8,000 .....  $H/D_j = 2$  - - -  $H/D_j = 3$  —  $H/D_j = 4$



**รูปที่ 4.18** การเปรียบเทียบ Nusselt เฉลี่ย (Average Nusselt Number) กับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 2, 3 และ 4 บนผิวตกกระทบแบบนูน

—◆—  $H/D_j = 2$  —●—  $H/D_j = 3$  —▲—  $H/D_j = 4$

### 4.3 การหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (Correlations)

หัวข้อนี้เราจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับ  $\phi$ ,  $Re$ ,  $H/D_j$  และ  $Pr$  ซึ่งเป็นการนำผลของ  $Nu_{ave}$  ที่  $\phi = 2\%$ ,  $4\%$  และ  $6\%$  v/v  $Re = 2,000$ ,  $4,000$ ,  $6,000$  และ  $8,000$   $H/D_j = 2, 3$  และ  $4$  และ  $Pr = 5.8629$ ,  $6.5172$ ,  $7.5425$  และ  $8.8460$  โดย  $Pr$  สามารถคำนวณได้จาก ( $Pr = \nu / \alpha = C_p \mu / k$ ) ซึ่งเป็นสมบัติเชิงความร้อนของของไหล ดังนั้น  $Pr$  จึงมีความสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับ  $\phi$  จากนั้นทำการสร้างความสัมพันธ์ในแต่ละกรณี โดยอาศัยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) โดยแบ่งออกตามชนิดของของไหล ในแต่ละกรณีก็จะแบ่งออกเป็นพื้นผิวเรียบและผิวนูนที่บริเวณที่มีพลักซ์ความร้อนในระยะห่างที่  $r_j/D_j = 0$  ถึง  $2.2875$  ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับที่วางชิป

#### 4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับความเข้มข้น

หัวข้อนี้เราจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับ  $\phi$  ที่เลข Reynolds และระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบ ( $H/D_j$ ) ต่างๆ โดยอาศัยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) โดยใช้ของไหลนาโนของอนุภาค  $TiO_2$  ซึ่งในแต่ละกรณีก็จะแบ่งออกเป็นพื้นผิวเรียบและผิวนูน

