

การถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขจากชิปคอมพิวเตอร์โดยอาศัยของไหลนาโน
Numerical Study of Heat transfer of Computer Chip using Nanofluid

นายณัฐธนนยศ ทองธนาพิรุฬห์ รหัสสนิสิต 60361316
นายเสฏฐธวัช สุขศิริวงศ์ทวด รหัสสนิสิต 60365468
นายเอกฤษฏ์ ดลราชี่ รหัสสนิสิต 60365895

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2563




ใบรับรองโครงการงาน

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขจากชิปคอมพิวเตอร์โดยอาศัยของไหลนาโน Numerical Study of Heat transfer of computer chip using Nanofluid
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายณัฐธนนยศ ทองธนาพิรุฬห์ รหัสบัณฑิต 60361316 นายเสกฐวุฒิ สุขศิริวงศ์หวัด รหัสบัณฑิต 60365468 นายอุกฤษฏ์ ดลราชี่ รหัสบัณฑิต 60365895
ที่ปรึกษาโครงการงาน	รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษยา กนกजारูจิตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2563

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อนุมัติให้โครงการงานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงการงาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษยา กนกजारูจิตร)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มัทนี สงวนเสริมศรี)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวัญชัย ไกรทอง)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขจากชิปคอมพิวเตอร์โดยอาศัยของไหลนาโน Numerical Study of Heat transfer of computer chip using Nanofluid
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายณัฐธนนยศ ทองธนาพิรุฬห์ รหัสบัณฑิต 60361316 นายเสกฐฎุฒิ สุขศิริวงศ์ทวด รหัสบัณฑิต 60365468 นายอุกฤษฏ์ ดลราชี รหัสบัณฑิต 60365895
ที่ปรึกษาโครงการงาน	รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษยา กนกजारูวิจิตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของชิปโดยอาศัยของไหลนาโนของอะลูมินา (Al_2O_3) ในน้ำ ซึ่งเป็นของไหลฐานโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วนที่สภาวะคงที่ตามแบบจำลอง $k - \epsilon$ ภายในท่อสองมิติ ที่มีความสูง 0.01 m ความยาว 0.1 m กำหนดพื้นผิวท่อเป็นผิวเรียบและผิวนูน (ชิป) โดยที่ชิปมีความยาว 0.01945 m ความสูง 0.0015 m โดเมนการคำนวณแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ (1) พื้นผิวเรียบทั้งด้านล่างและด้านบน และ (2) พื้นผิวด้านบนเรียบและพื้นผิวด้านล่างติดตั้งชิป กำหนดให้การไหลอยู่ในช่วง Reynolds Number 20,000 ถึง 100,000 และความเข้มข้นของ Al_2O_3 ในน้ำระหว่าง 0.25 ถึง 5% โดยปริมาตร ผลของการถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปของเลข Nusselt เฉลี่ย (Nu_{ave}) และ Pumping Power ต่อหน่วยความกว้างของท่อ พบว่า ทุกค่าของ ϕ ให้ค่า Nu_{ave} สูงกว่าน้ำและของไหลนาโนที่ $\phi = 5\%$ โดยปริมาตร $Re = 100,000$ ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุดสำหรับพื้นผิวทั้งสองแบบ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราโมเมนต์ และนอกจากนี้ผลของกำลังของปั๊ม (Pumping Power) ต่อหน่วยความกว้างของท่อ แสดงให้เห็นว่า ที่ค่า ϕ และ Re เดียวกัน กรณีติดตั้งชิปใช้กำลังปั๊มมากกว่ากรณีผิวเรียบ เพราะมีการเปลี่ยนพื้นที่การไหล สุดท้ายแสดงความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่าง Nu_{ave} กับ Re และ ϕ โดยอาศัยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) สำหรับน้ำ และแบบเชิงเส้นพหุถดถอย (Multiple Linear Regression Analysis) สำหรับของไหลนาโน

Project Title	Numerical Study of Heat transfer of computer chip using Nanofluid		
Name	Natthanayos	Thongthanapiroon	ID. 60361316
	Setthawut	Suksiriwongthuad	ID. 60365468
	Ugrit	Donrasee	ID. 60365895
Project advisor	Assoc. Prof. Dr. Koonlaya Kanokjaruvijit		
Major	Mechanical Engineering		
Department	Mechanical Engineering		
Academic year	2563		

Abstract

This study is to numerically study the heat transfer of Alumina (Al_2O_3) nanofluid flow in a 2- dimensional duct at steady state by using the finite element method. The nanofluid consists of Al_2O_3 particles in the base fluid, which is water. The flow was assumed turbulent, and followed k- ϵ model. Two types of computational domains were considered: (1) upper and lower flat plates and (2) upper flat plate with a chip of the size 19.45 mm long and 1.5 mm high located on the lower plate. The distance between upper and lower surfaces was 0.01 m, and the duct length was 0.1 m. The lower plate of domain type (1) was assigned constant heat flux of 500 kW/m² thoroughly, while only the chip was assigned the uniform heat flux, and the rest of the walls were insulated. Reynolds number (Re) ranging between 20,000 and 100,000, and the nanofluids concentration (ϕ) between 0.25-5% volume by volume were studied. The heat transfer results were reported in terms of average Nusselt number (Nu_{ave}). The pumping power was also reported. All values of nanofluid concentration gave better heat transfer than water. The best heat transfer augmentation was from $\text{Re} = 100,000$ and $\phi = 5\%$ v/v; however, the penalty of pumping power was also high. Finally, the correlations were presented by using multiple regression analysis through the analysis of variance (ANOVA) table.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมเครื่องกลฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้ดำเนินงาน ต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กุลยา กนกจาร์วิจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินโครงการ ตลอดจนติดตามประเมินผลการดำเนินโครงการมาโดยตลอด ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านและกรรมการสอบ ท่านแรก รองศาสตราจารย์ ดร. มัทนี สงวนเสริมศรี ท่านที่สอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวัญชัย ไกรทอง ที่ได้สละเวลามาดำเนินการสอบ และได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของรูปเล่มโครงการ

ขอขอบพระคุณฝ่ายเลขานุการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินโครงการ

ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูและสั่งสอนจนกระทั่งสามารถเติบโตมาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนช่วยอุปการะทางการเงินและคอยให้กำลังใจ จนกระทั่งโครงการนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้ดำเนินงานขอมอบคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากโครงการนี้ แต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากโครงการนี้ ผู้ดำเนินงานต้องกราบขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำโครงการ

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตของโครงการ	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.6 แผนการดำเนินงาน	7
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์	9
2.1 ทฤษฎี	9
2.1.1 ของไหลนาโน (Nanofluid)	9
2.1.2 สมการควบคุม (Governing Equations)	10
2.1.3 สมการการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	11
2.1.4 เลข Reynolds (Reynolds number)	12
2.1.5 กำลังส่งของปั๊ม (Pumping Power)	12
2.2 วรรณกรรมปริทัศน์	13
บทที่ 3 ขั้นตอนการคำนวณ	18
3.1 โดเมนการคำนวณ (Computational Domain) และขอบเขตของโจทย์	18
3.2 สมการที่เกี่ยวข้อง	21
3.2.1 สมการควบคุม (Governing Equations)	21
3.2.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	22
3.3.3 เลข Reynolds (Reynolds number)	23
3.3.4 กำลังส่งของปั๊ม (Pumping Power)	24
3.3 ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	25
3.4 การศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นของเมชที่มีต่อคำตอบ	27
3.5 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลจากงานวิจัยจากวรรณกรรม	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการคำนวณและการอภิปรายผล	35
4.1 สมบัติเชิงความร้อนของของไหลนาโนที่ความเข้มข้น (ϕ) ต่าง ๆ	35
4.2 ผลของการถ่ายเทความร้อน	37
4.2.1 ผลกระทบของความเข้มข้น (ϕ)	37
4.2.2 ผลกระทบของเลข Reynolds (Re)	40
4.3 ผลของกำลังของปั๊ม (Pumping Power)	41
4.4 การหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (Correlations)	43
4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับเลข Reynolds	43
4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับความเข้มข้นของอนุภาคนาโน (ϕ)	45
4.4.3 การหาสหสัมพันธ์ (Multiple Correlations)	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	51
ภาคผนวก	53
เอกสารอ้างอิง	69



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน	7
ตารางที่ 2.1 สรุปพารามิเตอร์แต่ละบทความที่ทำการศึกษา	16
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลพื้นฐานของชิปสำหรับ CPU รุ่น Intel Core i7-920 [11]	18
ตารางที่ 3.2 สมบัติเชิงความร้อนของอนุภาคนาโนของอะลูมินา (Al_2O_3) [6]	20
ตารางที่ 3.3 สมบัติเชิงความร้อนและความเร็วของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	20
ตารางที่ 3.4 ความเร็วที่ทางเข้าของน้ำและของไหลนาโนของอะลูมินา (Al_2O_3)	23
ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบค่าตอบที่ความหนาแน่นของเมชค่าต่าง ๆ สำหรับท่อพื้นผิวเรียบ โดยมีพื้นที่ของโดเมนการคำนวณเท่ากับ $1,000 \text{ mm}^2$	31
ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบค่าตอบที่ความหนาแน่นของเมชค่าต่าง ๆ สำหรับท่อพื้นผิวนูน โดยมีพื้นที่ของโดเมนการคำนวณเท่ากับ 970.825 mm^2	32
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของของไหลฐานและของไหลนาโนอนุภาคอะลูมินาสำหรับพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูน	50
ตารางที่ 5.1 สรุปความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ย (Nu_{ave}) กับความเข้มข้นของของไหลนาโนอนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3) สำหรับพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูน	52

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การระบายความร้อนโดยใช้ของไหล (Water Cooling) [4]	2
รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการทำงาน	5
รูปที่ 1.3 โดเมนการคำนวณและกำหนดสภาวะขอบเขตของการคำนวณ	6
รูปที่ 3.1 การกำหนดสภาวะขอบเขตของโดเมนการคำนวณ	19
รูปที่ 3.2 Node ในสามเหลี่ยมไร้ระเบียบ	25
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	26
รูปที่ 3.4 การสร้างเมชสำหรับท่อผิวเรียบที่มีความหนาแน่นของเมชบริเวณพื้นผิวล่าง ต่าง ๆ กัน	28
รูปที่ 3.5 การสร้างเมชสำหรับท่อผิวเรียบที่มีความหนาแน่นของเมชบริเวณพื้นผิวล่าง ต่าง ๆ กัน	29
รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเลข Nusselt ของการถ่ายเทความร้อนจากการ ไหลของน้ำ ผ่านท่อพื้นผิวเรียบจากการคำนวณและผลการศึกษา [6]	33
รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเลข Nusselt ของการถ่ายเทความร้อนจากการ ไหลของของไหลนาโนของอะลูมินา (Al ₂ O ₃) ที่ความเข้มข้น 3% โดยปริมาตร ผ่านท่อ พื้นผิวเรียบจากการคำนวณและผลการศึกษา [9]	34
รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงความร้อนของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ	36
รูปที่ 4.2 ความเร็วของของไหลนาโนที่ทางเข้าของท่อ	36
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า Nu_{ave} กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ Re ต่าง ๆ	38
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่า $\% \Delta Nu_{ave}$ ของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับน้ำที่ Re ต่าง ๆ	39
รูปที่ 4.5 ผลกระทบของ Nu_{ave} กับ Re ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ สำหรับกรณีผิวเรียบ	40
รูปที่ 4.6 ผลกระทบของ Nu_{ave} กับ Re ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ สำหรับกรณีผิวขรุขระ	41
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนกับ Pumping Power ที่ Re ต่าง ๆ สำหรับกรณีผิวเรียบ	42
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนกับ Pumping Power ที่ Re ต่าง ๆ สำหรับกรณีผิวขรุขระ	42
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนกับ Pumping Power ที่ $Re = 20,000$ สำหรับกรณีผิวเรียบและผิวขรุขระ	43
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ Re ของของไหลฐาน	44
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ Re กรณี $\phi = 1\% v/v$	45
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ ϕ กรณี $Re = 60,000$	46
รูปที่ 4.13 ANOVA table ของของไหลนาโนสำหรับพื้นผิวเรียบ	48
รูปที่ 4.14 ANOVA table ของของไหลนาโนสำหรับพื้นผิวขรุขระ	49