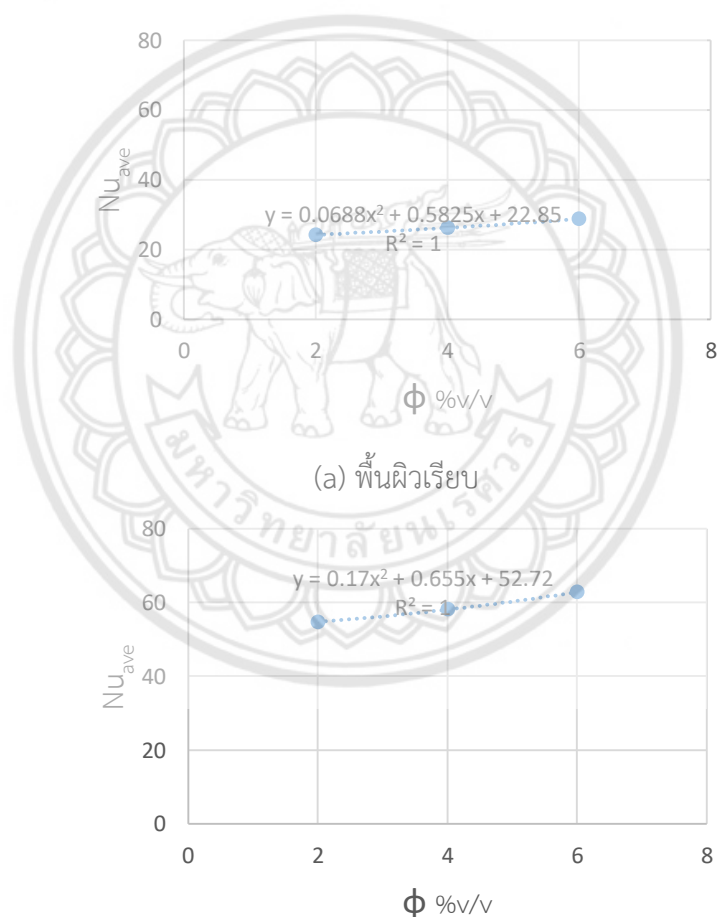


▪ ของไหลนาโน

รูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่าง Curve Fitting ของความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับ  $\phi$  สำหรับพื้นผิวเรียบและผิวหูนในกรณี  $Re = 2,000$  และ  $H/D_j = 2$  ซึ่งกรณีอื่นๆ แสดงความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก. โดยหาความสัมพันธ์จากการเลือกเส้นแนวโน้มแบบพหุนามอันดับที่ 2 โดยมีความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\text{ผิวเรียบ} : Nu_{ave} = 0.0688\phi^2 + 0.5825\phi + 22.85 \quad ; R^2 = 1 \quad (4.1)$$

$$\text{ผิวหูน} : Nu_{ave} = 0.17\phi^2 + 0.655\phi + 52.72 \quad ; R^2 = 1 \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ( $\phi$ ) กรณี  $Re = 2,000$  และ  $H/D_j = 2$

#### 4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง

หัวข้อนี้เราจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับ  $H/D_j$  ที่เลข Reynolds และความเข้มข้นต่างๆ โดยอาศัยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) โดยแบ่งออกเป็นของไหลฐาน (น้ำ) และของไหลนาโนของอนุภาค  $TiO_2$  ซึ่งในแต่ละกรณีก็จะแบ่งออกเป็นผิวเรียบและผิวนูน ดังนี้

##### ▪ ของไหลฐาน (น้ำ)

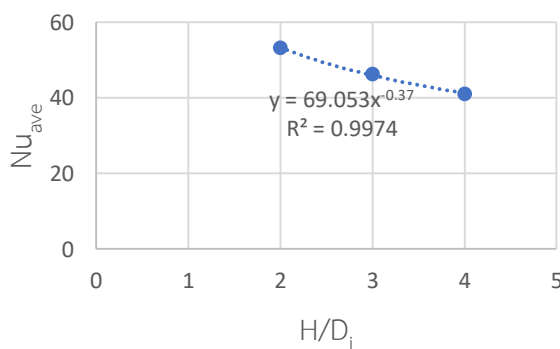
รูปที่ 4.20 แสดงตัวอย่าง Curve Fitting ของความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับ  $H/D_j$  สำหรับพื้นผิวเรียบและผิวนูนในกรณีเลข  $Re = 2,000$  และ  $\phi = 0\%$  (น้ำ) ซึ่งกรณีอื่นๆ แสดงความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก. โดยหาความสัมพันธ์จากการเลือกเส้นแนวโน้มแบบเลขยกกำลัง โดยมีความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\text{ผิวเรียบ} : Nu_{ave} = 29.166(H/D_j)^{-0.309} ; R^2 = 0.9994 \quad (4.3)$$

$$\text{ผิวนูน} : Nu_{ave} = 69.053(H/D_j)^{-0.370} ; R^2 = 0.9974 \quad (4.4)$$



(a) พื้นผิวเรียบ



(b) พื้นผิวนูน

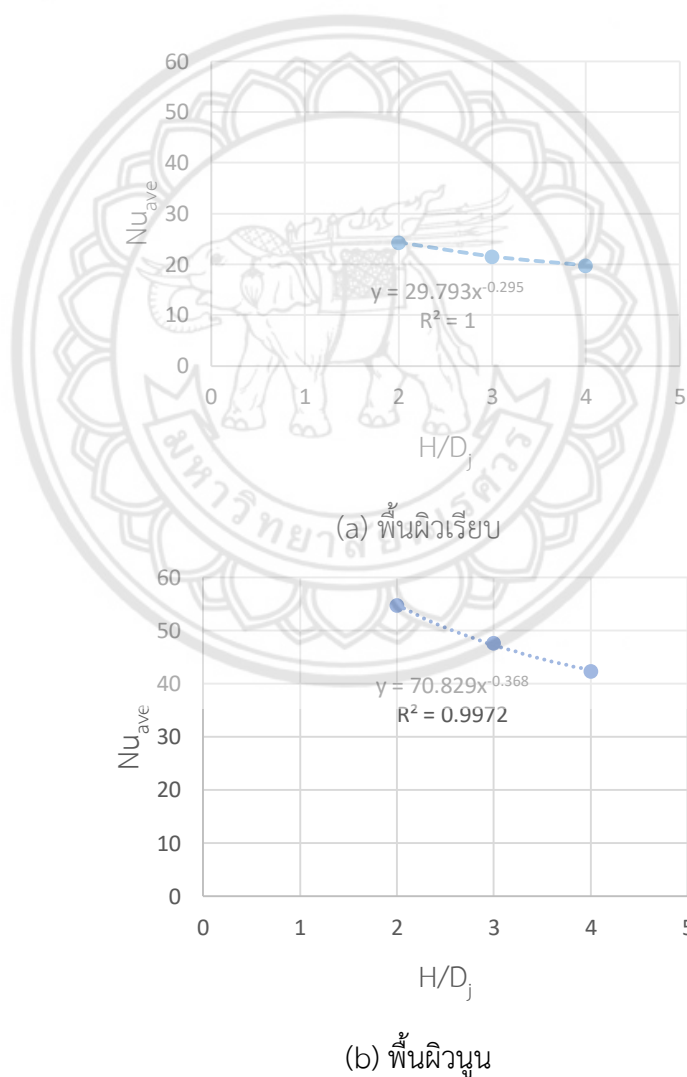
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับ  $H/D_j$  กรณีเลข  $Re = 2,000$  และ  $\phi = 0\%$