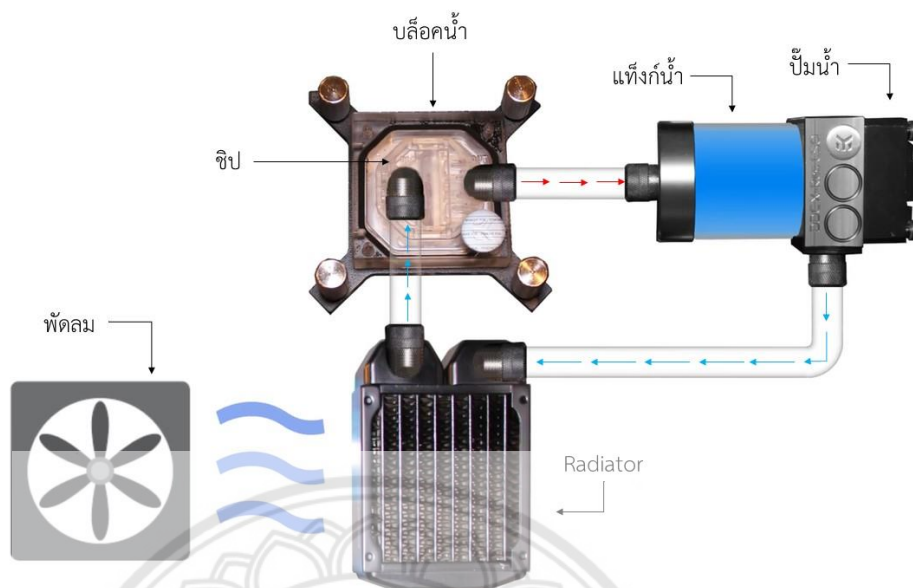
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมได้มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เข้ามาช่วยในการทำงานมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอมพิวเตอร์ เมื่ออุปกรณ์มีการทำงานหนักขึ้นก็จะส่งผลให้เกิดความร้อนมากขึ้น อุปกรณ์ที่สำคัญของคอมพิวเตอร์ คือ หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit – CPU) หรือชิป (Chip) ซึ่งทำหน้าที่ในการคิดคำนวณ ประมวลผล และควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อื่นในระบบ ความร้อนที่ชิปของคอมพิวเตอร์ได้ปล่อยออกมานั้นอาจส่งผลกระทบต่อทำให้เสียหายได้ ดังนั้น การออกแบบระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญต่อการทำงานของคอมพิวเตอร์

การระบายความร้อนดังกล่าวอาศัยน้ำเป็นของไหลทำงาน โดยกระบวนการนี้จะเริ่มต้นด้วยการที่ปั๊มทำการดูดน้ำจากแท็งก์น้ำผ่านหม้อน้ำในคอมพิวเตอร์ (Radiator) จากนั้นจะผ่านบล็อกน้ำ (Water Block) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพื่อไม่ให้ CPU สัมผัสกับของไหลโดยตรง โดยติดตั้งไว้ที่ด้านบนซึ่งเชื่อมต่อกับฝาโลหะ (Integrated Heat Spreader – IHS) ของ CPU ซึ่งทำหน้าที่เป็น Heat Sink ที่ออกแบบมาเพื่อกระจายความร้อนจาก CPU ไปยังระบบระบายความร้อน โดยระหว่างบล็อกน้ำและ IHS มีความขรุขระเล็ก ๆ ทำให้พื้นผิวทั้งสองไม่ได้รับการสัมผัสอย่างเต็มที่ จึงมีการทา Thermal Conductivity Paste ไว้ที่ด้านบน IHS ก่อนจะวางบล็อกน้ำลงไป โดย Thermal Conductivity Paste ทำหน้าที่เป็นตัวกลางเชื่อมระหว่าง บล็อกน้ำและ IHS เพื่อให้พื้นผิวทั้งสองสัมผัสกันมากขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น [1-2] ต่อมาในขณะที่น้ำเคลื่อนที่ผ่านบล็อกน้ำจะมีการดูดซับความร้อนที่ CPU ปล่อยออกมา จากนั้นน้ำจะไหลกลับเข้าสู่แท็งก์น้ำอีกครั้ง ต่อมาน้ำจะไหลเข้าสู่ Radiator โดย Radiator จะทำให้ของเหลวสัมผัสกับอากาศ ซึ่งพัดลมที่ติดอยู่กับ Radiator จะไล่ความร้อนออกจากระบบระบายความร้อน จากนั้นน้ำจะกลับเข้าสู่บล็อกน้ำ และรอบการทำงานจะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ แบบนี้ต่อไป [3] ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การระบายความร้อนโดยใช้ของไหล (Water Cooling) [4]

การถ่ายเทความร้อนด้วยของไหลนาโนเริ่มมีการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยเป็นการนำอนุภาคระดับนาโนเมตรที่อยู่ในรูปของสารประกอบของโลหะ เช่น อะลูมินา (Al_2O_3), ทองแดง (Cu), ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) เป็นต้น ไปผสมกับของไหลฐาน เช่น น้ำ เพื่อให้มีค่าการนำความร้อนที่สูงขึ้นจึงทำให้ของไหลนาโนนั้นช่วยขยายขีดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น แต่เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ชัดเจน อนุภาคนาโนต้องมีเสถียรภาพเท่าที่จะทำได้ เพื่อหลีกเลี่ยงการอุดตันและการตกตะกอน [5] อย่างไรก็ตามงานวิจัยต่าง ๆ ยังไม่สามารถหาข้อสรุปได้อย่างแน่ชัดว่าความเข้มข้นของของไหลนาโนที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดการจับตัวและเป็นเหตุให้ความหนืดของของไหลสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลดลงหรือไม่ ดังนั้นในโครงการนี้เราจึงทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนชิปคอมพิวเตอร์ โดยใช้ของไหลนาโนของ Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นและที่เลข Reynolds ต่าง ๆ เพื่อหาประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. คำนวณการถ่ายเทความร้อนจากชิปคอมพิวเตอร์โดยใช้ของไหลนาโนของ Al_2O_3 ในน้ำไหลผ่านท่อ (Channel Flow) โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
2. ศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของชิปคอมพิวเตอร์ในท่อ 2 มิติ เช่น เลข Reynolds ความเข้มข้นของอนุภาค Al_2O_3 ในน้ำ
3. หาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ของตัวแปรไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนของชิป

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบระบายความร้อนของชิปคอมพิวเตอร์
2. เพื่อเป็นข้อมูลในการประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในการระบายความร้อนของชิปคอมพิวเตอร์ได้เหมาะสม

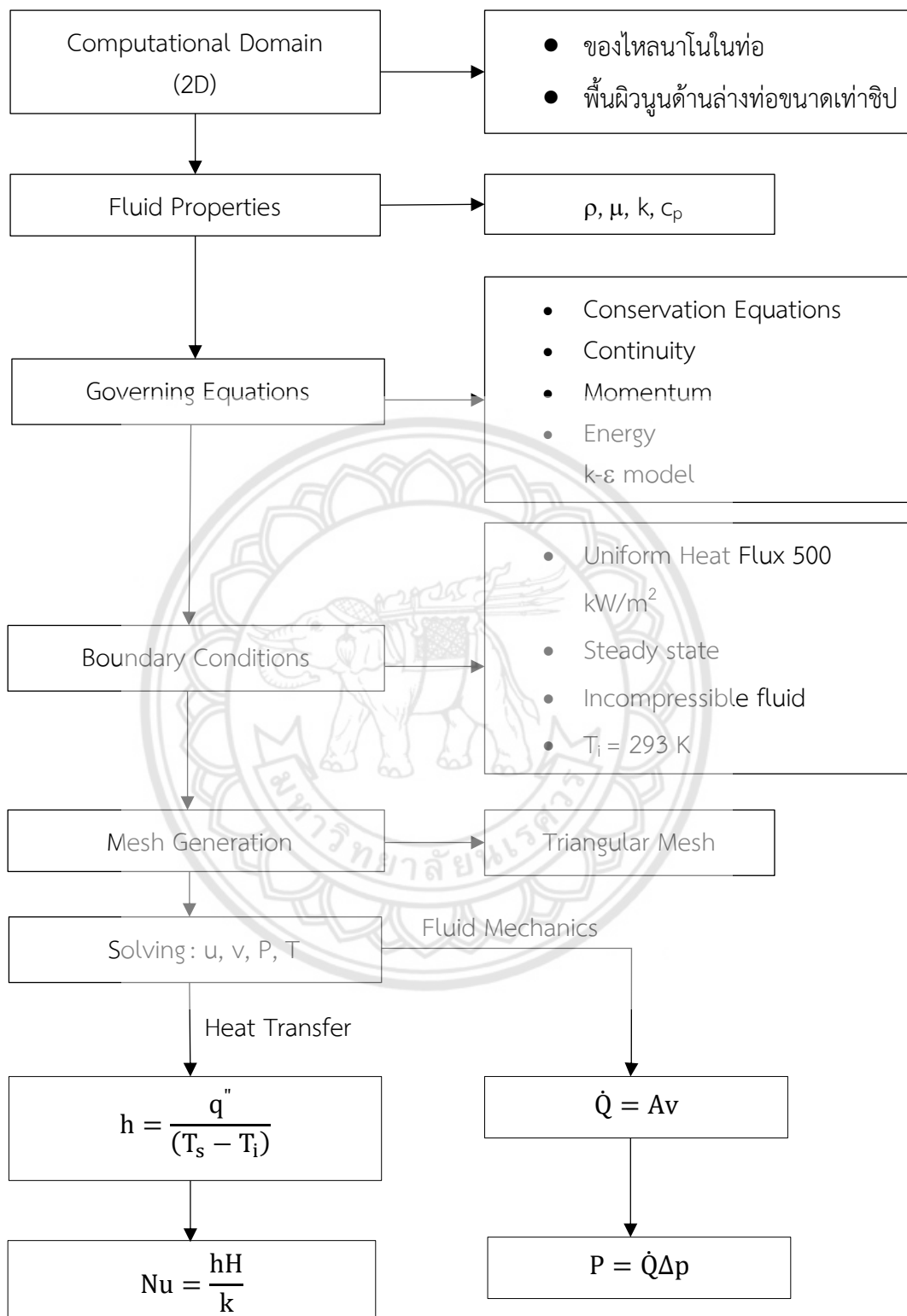
1.4 ขอบเขตของโครงการ

1. โดเมนการคำนวณเป็นการไหลในท่อ 2 มิติ
2. ใช้อนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นอนุภาคนาโนโดยใช้น้ำเป็นของไหลฐาน
3. ใช้ความเข้มข้น (ϕ) ของของไหลนาโนดังนี้ 0.25, 0.5, 0.75, 1, 3, และ 5% โดยปริมาตร
4. เป็นของไหลสถานะเดียว (Single-phase Fluid)
5. การไหลอยู่ที่สภาวะคงที่ (Steady State)
6. เป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) และสมบัติเชิงความร้อนของของไหลคงที่
7. การไหลเป็น Fully Developed ภายในท่อ 2 มิติ
8. การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ตามแบบจำลอง $k - \epsilon$
9. ฟลักซ์ความร้อนของชิปคอมพิวเตอร์มีค่าคงที่ (Uniform Heat Flux) ที่ 500 kW/m^2
10. ชิปคอมพิวเตอร์มีขนาดความยาว 19.45 mm สูง 1.5 mm ติดตั้งไว้ที่พื้นผิวท่อด้านล่าง