■ ของไหลนาโน

รูปที่ 4.21 แสดงตัวอย่าง Curve Fitting ของความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับ  $H/D_j$  สำหรับพื้นผิวเรียบและผิวขนในกรณีเลข  $Re = 2,000$  และ  $\phi = 2\%$  ซึ่งกรณีอื่นๆ แสดงความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก. โดยหาความสัมพันธ์จากการเลือกเส้นแนวโน้มแบบเลขยกกำลัง โดยมีความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\text{ผิวเรียบ} : Nu_{ave} = 29.793H/D_j^{-0.295} \quad ; R^2 = 1 \quad (4.5)$$

$$\text{ผิวขน} : Nu_{ave} = 70.829H/D_j^{-0.368} \quad ; R^2 = 0.9972 \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับ  $H/D_j$  กรณีเลข  $Re = 2,000$  และ  $\phi = 2\%$

### 4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับเลข Reynolds

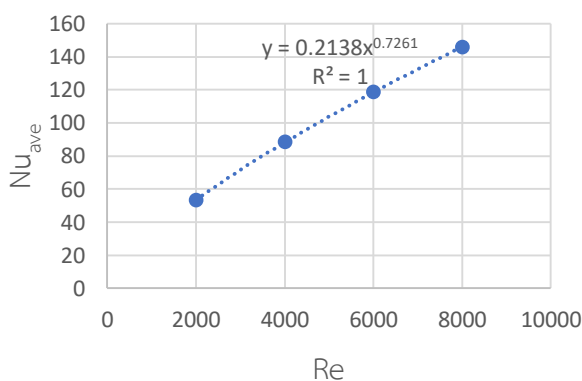
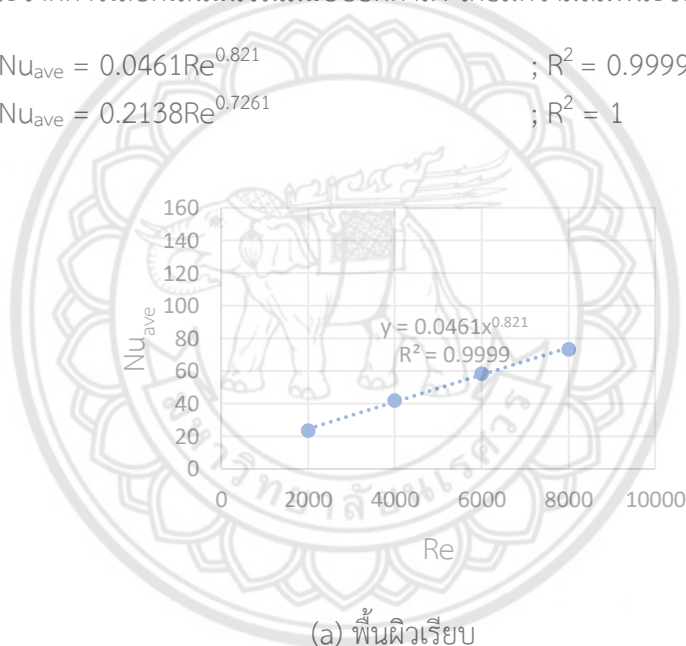
หัวข้อนี้เราจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับเลข Reynolds ที่ความเข้มข้น และ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบ ( $H/D_j$ ) ต่างๆ โดยอาศัยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) โดยแบ่งออกเป็นของไหลฐาน (น้ำ) และของไหลนาโนของอนุภาค  $TiO_2$  ซึ่งในแต่ละกรณีก็จะแบ่งออกเป็นผิวเรียบและผิวหูน