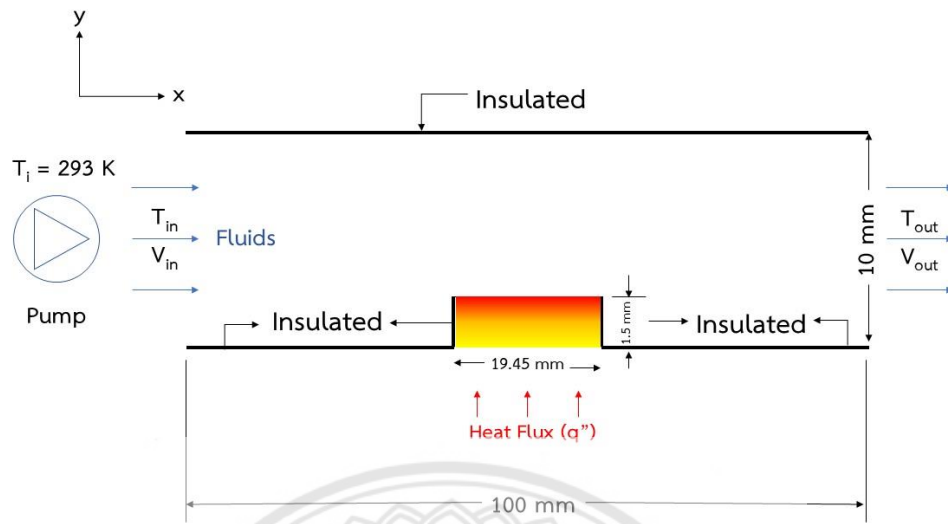
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

รูปที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการนี้โดยเริ่มจากการสร้างโดเมนการคำนวณ ซึ่งในที่นี้เป็นของไหลนาโนในท่อ 2 มิติ โดยมีการติดตั้งชิปคอมพิวเตอร์ไว้ที่พื้นผิวท่อด้านล่าง โดเมนที่ทำการศึกษาแสดงในรูปที่ 1.3 โดยใช้ปั๊มส่งกำลังเพื่อให้ของไหลนาโนไหลเข้าไปภายในท่อ การไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ชิปคอมพิวเตอร์สามารถจำลองได้โดยอาศัยสมการความต่อเนื่อง (Continuity) สมการอนุรักษ์โมเมนตัมหรือสมการ Navier-Stokes และสมการอนุรักษ์พลังงาน โดยกำหนดให้การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนตามแบบจำลอง k- ϵ ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในบทถัดไป สำหรับการวิเคราะห์โจทย์ของสภาวะขอบเขตนี้ จะแบ่งออกเป็นสองกรณี ได้แก่ กรณีโจทย์ของการไหล และกรณีโจทย์ของการถ่ายเทความร้อน แล้วจึงทำการสร้าง Mesh จากนั้นทำการคำนวณหาคำตอบในรูปของความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิ โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) และสุดท้ายเราจะแสดงคำตอบของการถ่ายเทความร้อนในรูปสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) และเลข Nusselt (Nu)

รูปที่ 1.2 แสดงโดเมนการคำนวณและกำหนดสภาวะขอบเขตของการคำนวณโดยเป็นการไหลของของไหลนาโนในท่อ 2 มิติ โดยติดตั้งชิปคอมพิวเตอร์ไว้ที่พื้นผิวท่อด้านล่าง กำหนดให้ท่อมีความสูง 10 mm ความสูงของชิปคือ 1.5 mm โจทย์ของการไหลเป็นการไหลของของไหลนาโนที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ไหลเข้าไปในท่อโดยอาศัยกำลังจากปั๊ม เพื่อถ่ายเทความร้อนจากชิปคอมพิวเตอร์ กรณีโจทย์ของการถ่ายเทความร้อน เรากำหนดให้ที่ทางเข้ามีอุณหภูมิคงที่ที่ 293 K และ Heat Flux คงที่ที่ 500 kW/m²



รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการทำงาน



รูปที่ 1.3 โดเมนการคำนวณและกำหนดสภาวะขอบเขตของการคำนวณ



1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

1.7.1 จัดทำรูปเล่ม	1500	บาท
1.7.2 กระดาษ	500	บาท
1.7.3 อุปกรณ์อื่น ๆ	500	บาท
1.7.4 ค่าซ่อมบำรุงคอมพิวเตอร์	500	บาท



บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 ของไหลนาโน (Nanofluid)

ของไหลนาโนมีลักษณะคล้ายสารแขวนลอยซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นสารประกอบของโลหะ มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร นำไปผสมกับของเหลวฐานเพื่อให้มีค่าการนำความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งในการศึกษานี้ใช้น้ำเป็นของเหลวฐาน ด้วยการผสมอนุภาคนาโนในน้ำ สมบัติของการถ่ายเทความร้อนสามารถที่จะพัฒนาได้อย่างหลากหลาย เช่น ความปั่นป่วนของของไหลจะรุนแรงมากขึ้นเพราะอนุภาคนาโนมีสมบัติในการฟุ้งกระจาย เพิ่มพื้นที่ผิวและความจุความร้อนของของไหล และเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนให้กับของไหล ทั้งนี้ ความหนาแน่นของของไหลนาโน (ρ_{nf}), สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลนาโน (k_{nf}), ความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน ($c_{p,nf}$), และความหนืดพลวัตของของไหลนาโน (μ_{nf}) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของของไหลนาโนและสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้ [6]

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

$$\text{สัมประสิทธิ์การนำความร้อน} \quad k_{nf} = k_{bf}(4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1) \quad (2.2)$$

$$\text{ความร้อนจำเพาะ} \quad c_{p,nf} = (1 - \phi)c_{p,bf} + \phi c_{p,np} \quad (2.3)$$

$$\text{ความหนืดพลวัต} \quad \mu_{nf} = \mu_{bf}(123\phi^2 + 7.3\phi + 1) \quad (2.4)$$

เมื่อ ϕ คือ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน, % โดยปริมาตร (% v/v)

ρ คือ ความหนาแน่น, kg/m^3

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m-K

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ, J/kg-K

μ คือ ความหนืดพลวัต, Pa-s

ตัวย่อ nf แสดงสมบัติของของไหลนาโน (Nanofluid)

bf แสดงสมบัติของของไหลฐาน (Base fluid)

np แสดงสมบัติของอนุภาคนาโน (Particles)

2.1.2 สมการควบคุม (Governing Equations)

ในการศึกษานี้กำหนดให้การไหลอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) เป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) การไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในทอสองมิติ (2D) โดยเป็นไปตามแบบจำลอง k-ε สมการที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

สมการอนุรักษ์มวล (Continuity Equation)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.5)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Navier-Stokes Equations)

แนวแกน x :

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.6)$$

แนวแกน y :

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2.7)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equation)

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu \phi + q''' \quad (2.8)$$

โดยที่ $\mu \phi$ แสดง viscous dissipation ซึ่งเป็นอัตราสุทธิซึ่งงานเชิงกลถูกเปลี่ยนอย่างย้อนกลับไม่ได้ไปเป็นพลังงานความร้อนเนื่องจากผลของความหนืดในของไหล ซึ่งนิยามโดย

$$\mu \phi = \mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.9)$$

เมื่อ u คือ ความเร็วของของไหลในทิศ x, m/s

v คือ ความเร็วของของไหลในทิศ y, m/s

P คือ ความดัน, Pa

T คือ อุณหภูมิ, K

ρ คือ ความหนาแน่น, kg/m³

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m-K

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ, J/kg-K

μ คือ ความหนืดพลวัต, Pa-s

เมื่อทำการแยกส่วนของเรย์โนลด์ (Reynolds Decomposition) ซึ่งเป็นการกระจายของสมบัติของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถหาได้จากผลรวมของค่าเฉลี่ยเวลา (Time Averaging) กับปริมาณผันผวน (Fluctuating Quantity) เราจะได้ตัวแปร ดังนี้ $u = \bar{u} + u'$, $v = \bar{v} + v'$, $P = \bar{P} + P'$ และ $T = \bar{T} + T'$ จึงต้องอาศัยสมการสำหรับการเคลื่อนที่ของของไหลตามแบบจำลอง k-ε ที่ใช้กับการไหลแบบปั่นป่วนเข้ามาช่วยในการคำนวณ เนื่องจาก แบบจำลอง k-ε ได้รับความนิยมอย่างมากสำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมและงานวิจัยเนื่องจากการให้คำตอบที่ค่อนข้างน่าเชื่อถือและใช้หน่วยความจำ (RAM) ไม่สูงมาก [7] ซึ่งแสดงสมการดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + (G_k + G_b) - \rho \varepsilon \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.11)$$

เมื่อ μ_t คือ ความหนืดแบบปั่นป่วน โดยที่ $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$

G_k คือ พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่ $G_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$

G_b คือ พลังงานจลน์เนื่องจากแรงลอยตัว โดยที่ $G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$

รูปแบบจำลอง k-ε มีค่าคงที่ต่าง ๆ ดังนี้ $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ และ $C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|$ เมื่อ v คือความหนืดเชิงจลน์ และ u คือ ความเร็ว สุดท้ายเราจะได้คำตอบในรูป u , v , P และ T ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณในหัวข้อถัด ๆ ไป

2.1.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

ในการถ่ายเทความร้อนจากชิปคอมพิวเตอร์โดยของไหลนาโนไหลผ่านท่อสองมิติ กำหนดให้ของไหลที่ทางเข้ามีอุณหภูมิ T_i ไหลผ่านชิปที่มีฟลักซ์ความร้อน (q'') คงที่ หลังจากใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณสมการที่เกี่ยวข้องในหัวข้อที่แล้ว เราจะได้คำตอบของอุณหภูมิของของไหลนาโนที่สัมผัสกับผิวของชิป (T_s) เราจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ได้ตั้งความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{q''}{(T_s - T_i)} \quad (2.12)$$

จากนั้นแสดงในรูปของ Nusselt number (Nu) ที่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างพื้นผิวท่อด้านบนและด้านล่าง H ดังนี้

$$\text{Nu}_H = \frac{hH}{k} \quad (2.13)$$

- เมื่อ q'' คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสัมผัส, W/m^2
 T_i คือ อุณหภูมิขาเข้า ในที่นี้กำหนดให้คงที่ที่ 293 K
 T_s คือ อุณหภูมิของของไหลนาโนที่สัมผัสกับผิวของชิป, K
 H คือ ความสูงท่อ, m
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล, W/m-K

2.1.4 เลข Reynolds (Reynolds number)