#### ▪ ของไหลฐาน (น้ำ)

รูปที่ 4.22 แสดงตัวอย่าง Curve Fitting ของความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับ  $Re$  สำหรับพื้นผิวเรียบและผิวหูนในกรณี  $H/D_j = 2$  และ  $\phi = 0\%$  ซึ่งกรณีอื่นๆ แสดงความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก. โดยหาความสัมพันธ์จากการเลือกเส้นแนวโน้มแบบยกกำลัง โดยมีความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\text{ผิวเรียบ} : Nu_{ave} = 0.0461Re^{0.821} ; R^2 = 0.9999 \quad (4.7)$$

$$\text{ผิวหูน} : Nu_{ave} = 0.2138Re^{0.7261} ; R^2 = 1 \quad (4.8)$$



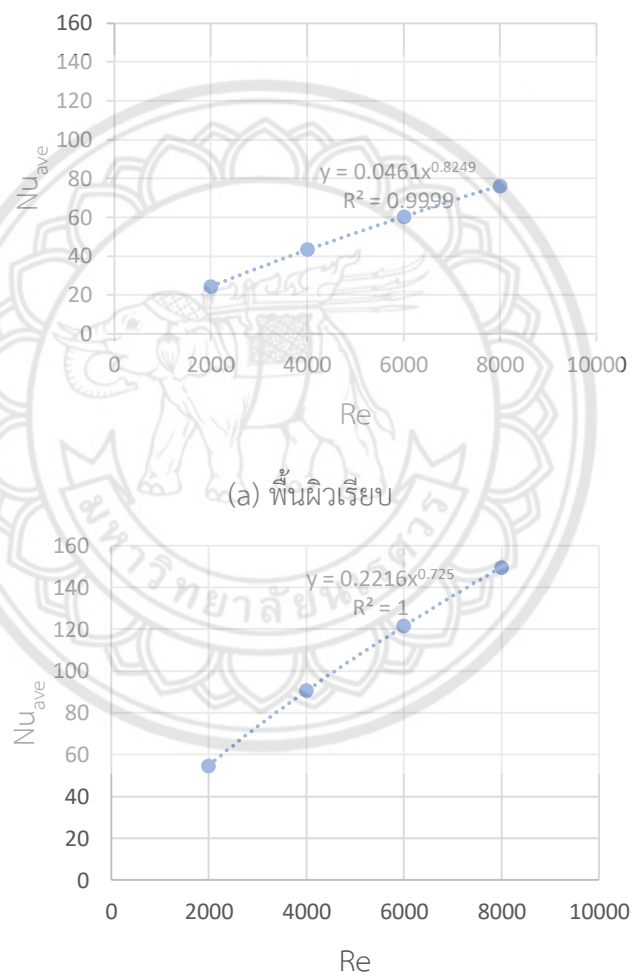
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับ  $Re$  กรณี  $H/D_j = 2$  และ  $\phi = 0\%$

▪ ของไหลนาโน

รูปที่ 4.23 แสดงตัวอย่าง Curve Fitting ของความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับ  $Re$  สำหรับพื้นผิวเรียบและผิวขรุขระในกรณี  $H/D_j = 2$  และ  $\phi = 2\%$  ซึ่งกรณีอื่นๆ แสดงความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก. โดยหาความสัมพันธ์จากการเลือกเส้นแนวโน้มแบบยกกำลัง โดยมีความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\text{ผิวเรียบ} : Nu_{ave} = 0.0461Re^{0.8249} \quad ; R^2 = 0.9999 \quad (4.9)$$

$$\text{ผิวขรุขระ} : Nu_{ave} = 0.2216Re^{0.7250} \quad ; R^2 = 1 \quad (4.10)$$



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับ  $Re$  กรณี  $H/D_j = 2$  และ  $\phi = 2\%$