เลข Reynolds เป็นตัวแปรไร้มิติ ซึ่งแสดงอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงหนืด ซึ่งมีความสำคัญสำหรับการกำหนดเงื่อนไขการไหล ใช้ในการอธิบายแบ่งลักษณะการไหลที่แตกต่างกัน สำหรับการไหลในท่อ 2 มิติในที่นี้เลขเรย์โนลด์นิยามโดย

$$\text{Re} = \frac{\rho u H}{\mu} \quad (2.14)$$

- เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น, kg/m^3
 u คือ ความเร็วในการไหล, m/s
 H คือ ความสูงท่อ, m
 μ คือ ความหนืดพลวัตของของไหล, Pa-s

2.1.5 กำลังส่งของปั๊ม (Pumping Power)

Pumping Power (P) เป็นกำลังส่งของปั๊ม ทำหน้าที่เพิ่มกำลังให้แก่ของไหล เพื่อให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านท่อ โดยที่มอเตอร์ให้กำลังแก่ปั๊ม ซึ่งถ้าหากค่า P สูงขึ้นจะทำให้ของไหลนั้นมีความเร็วเพิ่มขึ้นและทำให้ค่า Re เพิ่มมากขึ้นด้วยซึ่งจะส่งผลให้เกิดความไม่เสถียรของ Re ทำให้ลักษณะของการไหลเปลี่ยนไป กำลังส่งของปั๊มนิยามโดย

$$P = \dot{Q}\Delta p \quad (2.15)$$

- เมื่อ \dot{Q} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร, m^3/s
 Δp คือ ความดันลด (Pressure Drop) ระหว่างที่ทางเข้าและทางออกของท่อ, Pa

2.2 วรรณกรรมปริทัศน์

เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดของโมเลกุลเล็กมาก เมื่อเปรียบเทียบกับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งปกติใช้เป็นของไหลฐาน (Base Fluid) Kalteh และคณะ [7] จึงได้ศึกษาการกระจายของอนุภาคนาโนในของเหลวฐาน พบว่า เป็นการกระจายแบบสม่ำเสมอ ซึ่งของไหลนาโนแสดงความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) จึงพิจารณาให้สมบัติเชิงความร้อนของของไหลนาโน ซึ่งได้แก่ ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าเท่ากันในทุก ๆ จุดของของไหลนาโน

Ho และคณะ [5] ได้ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนผ่านท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง $283 \mu\text{m}$ สูง $800 \mu\text{m}$ และท่อยาว 50 mm ของแผงระบายความร้อน โดยใช้ของไหลนาโนของอะลูมินา (Al_2O_3) ในน้ำ ที่ความเข้มข้น 1% และ 2% โดยปริมาตร และมีค่า Hydraulic Diameter (D_h) เท่ากับ $418 \mu\text{m}$ ทำการทดลองที่ Reynolds number (Re) ช่วง 226 ถึง 1,676 และกำหนดให้สภาวะการไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) โดยมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ จากนั้นทำการทดลองเปรียบเทียบการระบายความร้อนของของไหลนาโนและน้ำ พบว่าของไหลนาโนทั้งสองความเข้มข้นนั้นให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าน้ำทั้งคู่ แต่ที่ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตรให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าที่ความเข้มข้น 2% โดยปริมาตร เนื่องจากของไหลนาโนที่ความเข้มข้น 2% โดยปริมาตร เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มทำให้ความหนาของชั้นขอบเขตเพิ่มขึ้นและมีความหนืดของของไหลนาโนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนลดลง และเมื่อนำประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของไหลนาโนที่ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร มาเปรียบเทียบกับน้ำ พบว่า ที่ $\text{Re} = 1544$ ของไหลนาโนที่ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตรให้ Nusselt number (Nu) เพิ่มขึ้น 70% เมื่อเทียบกับน้ำ ทำให้ของไหลนาโนที่ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร ให้ผลลัพธ์ในการระบายความร้อนที่ดีที่สุด

Bianco และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขในการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน ได้แก่ อะลูมินา (Al_2O_3) ในน้ำเป็นของไหลทำงานที่ความเข้มข้น 1%, 4% และ 6% โดยปริมาตร โดยพิจารณาการไหลเป็นการไหลแบบสมมาตรใน 2 มิติผ่านท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีหน้าตัดขนาด $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ และมีความยาว 1 m โดยกำหนด Reynolds number (Re) = 5,000, 10,000, 20,000, 30,000, 40,000, 50,000, 80,000 และ 100,000 อุณหภูมิของไหลขาเข้าคงที่ที่ 293 K และกำหนดให้สภาวะการไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) เป็นไปตามแบบจำลอง k- ϵ โดยมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat Flux) เท่ากับ 500 kW/m^2 พบว่า การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของไหลนาโน นอกจากนี้ยังพบว่าของไหลนาโนที่ความเข้มข้น 6% โดยปริมาตร ที่ $\text{Re} = 100,000$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (h_{ave}) และ Nu สูงที่สุด เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในน้ำและ Re ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) เพิ่มขึ้น

Kalteh และคณะ [8] ได้ทำการทดลองและทำการศึกษาเชิงตัวเลขโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์วอลุ่มในการหาการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนของ Al_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.1% และ 0.2% และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค Al_2O_3 ที่ 40 nm ผ่านท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 28.1 mm สูง 580 μm และยาว 94.3 mm ที่ทำจากซิลิกอนเวเฟอร์เคลือบแก้ว โดยกำหนด Reynold number (Re) อยู่ในช่วง 50 ถึง 300 การไหลของแบบจำลองเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat Flux) เท่ากับ 20.5 kW/m^2 เป็นการไหลที่สถานะคงที่ (Steady state) โดยแสดงผลลัพธ์ในรูปของ Nusselt number (Nu) จากแบบจำลองแบบเฟสเดียวซึ่งพิจารณาให้อนุภาคนาโนและของไหลฐานเป็นเนื้อเดียวกัน และแบบจำลองแบบสองเฟส ซึ่งใช้ทฤษฎี Eulerian ในการพิจารณาให้อนุภาคนาโนและของเหลวฐานไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และในการพิจารณาสมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมจะแยกเฟสระหว่างอนุภาคนาโนและของเหลว จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองแบบสองเฟสที่ความเข้มข้น 0.1% ให้ค่า Nu ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองแบบเฟสเดียว โดยแบบจำลองแบบเฟสเดียวมีความแตกต่างจากผลการทดลอง 10.11% และแบบจำลองแบบสองเฟสมีผลต่างจากการทดลอง 6.32%

Bowers และคณะ [9] ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนของอนุภาค Al_2O_3 อนุภาค SiO_2 ในน้ำที่ความเข้มข้น 1% และ 2% โดยปริมาตร พิจารณาการถ่ายเทความร้อนในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมสองขนาดได้แก่ $300 \mu m \times 120 \mu m$ และ $180 \mu m \times 120 \mu m$ มีความยาวเท่ากันที่ 5.8 cm กำหนดให้สถานะการไหลเป็นการไหลเป็นแบบราบเรียบ กำหนด Reynold number (Re) อยู่ในช่วง 20 ถึง 400 และมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ เมื่อพิจารณาผลกระทบการถ่ายเทความร้อนจากความเข้มข้น Al_2O_3 และ SiO_2 ที่ความเข้มข้น 2% โดยปริมาตร ถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าที่ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร เมื่อพิจารณาหน้าตัดของท่อ พบว่า ที่ท่อหน้าตัด $300 \mu m \times 120 \mu m$ ให้การถ่ายเทความร้อนดีกว่าที่ท่อหน้าตัด $180 \mu m \times 120 \mu m$ และเมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อน พบว่า Al_2O_3 มีค่าการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำกว่า SiO_2 เนื่องจาก Al_2O_3 มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมากกว่า SiO_2 ทำให้มีค่าการถ่ายเทความร้อนน้อย นอกจากนี้การกระจายตัวของ Al_2O_3 ในน้ำน้อยกว่า SiO_2 เพราะอนุภาค Al_2O_3 มีขนาดของอนุภาคและมวลที่มากกว่าซึ่งจะทำให้ Al_2O_3 เกิดการจับตัวเป็นก้อนและตกตะกอนเร็วกว่า

Yarmand และคณะ [10] ทำการศึกษาเชิงตัวเลขโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มในการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Al_2O_3 , ZnO, CuO และ SiO_2 ที่ความเข้มข้น 1%-5% โดยปริมาตร พิจารณาการไหลเป็นการไหลแบบ 2 มิติในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่หน้าตัดท่อ 0.01 m^2 ความยาว 2 m กำหนดการไหลในท่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) เป็นไปตามแบบจำลอง k- ϵ และเป็นการไหลที่สถานะคงที่ (Steady State) กำหนด Reynold number (Re) อยู่ในช่วง 5000 ถึง 25000 ผนังท่อด้านบนและด้านล่างมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat Flux) เท่ากับ 20 kW/m^2 ผนังด้านข้างเป็นฉนวนกันความร้อนทั้ง

สองข้าง เมื่อพิจารณาผลลัพธ์อยู่ในรูปของ Nusselt number (Nu) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient, h) พบว่า ฤทธิ์ของ Nu ที่ทุก ๆ ค่าของ Re ของไหลนาโน SiO₂ ให้ค่า Nu สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับของไหลนาโนชนิดอื่น สามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ SiO₂ > Al₂O₃ > ZnO > CuO เนื่องจาก SiO₂ เป็นสารกึ่งโลหะทำให้มีค่า k น้อยกว่าสารประกอบโลหะตัวอื่น ๆ และเมื่อเป็นสารประกอบกึ่งโลหะทำให้มีมวลโมเลกุลน้อยกว่าสารประกอบโลหะทำให้มีการฟุ้งกระจายของอนุภาคนาโนดีกว่าสารประกอบโลหะ ในขณะที่พิจารณาค่า h พบว่า SiO₂ ให้ค่า h ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับของไหลนาโนชนิดอื่น เนื่องจาก SiO₂ มีสมบัติเป็นสารประกอบกึ่งโลหะ ในขณะที่ สารอื่นที่เป็นสารประกอบของโลหะ โดยที่ Al₂O₃ มากที่สุดรองลงมาเป็น CuO และ ZnO จะทำให้สามารถเรียงลำดับค่า h ได้ดังนี้ Al₂O₃ > ZnO > CuO > SiO₂ [สืบค้นจากผู้จัดทำ]

เมื่อพิจารณาบทความที่ [5-6] และ [8-10] พบว่า ของไหลนาโนสามารถเพิ่ม heat transfer เมื่อเทียบกับน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) [9-10] อย่างไรก็ตาม สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) การเพิ่มความเข้มข้น อาจไปทำให้อนุภาคนาโนรวมตัวเป็นก้อน [5] ทำให้ไปขัดขวางการไหล กล่าวคือการระบายความร้อนโดยอาศัยของไหลนาโนน่าจะเหมาะสมกับการไหลแบบปั่นป่วนมากกว่าการไหลแบบราบเรียบ

นอกจากนี้ชนิดของอนุภาคนาโนส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นสารประกอบของโลหะ เช่น Al₂O₃ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากเป็นสารที่สามารถหาได้ง่ายในธรรมชาติและมีราคาถูก [11] และยังเป็นที่ยอมรับในงานวิจัยข้างต้นที่กล่าวมา แต่บางงานวิจัยเลือกใช้ SiO₂ ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งโลหะของซิลิกอน [9-10] เพราะต้องการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของสารที่แตกต่างกัน และยังพบว่าความเข้มข้นจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ $\phi < 1\% \text{ v/v}$ และ $\phi \geq 1\% \text{ v/v}$ ซึ่งเหมาะกับการไหลที่ต่างกัน กล่าวคือ ที่ $\phi < 1\% \text{ v/v}$ น่าจะเหมาะกับการไหลแบบราบเรียบ เพื่อป้องกันการรวมตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคนาโน ในขณะที่ $\phi \geq 1\% \text{ v/v}$ เหมาะกับการไหลแบบปั่นป่วนและสามารถพิจารณาเป็นเฟสเดียวได้ ความเข้มข้นที่นิยมใช้จะอยู่ในช่วง 1% - 6% โดยปริมาตร มีเพียง Kalteh และคณะ [8] ที่มีการใช้ความเข้มข้นที่ 0.1% และ 0.2% โดยปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปพารามิเตอร์แต่ละบทความที่ทำการศึกษา

No.	ผู้แต่ง	อนุภาคนาโน	ความเข้มข้น (% โดยปริมาตร)	Re	การทดลอง/ การศึกษาเชิงตัวเลข	Findings
1	Ho และคณะ [5]	Al ₂ O ₃	1% และ 2%	226-1,676 Laminar	การทดลอง	<ul style="list-style-type: none"> • $\phi = 1\%$ v/v ให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่า $\phi = 2\%$ v/v เนื่องจากที่ $\phi = 2\%$ v/v เกิดการรวมตัวเป็นก้อนขึ้นของอนุภาคนาโน จึงทำควมหนืดเพิ่มขึ้น จึงไปลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน • ที่ $Re = 1544$ $\phi = 1\%$ v/v ให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าน้ำ 70 %
2	Bianco และคณะ [6]	Al ₂ O ₃	1-6%	5,000-100,000 Turbulent k- ϵ model	การศึกษาเชิงตัวเลข	<ul style="list-style-type: none"> • $\phi = 6\%$ v/v ที่ $Re = 100,000$ ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในน้ำและ Re ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) สูงขึ้น
3	Kalteh และคณะ [8]	Al ₂ O ₃	0.1 และ 0.2% 1 phase : อนุภาคนาโนและของไหลฐานเป็นเนื้อเดียวกัน 2 phases: อนุภาคนาโนและของไหลฐานไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	50-300 Laminar	การทดลองและการศึกษาเชิงตัวเลข	<ul style="list-style-type: none"> • แบบจำลองแบบสองเฟส $\phi = 0.1\%$ v/v ให้ค่า Nu ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองแบบเฟสเดียว
4	Bowers และคณะ [9]	Al ₂ O ₃ SiO ₂	1% และ 2%	20-400 Laminar	การทดลอง	<ul style="list-style-type: none"> • Al₂O₃ และ SiO₂ ที่ $\phi = 2\%$ v/v ถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าที่ $\phi = 1\%$ v/v • ที่ท่อหน้าตัด 300 μm x 120 μm Al₂O₃ และ SiO₂ ให้การถ่ายเทความร้อนดีกว่าที่ผ่านหน้าตัด 180 μm x 120 μm • SiO₂ ให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่า Al₂O₃

No.	ผู้แต่ง	อนุภาคนาโน	ความเข้มข้น (% โดยปริมาตร)	Re	การทดลอง/ การศึกษาเชิง ตัวเลข	Findings
5	Yarmand และคณะ [10]	Al ₂ O ₃ ZnO CuO SiO ₂	1-5%	5000- 25000 Turbulent k-ε model	การศึกษาเชิง ตัวเลข	<ul style="list-style-type: none"> SiO₂ ให้ค่า Nu สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับของไหลนาโนชนิดอื่นสามารถเรียงลำดับ Nu ได้ดังนี้ SiO₂ > Al₂O₃ > ZnO > CuO Al₂O₃ ให้ค่า h สูงที่สุด และ SiO₂ ให้ค่า h ต่ำสุด เนื่องจาก SiO₂ มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ต่ำสุด สามารถเรียงลำดับค่า h ได้ดังนี้ Al₂O₃ > ZnO > CuO > SiO₂



บทที่ 3

ขั้นตอนการคำนวณ

ในบทนี้แสดงการสร้างโดเมนการคำนวณและกำหนดสมบัติของของไหลทำงาน ซึ่งได้แก่ น้ำ และของไหลนาโน โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการประมาณค่าตอบของสมการอนุรักษ์ จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นของเมชที่มีต่อคำตอบ เพื่อหาความหนาแน่นที่เหมาะสมต่อการใช้งาน และสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการคำนวณกับผลลัพธ์จากงานวิจัยจากวรรณกรรม

3.1 โดเมนการคำนวณ (Computational Domain) และขอบเขตของโจทย์

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลของชิป โดยที่ TDP หรือ Thermal Design Power คือค่าพลังงานความร้อนที่ผู้ผลิตอุปกรณ์คำนวณออกมา [12] ในที่นี้พิจารณาชิป CPU รุ่น Intel Core i7-920 ซึ่งมีค่า TDP เท่ากับ 130 W และพื้นที่หน้าตัดของชิปมีขนาด 0.000263 m^2 ทำให้เกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยของพื้นที่ หรือฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ $494,296.58 \text{ W/m}^2$ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้เราจึงกำหนดให้ชิปผลิตฟลักซ์ความร้อน $500,000 \text{ W/m}^2$

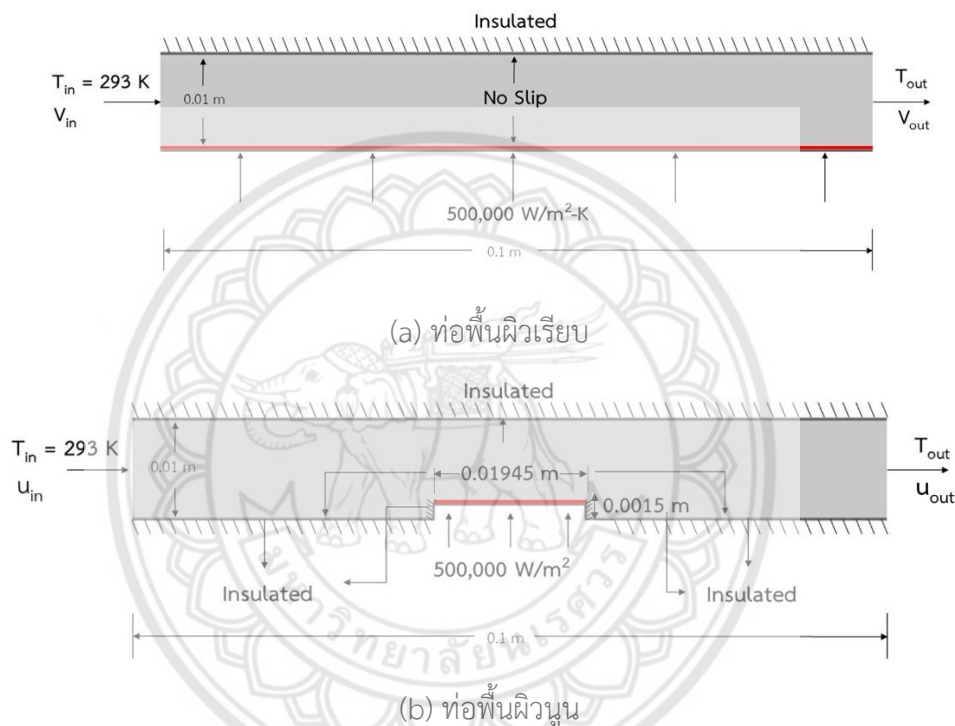
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลพื้นฐานของชิปสำหรับ CPU รุ่น Intel Core i7-920 [12]

ขนาด (ยาว x กว้าง x สูง)	19.45 mm x 13.52 mm x 1.5 mm
พื้นที่หน้าตัดของชิป (m^2)	0.000263
น้ำหนัก (g)	33.2
อุณหภูมิต่ำสุด/สูงสุด ที่ชิปทำงาน	$5^\circ\text{C} - 67.9^\circ\text{C}$
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	$0.8\text{V} - 1.375\text{V}$
Minimum/Maximum power dissipation	15 Watt / 230.14 Watt
Thermal Design Power (Watt)	130 Watt
q''_s	494.297 kW/m^2

โดเมนการคำนวณของงานวิจัยนี้เป็นของไหลนาโนไหลผ่านท่อสี่เหลี่ยมสองมิติ (2D) ที่มีความสูง 0.01 m ยาว 0.1 m ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (a) กำหนดให้ผนังของท่อไม่มีการลื่นไหล (No Slip) ทางเข้าท่อกำหนดความเร็ว u และที่ทางออกกำหนดให้ของไหลไหลออกสู่น้ำที่ความดันบรรยากาศ สำหรับสภาวะขอบเขตเชิงความร้อน (Thermal Boundary Conditions) กรณีผิวเรียบซึ่งใช้เป็น Baseline Case กำหนดให้ที่ผิวด้านล่างของท่อมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ $500,000 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ผิวผิวด้านบนหุ้มฉนวน ของไหลไหลเข้าท่อที่อุณหภูมิ 293 K [6] และที่ทางออกกำหนดให้ไม่มีความ

แตกต่างของอุณหภูมิที่ทางออกกับอุณหภูมิของบรรยากาศภายนอก ($\Delta T = 0$) [13] จึงทำให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนให้แก่ของไหลทำงาน

สำหรับกรณีที่ตั้งขีปลงบนผิวล่างดังรูปที่ 3.1 (b) กำหนดให้ขีปมีความสูง 0.0015 m ยาว 0.01945 m พลักซ์ความร้อนที่ขีปผลิตออกมา $500,000 \text{ W/m}^2\text{-K}$ พื้นผิวที่ไม่มีพลักซ์ความร้อนกำหนดให้เป็นฉนวนทั้งหมด (Insulated) ที่ทางออกกำหนดให้ของไหลที่ไหลผ่านท่อออกสู่น้ำที่ความดันบรรยากาศเช่นกัน



รูปที่ 3.1 การกำหนดสภาวะขอบเขตของโดเมนการคำนวณ

สำหรับของไหลทำงาน (Working Fluid) ในที่นี้ใช้ของไหลนาโนของอนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3) โดยมีน้ำเป็นของไหลฐาน ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติเชิงความร้อนของอนุภาคอะลูมินา ซึ่งอนุภาคอะลูมินามีสมบัติเป็นสารประกอบโลหะ เมื่อนำไปผสมกับของไหลฐานกลายเป็นของไหลนาโน ทำให้มีสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ ค่าความหนาแน่น (ρ), ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k), และค่าความหนืดพลวัต (μ) สูงกว่าน้ำ แต่ค่าความร้อนจำเพาะ (c_p) ต่ำกว่าน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งแสดงสมบัติเชิงความร้อนของของไหลนาโนที่ความเข้มข้น 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%, 3% และ 5% โดยปริมาตร ที่ Re เท่ากับ 20,000, 40,000, 60,000, 80,000, และ 100,000 พบว่าที่ความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่น ค่าความหนืดพลวัต และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ค่าความร้อนจำเพาะมีค่าลดลง

ตารางที่ 3.2 สมบัติเชิงความร้อนของอนุภาคนาโนของอะลูมินา (Al_2O_3) [6]

Material	ρ (kg/m^3)	K (W/m-K)	c_p (J/kg-K)	μ (Pa-s)
Al_2O_3	3,880	36	773	N/A

โดยที่สมบัติเชิงความร้อนของอนุภาคนาโนอะลูมินา ในตารางที่ 3.2 จะไปเปลี่ยนสมบัติของน้ำ ดังแสดงในสมการที่ (3.1) ถึง (3.4) ดังนี้