#### 4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เกลี่ยกับเลข Prandtl

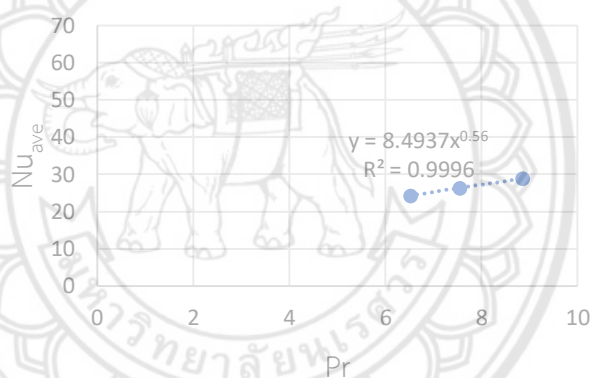
หัวข้อนี้เราจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับเลข Prandtl ที่เลข Reynolds และระยะห่างระหว่างหัวฉีตถึงพื้นผิวตกรกระทบ ( $H/D_j$ ) ต่างๆ โดยอาศัยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) โดยใช้ของไหลนาโนของอนุภาค  $TiO_2$  ซึ่งในแต่ละกรณีก็จะแบ่งออกเป็นผิวเรียบและผิวขรุขระ

##### ▪ ของไหลนาโน

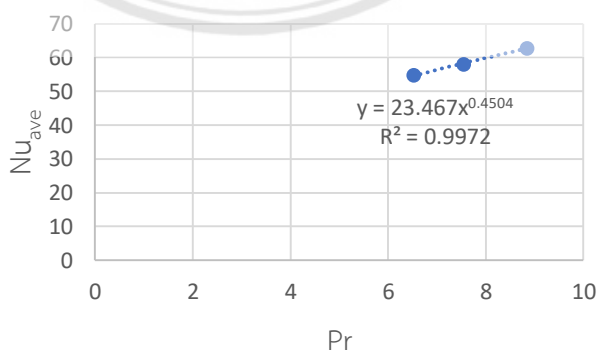
รูปที่ 4.24 แสดงตัวอย่าง Curve Fitting ของความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับ Pr สำหรับพื้นผิวเรียบและผิวขรุขระในกรณีเลข  $Re = 2,000$  และ  $H/D_j = 2$  ซึ่งกรณีอื่นๆ แสดงความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก. โดยจะได้ความสัมพันธ์แบบยกกำลัง โดยมีความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\text{ผิวเรียบ} : Nu_{ave} = 8.4937Pr^{0.56} ; R^2 = 0.9996 \quad (4.11)$$

$$\text{ผิวขรุขระ} : Nu_{ave} = 23.467Pr^{0.4504} ; R^2 = 0.9972 \quad (4.12)$$



(a) พื้นผิวเรียบ



(b) พื้นผิวขรุขระ

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  กับ Pr กรณีเลข  $Re = 2,000$  และ  $H/D_j = 2$

ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับ  $\phi$ ,  $Re$ ,  $H/D_j$  และ  $Pr$  และแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของแต่ละตัวแปร โดยแบ่งออกตามชนิดของของไหล ในแต่ละกรณีก็จะแบ่งออกเป็นพื้นผิวเรียบและผิวขรุขระ ซึ่งค่าคงที่หน้าตัวแปรและเลขยกกำลังได้จากการหาค่าเฉลี่ยจากการทำ Regression Analysis เมื่อพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละตัวแปร มีค่าแตกต่างกันมาก จึงทำให้ผลลัพธ์ของ  $Nu_{ave}$  มีค่าคลาดเคลื่อนจากผลลัพธ์จริง ดังนั้นความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  ที่ขึ้นอยู่กับ  $\phi$ ,  $Re$ ,  $H/D_j$  และ  $Pr$  จึงไม่เหมาะแก่การใช้งาน ควรเลือกใช้ความสัมพันธ์ของ  $Nu_{ave}$  ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งแล้วกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ คงที่



ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ย ( $Nu_{ave}$ ) กับความเข้มข้น, เลข Reynolds อัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางและเลข Prandtl