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

$$\text{สัมประสิทธิ์การนำความร้อน} \quad k_{nf} = k_{bf}(4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1) \quad (3.2)$$

$$\text{ความร้อนจำเพาะ} \quad c_{p,nf} = (1 - \phi)c_{p,bf} + \phi c_{p,np} \quad (3.3)$$

$$\text{ความหนืดพลวัต} \quad \mu_{nf} = \mu_{bf}(123\phi^2 + 7.3\phi + 1) \quad (3.4)$$

เมื่อ ϕ คือ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน, % โดยปริมาตร (% v/v)

ρ คือ ความหนาแน่น, kg/m^3

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m-K

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ, J/kg-K

μ คือ ความหนืดพลวัต, Pa-s

ตัวย่อ nf แสดงสมบัติของของไหลนาโน (Nanofluid)

bf แสดงสมบัติของของไหลฐาน (Base fluid)

np แสดงสมบัติของอนุภาคนาโน (Particles)

ตารางที่ 3.3 สมบัติเชิงความร้อนและความเร็วของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้น (%v/v)	ρ (kg/m^3)	k (W/m-K)	c_p (J/m-K)	μ (Pa-s)
0 (น้ำ)	998.2000	0.5970	4,182.0000	0.000993
0.25	1,005.4045	0.6011	4,173.4775	0.001012
0.5	1,012.6090	0.6052	4,164.9550	0.001032
0.75	1,019.8135	0.6093	4,156.4325	0.001054
1	1,027.0180	0.6135	4,147.9100	0.001078
3	1,084.6540	0.6484	4,079.7300	0.001320
5	1,142.2900	0.6856	4,011.5500	0.001661

3.2 สมการที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 สมการควบคุม (Governing Equations)

ในการศึกษานี้กำหนดให้การไหลอยู่ในสถานะคงที่ (Steady state) เป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) การไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในทอสองมิติ (2D) โดยเป็นไปตามแบบจำลอง k-ε โดยมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

สมการอนุรักษ์มวล (Continuity Equation)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.5)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Navier-Stokes Equations)

แนวแกน x :

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.6)$$

แนวแกน y :

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3.7)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equation)

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu \phi + q''' \quad (3.8)$$

โดยที่ $\mu \phi$ แสดง viscous dissipation ซึ่งเป็นอัตราสุทธิซึ่งงานเชิงกลถูกเปลี่ยนอย่างย้อนกลับไม่ได้ไปเป็นพลังงานความร้อนเนื่องจากผลของความหนืดในของไหล ซึ่งนิยามโดย

$$\mu \phi = \mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.9)$$

เมื่อ u คือ ความเร็วของของไหลในทิศ x , m/s

v คือ ความเร็วของของไหลในทิศ y , m/s

P คือ ความดัน, Pa

T คือ อุณหภูมิ, K

ρ คือ ความหนาแน่น, kg/m³

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m-K

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ, J/kg-K

μ คือ ความหนืดพลวัต, Pa-s

เมื่อทำการ Reynolds Decomposition ซึ่งเป็นการกระจายของสมบัติของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถทำได้จากผลรวมของค่าเฉลี่ยเวลา (Time Averaging) กับปริมาณผันผวน (Fluctuating Quantity) เราจะได้ตัวแปร เป็นดังนี้ $u = \bar{u} + u'$, $v = \bar{v} + v'$, $P = \bar{P} + P'$ และ $T = \bar{T} + T'$ เป็นเหตุให้ตัวไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้น จึงต้องอาศัยสมการสำหรับการเคลื่อนที่ของของไหลตามแบบจำลอง k- ϵ ที่ใช้กับการไหลแบบปั่นป่วนเข้ามาช่วยในการคำนวณดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + (G_k + G_b) - \rho \epsilon \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.11)$$

เมื่อ μ_t คือ ความหนืดแบบปั่นป่วน โดยที่ $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$

G_k คือ พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่ $G_k = -\rho \overline{u'_j u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$

G_b คือ พลังงานจลน์เนื่องจากแรงลอยตัว โดยที่ $G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$

รูปแบบจำลอง k- ϵ มีค่าคงที่ต่าง ๆ ดังนี้ $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ และ $C_{3\epsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|$ เมื่อ v คือ ความหนืดเชิงจลน์ และ u คือ ความเร็ว สุดท้ายเราจะได้อคำตอบในรูปแบบ u , v , P และ T ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อไป

3.2.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

ในการถ่ายเทความร้อนจากชิปคอมพิวเตอร์โดยอาศัยของไหลนาโนไหลผ่านท่อสองมิติ กำหนดให้ของไหลที่ทางเข้ามีอุณหภูมิ T_i ไหลผ่านชิปที่มีฟลักซ์ความร้อน (q'') คงที่ หลังจากใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณสมการที่เกี่ยวข้องในหัวข้อที่แล้ว เราจะได้คำตอบของอุณหภูมิของของไหลนาโนที่สัมผัสกับผิวของชิป (T_s) จากนั้นเราจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ได้ตั้งความสัมพันธ์จากสมการ Newton's law of Cooling ดังนี้

$$h = \frac{q''}{(T_s - T_i)} \quad (3.12)$$

จากนั้นแสดงในรูปแบบตัวแปรไร้มิติของ Nusselt number (Nu) ที่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างพื้นผิวท่อด้านบนและด้านล่าง H ดังนี้

$$\text{Nu}_H = \frac{hH}{k} \quad (3.13)$$

- เมื่อ q'' คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสัมผัส, W/m^2
 T_i คือ อุณหภูมิขาเข้า ไนที่นี้กำหนดให้คงที่ที่ 293 K
 T_s คือ อุณหภูมิของของไหลนาโนที่สัมผัสกับผิวของชิป, K
 H คือ ความสูงท่อ, m
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล, W/m-K

3.3.3 เลข Reynolds (Reynolds number)

เลข Reynolds เป็นตัวแปรไร้มิติ ซึ่งแสดงอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงหนืด ซึ่งมีความสำคัญสำหรับการกำหนดเงื่อนไขการไหล ใช้ในการอธิบายแบ่งลักษณะการไหลที่แตกต่างกัน สำหรับการไหลในท่อ 2 มิติในที่นี่เลขเรย์โนลด์นิยามโดย

$$\text{Re} = \frac{\rho u H}{\mu} \quad (3.14)$$

- เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น, kg/m^3
 u คือ ความเร็วในการไหล, m/s
 H คือ ความสูงท่อ, m
 μ คือ ความหนืดพลวัตของของไหล, Pa-s

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าความเร็วที่ทางเข้าของน้ำและของไหลนาโนของอะลูมินา (Al_2O_3) ที่ความเข้มข้น 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%, 3% และ 5% v/v ที่ Re เท่ากับ 20,000, 40,000, 60,000, 80,000, และ 100,000 พบว่าที่ Re เดียวกัน เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้ความเร็วของของไหลที่ทางเข้าสูงขึ้น

ตารางที่ 3.4 ความเร็วที่ทางเข้าของน้ำและของไหลนาโนของอะลูมินา (Al_2O_3)

ความเข้มข้น (%v/v)	ความเร็วที่ทางเข้า (u), m/s				
	Re = 20,000	Re = 40,000	Re = 60,000	Re = 80,000	Re = 100,000
0	1.99	3.98	5.97	7.96	9.95
0.25	2.01	4.03	6.04	8.05	10.06
0.50	2.04	4.08	6.12	8.16	10.19
0.75	2.07	4.14	6.20	8.27	10.34
1	2.10	4.20	6.30	8.39	10.49
3	2.43	4.87	7.30	9.74	12.17
5	2.91	5.82	8.72	11.63	14.54

3.3.4 กำลังส่งของปั๊ม (Pumping Power)

Pumping Power (P) เป็นกำลังส่งของปั๊ม ทำหน้าที่เพิ่มกำลังให้แก่ของไหล เพื่อให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านท่อ โดยที่มอเตอร์ให้กำลังแก่ปั๊ม ซึ่งถ้าหากค่า P สูงขึ้นจะทำให้ของไหลนั้นมีความเร็วเพิ่มขึ้นและทำให้ค่า Re เพิ่มมากขึ้นด้วย กำลังส่งของปั๊มนิยามโดย

$$P = \dot{Q}\Delta p \quad (3.15)$$

เมื่อ \dot{Q} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร, m^3/s

Δp คือ ความดันลด (Pressure Drop) ระหว่างที่ทางเข้าและทางออกของท่อ, Pa

เนื่องจาก งานวิจัยนี้ศึกษาการไหลใน 2 มิติ ดังนั้นเราจึงพิจารณา Pumping Power ต่อหน่วยความกว้างของท่อ ในหน่วย W/m ดังนี้

$$P = (uA_c)\Delta p \quad (3.16)$$

$$\frac{P}{W} = uH\Delta p \quad (3.17)$$

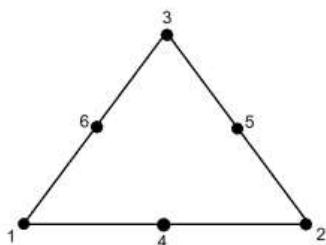
เมื่อ W คือ ความกว้างของท่อ ซึ่งลึกเข้าไปในกระดาษ เนื่องจากเป็นการไหลใน 2 มิติ

3.3 ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

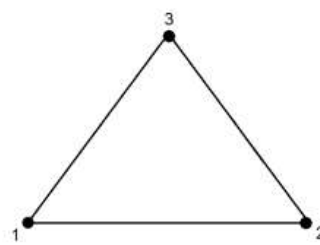
การแก้ปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการแก้สมการ $[K]\{T\} = \{F\} + \{B\}$ เมื่อ $[K]$ คือ Stiffness Matrix, $\{T\}$ คือ Vector ของคำตอบที่ต้องการจะทราบ, $\{F\}$ คือ Force Vector และ $\{B\}$ คือ Boundary Vector จะมีลำดับขั้นตอนในกระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ดังรูปที่ 3.3 โดยจะเริ่มจากการกำหนดสมการควบคุม (Governing Equations) ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2.1 แล้วเข้าสู่กระบวนการสร้าง Residual คือการย้ายข้างสมการมาอยู่ข้างเดียวกันแล้วอินทิเกรตทั้งโดเมน หลังจากนั้นกำหนด Weight Function ขึ้นมาคูณตลอดสมการ ซึ่งจะทำให้สมการแยกออกเป็นอินทิกรัลของโดเมนและอินทิกรัลของขอบเขต แล้วจึงสร้างเมชให้ครอบคลุมทั้งโดเมน จากนั้นเข้าสู่การจัดให้อยู่ในรูปของ Master Element กล่าวคือการแปลงระบบพิกัด (x,y) ให้อยู่ในระบบพิกัด (ξ,η) ซึ่งจะมีค่าในช่วง $[-1,1]$

จากนั้นจึงกำหนด Weight Function ข้างต้นให้เป็น Shape Function ซึ่งนำมาใช้กับระบบพิกัดใน Master Element โดยสมการ Shape Function จะได้ออกมาทั้งหมด 6 สมการ สำหรับ node ทั้ง 6 nodes ของเมชรูปสามเหลี่ยมแบบควอดราติก (Quadratic Triangular Elements) โดยมี node ที่ 1, 2 และ 3 อยู่ที่มุมของสามเหลี่ยมและ node ที่ 4, 5 และ 6 อยู่ที่จุดกึ่งกลางแต่ละด้านของสามเหลี่ยม การกำหนดตำแหน่งของ node ทวนเข็มนาฬิกาดังแสดงในรูป 3.2 (a)

จากนั้นนำ Shape Function ที่ได้ไปแทนใน Jacobian Matrix ซึ่งจะเป็นการจัด Shape function ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์แล้วนำค่าพิกัดที่ได้จากการทำ Master Element มาแทน จากกระบวนการนี้จะได้ Stiffness Matrix ซึ่งเป็นเมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์สำหรับ 1 Element และหลังจากนั้นทำการเรียง Matrices ต่าง ๆ ในระบบของทุก ๆ Node ในทุก Element จะได้ Global Stiffness Matrix หรือ $[K]$ แล้วนำ $[K]$ ไปแทนในสมการ $[K]\{T\} = \{F\} + \{B\}$ ข้างต้นที่กล่าวมาเพื่อหาคำตอบให้อยู่ในรูปของ u, v, T และ P โดยที่ $\{F\}$ คือ เมทริกซ์เวกเตอร์ของแรงที่กระทำที่ Node และ $\{B_{ij}\}$ ได้มาจาก Node ภายนอกที่เป็นขอบเขตและ Node ภายในจะกำหนดค่าของสมาชิกในเมทริกซ์ (Entry) เป็น 0 [14]

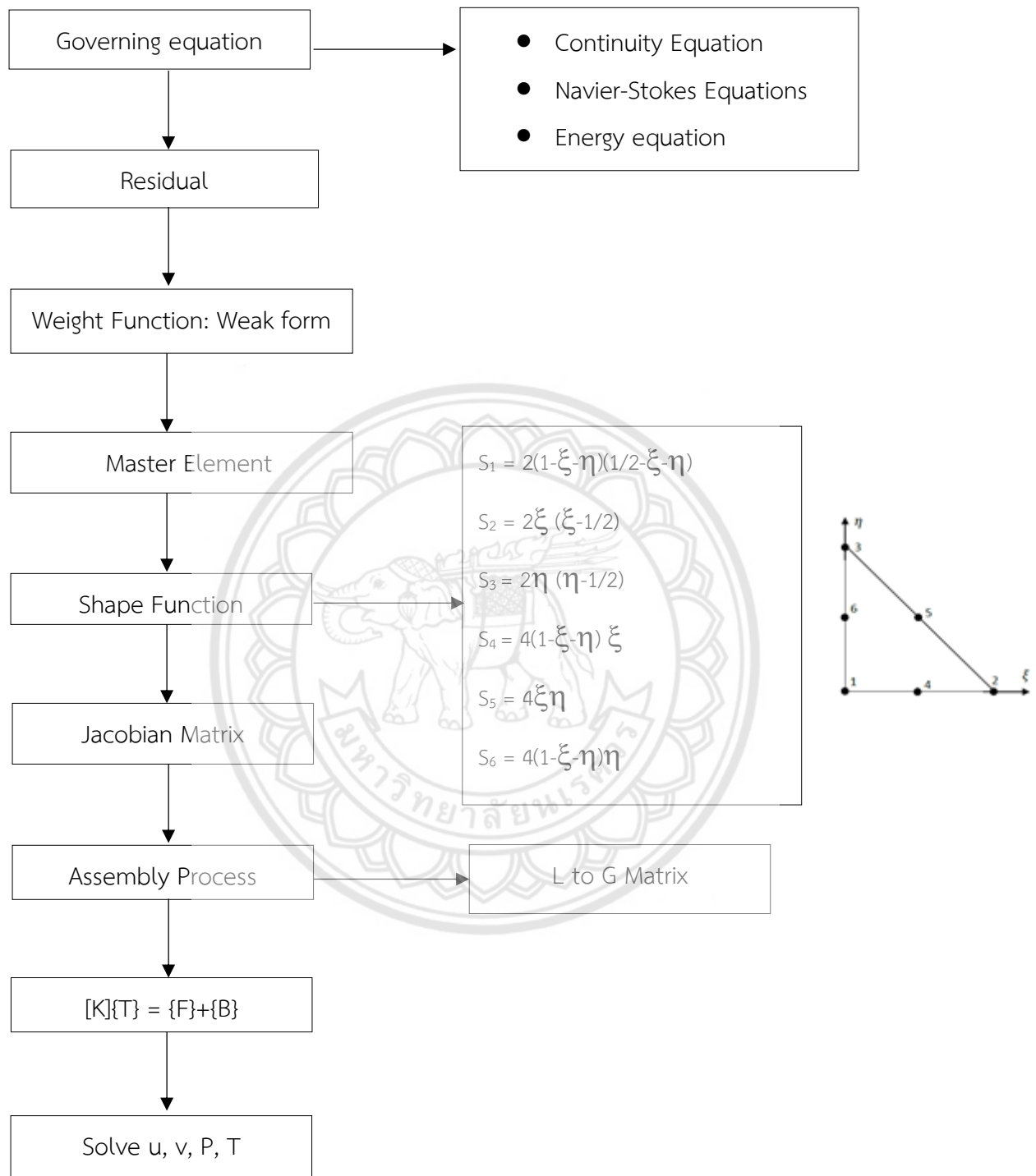


(a) Quadratic Element



(b) Linear Element

รูปที่ 3.2 Node ในสามเหลี่ยมไร้ระเบียบ



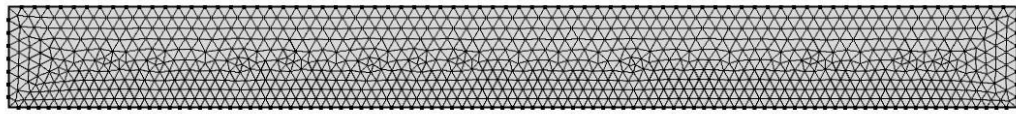
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

3.4 การศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นของเมฆที่มีต่อคำตอบ

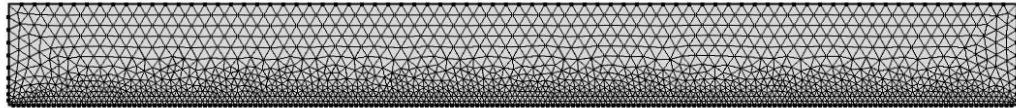
สำหรับการหาคำตอบโดยระเบียบวิธีทางตัวเลขนั้น ความหนาแน่นของเมฆอาจส่งผลต่อความถูกต้องของคำตอบ กล่าวคือ ความหนาแน่นของเมฆสูง ๆ จะนำไปสู่คำตอบที่มีความถูกต้องสูง [15] นอกจากนี้ ชีตความสามารถของคอมพิวเตอร์ เช่น ความเร็วของ CPU ความจุของหน่วยความจำ (RAM) ยังเป็นเรื่องสำคัญ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ CPU Core i5 2.4 GHz RAM ขนาด 8 GB ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบความหนาแน่นของเมฆที่เหมาะสม เพื่อให้เหมาะสมกับขีดความสามารถของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ ในขณะที่ผลลัพธ์มีความถูกต้อง

ในงานวิจัยนี้ เราจะพิจารณาโดเมนการคำนวณ 2 แบบ ทั้งท่อ 2 มิติเรียบทั้งด้านล่างและด้านบน และท่อที่ด้านบนเรียบและมีผิวขรุขระ (ชิป) ขนาดยาว 0.01945 m และสูง 0.0015 m ติดตั้งที่ด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 กำหนดสภาวะขอบเขตดังนี้ ได้แก่ ผนังท่อกำหนดไม่มีการลื่นไถล (no-slip condition) มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผิวด้านล่าง $500,000 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ดังแสดงในรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.1 การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนตามแบบจำลอง $k-\epsilon$ โดยใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน อุณหภูมิของไหลที่ทางเข้าเท่ากับ 293 K และทางออกออกสู่อากาศภายนอก กำหนดให้การไหลอยู่ที่เลข $Re = 20,000 \ 40,000 \ 60,000 \ 80,000$ และ $100,000$

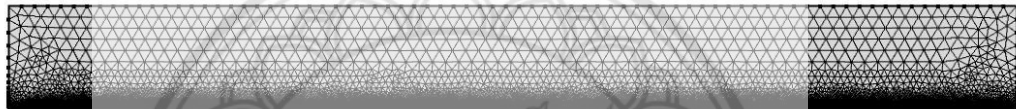
ผลลัพธ์ที่ได้เป็นอุณหภูมิของของไหลที่สัมผัสกับพื้นผิวด้านล่าง (T_s) เพื่อนำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) โดยใช้สมการ Newton's law of cooling ($h = \frac{q_s}{T_s - T_i}$) และสุดท้ายจะได้ตัวเลข Nusselt ($Nu = hH/k$) และค่าเฉลี่ย Nu_{ave} ซึ่งจะใช้ในการเปรียบเทียบ เนื่องจากคำตอบที่ต้องการอยู่ที่พื้นผิวด้านล่างของท่อ ดังนั้น เราจะเปลี่ยนความหนาแน่นของเมฆบริเวณใกล้เคียง ๆ กับพื้นผิวด้านล่าง โดยทำการคำนวณ 5 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลอง A, B, C, D และ E ซึ่งจะมีจำนวนเมฆทั้งโดเมนเป็น 1,835 3,239 17,595 37,259 และ 199,935 เมฆตามลำดับสำหรับพื้นผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และสำหรับผิวขรุขระมีจำนวนเมฆทั้งโดเมนเป็น 2,096 3,635 18,200 38,038 และ 212,830 เมฆตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 นอกจากนี้ พื้นที่ภายในโดเมนของท่อผิวเรียบเป็น $1,000 \text{ mm}^2$ และของท่อที่มีชิปติดตั้งเป็น 970.825 mm^2



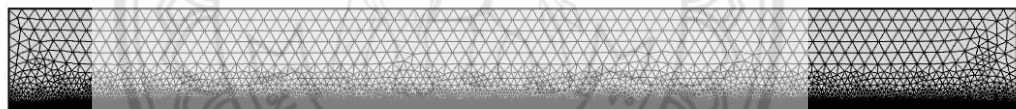
(a) Model A : 1,835 เมช



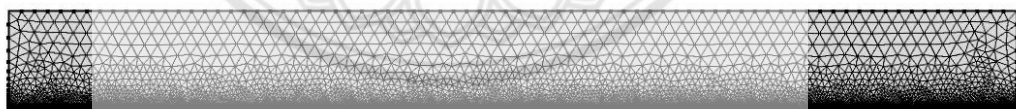
(b) Model B : 3,239 เมช



(c) Model C : 17,595 เมช

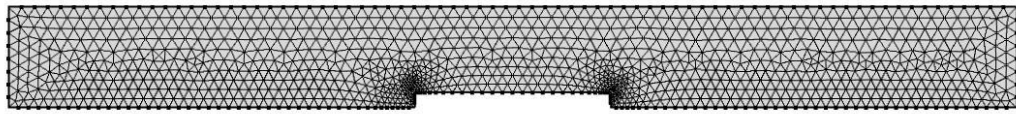


(d) Model D : 37,259 เมช

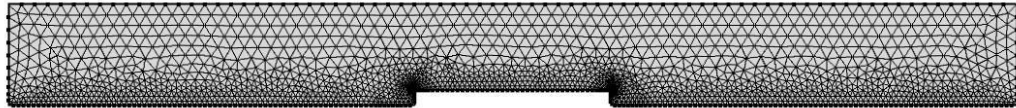


(e) Model E : 199,935 เมช

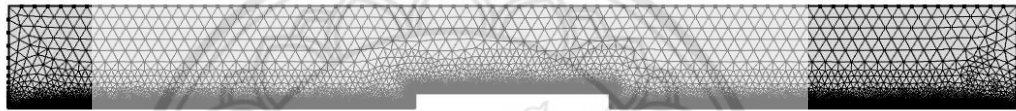
รูปที่ 3.4 การสร้างเมชสำหรับท่อผิวเรียบที่มีความหนาแน่นของเมชบริเวณพื้นผิวล่างต่าง ๆ กัน