ชนิดของ ของไหล	พื้นผิว	สหสัมพันธ์	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)								
			Re	H/D <sub>j</sub>	Pr	m	n	p	$\phi^2$	$\phi$	c
ของไหล ฐาน (น้ำ)	เรียบ	$Nu_{ave} = 12.412 Re^{0.84} H/D_j^{-0.262}$	0.01	25.09	-	0.03	0.02	-	-	-	-
	นูน	$Nu_{ave} = 130.737 Re^{0.738} H/D_j^{-0.346}$	0.04	49.17	-	0.02	0.01	-	-	-	-
ของไหลนา โนของ อนุภาค TiO <sub>2</sub>	เรียบ	$Nu_{ave} = 53.497 Re^{0.832} H/D_j^{-0.266} Pr^{0.514} (0.083\phi^2 + 1.26\phi + 43.775)$	0.01	25.85	8.95	0.02	0.02	0.05	0.10	0.79	18.04
	นูน	$Nu_{ave} = 1099.978 Re^{0.736} H/D_j^{-0.334} Pr^{0.45} (0.193\phi^2 + 1.837\phi + 88.428)$	0.04	48.10	16.34	0.02	0.01	0.02	0.08	0.78	33.26

- เมื่อ
- Re คือ Reynolds Number
  - H/D<sub>j</sub> คือ อัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง
  - Pr คือ Prandtl Number
  - m คือ เลขยกกำลังของ Reynolds Number
  - n คือ เลขยกกำลังของอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง
  - p คือ เลขยกกำลังของ Prandtl Number
  - $\phi^2$  คือ ความเข้มข้นอันดับสอง
  - $\phi$  คือ ความเข้มข้นอันดับหนึ่ง



C คือ ค่าคงที่ของความเข้มข้น



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทแบบปั่นป่วนของของไหลนาโนของของไหลนาโนอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ในของไหลฐาน (น้ำ) ที่สภาวะคงที่ลงบนพื้นผิวแบบต่างๆ ซึ่งได้แก่ พื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูนขนาดเท่าชิปคอมพิวเตอร์ โดยใช้หนึ่งหัวฉีด และอาศัยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณ กำหนดให้โดเมนการคำนวณเป็นแบบสองมิติสมมาตรตามแกนและใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  และแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของเลข Local Nusselt ( $Nu$ ) และเลข Nusselt เฉลี่ย ( $Nu_{ave}$ ) โดยพิจารณาผลกระทบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  ที่ 2%, 4% และ 6% โดยปริมาตรสำหรับพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูน พบว่าที่  $\phi = 6\%$  v/v ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด รองลงมาเป็น 4%, 2% v/v และน้ำ ตามลำดับ เนื่องจากความเข้มข้นจะไปเปลี่ยนสมบัติเชิงความร้อนของของไหลฐาน (น้ำ) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) ความหนืดพลวัต ( $\mu$ ) และความหนาแน่น ( $\rho$ ) มีค่าสูงขึ้น สรุปได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น

2. เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทของของไหลนาโนลงบนพื้นผิวเรียบเปรียบเทียบกับพื้นผิวนูน พบว่า พื้นผิวเรียบมีการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าพื้นผิวนูน เนื่องจากพื้นผิวนูนทำให้เกิด Turbulence สูงกว่าพื้นผิวเรียบ ด้วยการ trip ชั้นขอบเขต ทำให้เกิดการสร้างชั้นขอบเขตใหม่และเกิด Secondary flow ที่บริเวณขอบชิป

3. เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดและพื้นผิวดกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ( $H/D_j$ ) ที่ 2, 3 และ 4 สำหรับพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูน พบว่าทั้งสองกรณีให้ค่า  $Nu$  สูงสุดที่  $H/D_j = 2$  รองลงมาคือ  $H/D_j = 3$  และ 4 ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อระยะ  $H/D_j$  มีค่าเพิ่มขึ้นการถ่ายเทความร้อนจะลดลง เพราะมีการสูญเสียโมเมนตัมให้แก่อากาศแวดล้อมที่อยู่ข้างๆ นอกจากนี้ยังพบ Secondary Peak ที่  $H/D_j = 2$  ให้ค่า  $Nu$  สูงกว่าที่จุด  $(r,z) = (0,0)$  เนื่องจากของไหลที่จะมาถึงจุดตกกระทบถูกผลักโดยของไหลที่มาถึงที่หลัง จึงทำให้ของไหลไม่ลงที่จุด  $(r,z) = (0,0)$

4. เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ( $\phi$ ), เลข Reynolds ( $Re_{D_j}$ ), อัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวดกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $H/D_j$ ) และเลข Prandtl ( $Pr$ ) โดยทำการสร้างความสัมพันธ์  $Nu_{ave}$  ของพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูนด้วย

การทำ Regression Analysis พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับ  $\phi$  อยู่ในรูปของพหุนามอันดับ 2 โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_{ave}$  กับ  $Re_{D_j}$ ,  $H/D_j$  และ  $Pr$  อยู่ในรูปยกกำลัง ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ย ( $Nu_{ave}$ ) กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ( $\phi$ ), เลข Reynolds ( $Re$ ), อัตราส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวตกกระทบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $H/D_j$ ) และเลข Prandtl ( $Pr$ )

ชนิดของของไหล	พื้นผิว	สหสัมพันธ์
น้ำ	เรียบ	$Nu_{ave} = 12.412 Re^{0.84} (H/D_j)^{-0.262}$
	นูน	$Nu_{ave} = 130.737 Re^{0.738} (H/D_j)^{-0.346}$
ของไหลนาโนของอนุภาค $TiO_2$	เรียบ	$Nu_{ave} = 53.497 Re^{0.832} H/D_j^{-0.266} Pr^{0.514} (0.083\phi^2 + 1.26\phi + 43.775)$
	นูน	$Nu_{ave} = 1099.978 Re^{0.736} H/D_j^{-0.334} Pr^{0.45} (0.193\phi^2 + 1.837\phi + 88.428)$

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Lv, C. Hu, M. Bai, K. Zeng, S. Chang, D. Gao (2017), “Experimental investigation of free single jet impingement using SiO<sub>2</sub> – water nanofluid”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 84, 39-46.
- [2] J. Lv, S. Chang, C. Hu, M. Bai, P. Wang, K. Zeng (2017), “Experimental investigation of free single jet impingement using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – water nanofluid”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 88, 126-135.
- [3] M. Modak, S. Srinivasan, K. Garg, S. S. Chougule, M. K. Agarwal, S. K. Sahu (2015), “Experimental investigation of heat transfer characteristics of the hot surface using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – water nanofluids”, *Chemical Engineering and Processing*, 91, 104-113.
- [4] M. M. Sorour, W. M. El-Maghlany, M. A. Alnakeeb, A. M. Abbass (2019), “Experimental study of free single jet impingement utilizing high concentration SiO<sub>2</sub> nanoparticles water base nanofluid”, *Applied Thermal Engineering*, 160, 114019.
- [5] O. Abdelrehim, A. Khater, A. A. Mohamad, A. Radwan (2019), “Two – phase simulation of nanofluid in a confined single impinging jet”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100423.
- [6] S. D. Barewar, S. Tawri and S. S. Chougule (2019), “Heat transfer characteristics of free nanofluid impinging jet on flat surface with different jet to plate distance : An experimental investigation”, *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 136, 1-10.
- [7] Q. Li, Y. Xuan and F. Yu (2012), “Experimental investigation of submerged single jet impingement using Cu-water nanofluid”, *Applied Thermal Engineering*, 36, 426-433.
- [8] Z. S. Kareem, H. H. Balla and A. F. AbdulWahid (2019), “Heat transfer enhancement in single circular impingement jet by CuO-water nanofluid”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 1-14.

[9] ปัทมาธิปไตย ฝงสุวรรณ และ มนต์รี หมีไพรพทกษ. (2561). การศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของเจ็ทของของไหลนาโนแบบสมมาตรตามแกนในสองมิติ. ปรินญาณีพนธ์ วศ.บ., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

[10] C-T Ninja (Aug 25, 2017), “GPU measurement”, สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2562, จาก <https://smallformfactor.net/forum/threads/gpu-measurements.3105/>

[11] N. Kirsch (Nov 03, 2008), “Intel Core i7 920, 940 and 965 Processor Review”, สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2562, จาก [https://www.legitreviews.com/intel-core-i7-920-940-and-965-processor-review\\_824](https://www.legitreviews.com/intel-core-i7-920-940-and-965-processor-review_824)