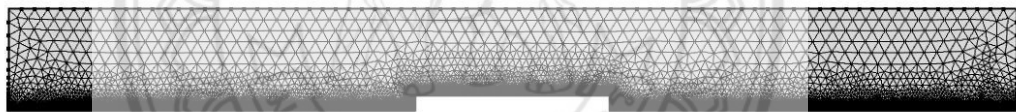
(a) Model A : 2,096 เมช



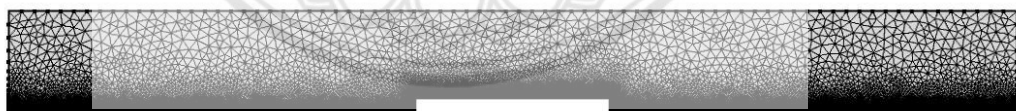
(b) Model B : 3,635 เมช



(c) Model C : 18,200 เมช



(d) Model D : 38,038 เมช



(e) Model E : 212,830 เมช

รูปที่ 3.5 การสร้างเมชสำหรับท่อพินูนที่มีความหนาแน่นของเมชบริเวณพื้นผิวต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ในรูปแบบของ Nu_{ave} จากแบบจำลอง A-E ดังที่กล่าวข้างต้น จากนั้นทำการพิจารณาค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของเมชซึ่งคำนวณได้จาก $\frac{\text{จำนวนเมช}}{\text{พื้นที่ทั้งโดเมนการคำนวณ}}$ ค่า Nu_{ave} จำนวน RAM และเวลาที่ใช้ของแต่ละแบบจำลอง โดยที่กำหนดให้แบบจำลอง E มีความถูกต้องมากที่สุดเนื่องจากมีความหนาแน่นของเมชสูงที่สุดและใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ พบว่า สำหรับท่อผิวเรียบที่แบบจำลอง C และ D มีค่า Nu ต่างกับแบบจำลอง E ไม่เกิน 4% ในทุกกรณีใช้ RAM และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ น้อยกว่าแบบจำลอง E และยังพบว่า สำหรับท่อแบบผิวขรุขระเมื่อเปรียบเทียบค่า Nu_{ave} แบบจำลอง C และ D ก็มีค่า Nu_{ave} ส่วนใหญ่ความแตกต่างจากแบบจำลอง E ไม่เกิน 3% มีเพียง $Re = 60,000$ เท่านั้นที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 8.05% ในด้านของ RAM และเวลาที่ใช้ก็น้อยกว่าแบบจำลอง E อย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในตารางที่ 3.6 อย่างไรก็ตามในการเลือกความหนาแน่นของเมชที่จะนำมาใช้นั้นควรคำนึงถึงขีดความสามารถของคอมพิวเตอร์ด้วย ดังนั้นจึงเลือกแบบจำลอง C เพราะมีค่าความคลาดเคลื่อน Nu_{ave} อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อีกทั้งยังใช้ RAM และเวลาในการคำนวณไม่สูงมาก

อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนเมชขึ้นซึ่งจำทำให้เมชมีขนาดเล็กลง อาจจะส่งผลให้คุณภาพของเมช (Mesh Quality) ลดลง จะสังเกตได้จากตารางที่ 3.5 และ 3.6 เมื่อเมชมีขนาดเล็กลงส่งผลให้ค่าคุณภาพของเมชจะลดลงเช่นเดียวกัน ที่แบบจำลอง E จะเห็นได้ชัดเจนว่ามีความละเอียดของเมชสูงที่สุดแต่ให้คุณภาพเมชเท่ากับ 0.4545 ในขณะที่แบบจำลอง C และ D ให้คุณภาพของเมชที่ 0.5382 และ 0.5305 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบคำตอบที่ความหนาแน่นของเมชค่าต่าง ๆ สำหรับท่อพื้นผิวเรียบ โดยมีพื้นที่ของโดเมนการคำนวณเท่ากับ $1,000 \text{ mm}^2$

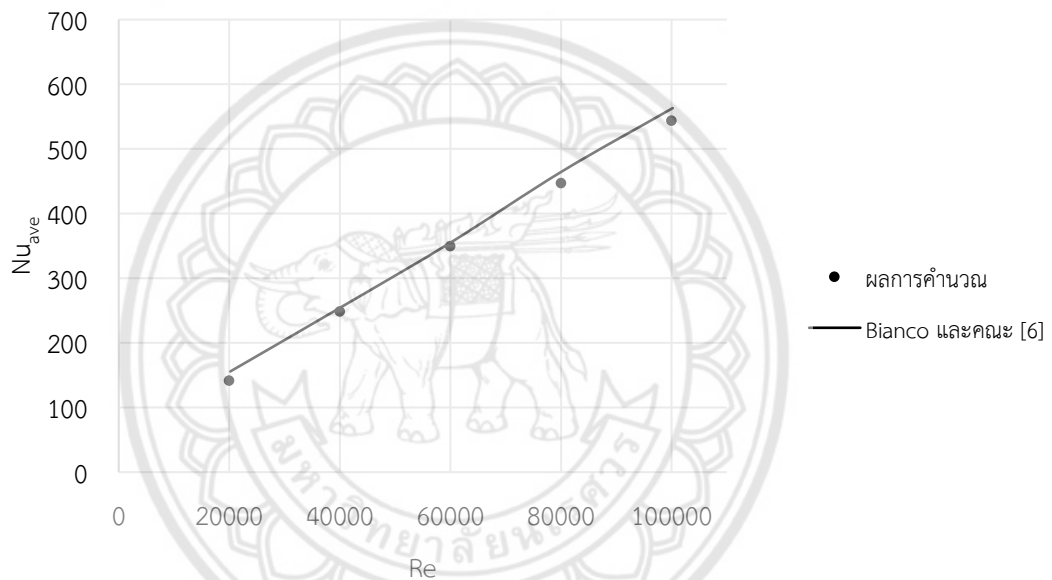
Re	Model	ระยะห่างระหว่างเมชที่ผิวล่าง (mm)	จำนวนเมชทั้งโดเมน (เมช)	ความหนาแน่นเฉลี่ยของเมช (เมช/mm ²)	Mesh Quality	NU_{ave}	RAM (GB)	เวลาที่ใช้ (s)	ผลต่างจาก E (%)
20,000	A	1	1,835	1.835	0.6831	204.37	1.23	25	35.04
	B	0.5	3,239	3.239	0.6363	163.62	1.2	34	8.11
	C	0.1	17,595	17.595	0.5382	152.87	1.24	160	1.01
	D	0.05	37,259	37.259	0.5305	150.55	1.47	400	0.53
	E	0.01	199,935	199.935	0.4545	151.34	2.36	2655	0.00
40,000	A	1	1,835	1.835	0.6831	399.203	1.41	15	54.11
	B	0.5	3,239	3.239	0.6363	329.021	1.42	22	27.02
	C	0.1	17,595	17.595	0.5382	258.797	1.43	98	0.09
	D	0.05	37,259	37.259	0.5305	261.377	1.53	202	0.90
	E	0.01	199,935	199.935	0.4545	259.041	2.49	1417	0.00
60,000	A	1	1,835	1.835	0.6831	599.447	1.41	15	67.68
	B	0.5	3,239	3.239	0.6363	499.463	1.34	22	39.71
	C	0.1	17,595	17.595	0.5382	348.106	1.41	93	2.63
	D	0.05	37,259	37.259	0.5305	355.271	1.57	195	0.62
	E	0.01	199,935	199.935	0.4545	357.502	2.55	1382	0.00
80,000	A	1	1,835	1.835	0.6831	813.76	1.32	24	80.49
	B	0.5	3,239	3.239	0.6363	671.19	1.32	33	48.87
	C	0.1	17,595	17.595	0.5382	433.78	1.37	150	3.79
	D	0.05	37,259	37.259	0.5305	446.13	1.49	320	1.05
	E	0.01	199,935	199.935	0.4545	450.86	2.47	2352	0.00
100,000	A	1	1,835	1.835	0.6831	1,018.62	1.04	24	87.84
	B	0.5	3,239	3.239	0.6363	844.36	1.2	37	55.70
	C	0.1	17,595	17.595	0.5382	530.20	1.24	154	2.23
	D	0.05	37,259	37.259	0.5305	525.34	1.45	312	3.12
	E	0.01	199,935	199.935	0.4545	542.29	2.33	2228	0.00

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบค่าตอบที่ความหนาแน่นของเมชค่าต่าง ๆ สำหรับท่อพื้นผิวขรุขระ โดยมีพื้นที่ของโดเมนการคำนวณเท่ากับ 970.825 mm^2

Re	Model	ระยะห่างระหว่างเมชที่ผิวล่าง (mm)	จำนวนเมชทั้งโดเมน (เมช)	ความหนาแน่นเฉลี่ยของเมช (เมช/mm ²)	Mesh Quality	Nu_{ave}	RAM (GB)	เวลาที่ใช้ (s)	ผลต่างจาก E (%)
20,000	A	1	2,096	2.159	0.6373	103.983	1.13	28	4.084
	B	0.5	3,635	3.744	0.5789	86.309	1.21	36	20.386
	C	0.1	18,200	18.747	0.5521	109.810	1.36	211	1.291
	D	0.05	38,038	39.181	0.5354	112.602	1.55	442	3.867
	E	0.01	212,830	219.226	0.5063	108.410	2.77	3364	0.000
40,000	A	1	2,096	2.159	0.6373	303.673	1.7	30	42.06
	B	0.5	3,635	3.744	0.5789	256.225	1.75	47	19.86
	C	0.1	18,200	18.747	0.5521	230.985	1.95	214	8.05
	D	0.05	38,038	39.181	0.5354	221.374	2.16	526	3.56
	E	0.01	212,830	219.226	0.5063	213.770	2.79	3952	0.00
60,000	A	1	2,096	2.159	0.6373	457.788	1.28	31	36.148
	B	0.5	3,635	3.744	0.5789	383.038	1.34	49	13.917
	C	0.1	18,200	18.747	0.5521	346.345	1.52	198	3.004
	D	0.05	38,038	39.181	0.5354	345.941	1.78	413	2.884
	E	0.01	212,830	219.226	0.5063	336.243	2.76	3480	0
80,000	A	1	2,096	2.159	0.6373	408.213	1.28	26	3.72
	B	0.5	3,635	3.744	0.5789	360.469	1.27	33	14.98
	C	0.1	18,200	18.747	0.5521	424.775	1.31	116	0.19
	D	0.05	38,038	39.181	0.5354	438.69	1.4	259	3.47
	E	0.01	212,830	219.226	0.5063	423.967	2.36	3090	0.00
100,000	A	1	2,096	2.159	0.6373	511.427	1.18	25	3.30
	B	0.5	3,635	3.744	0.5789	453.670	1.31	32	14.22
	C	0.1	18,200	18.747	0.5521	536.686	1.5	108	1.47
	D	0.05	38,038	39.181	0.5354	548.151	1.64	215	3.64
	E	0.01	212,830	219.226	0.5063	528.899	2.42	2984	0.00

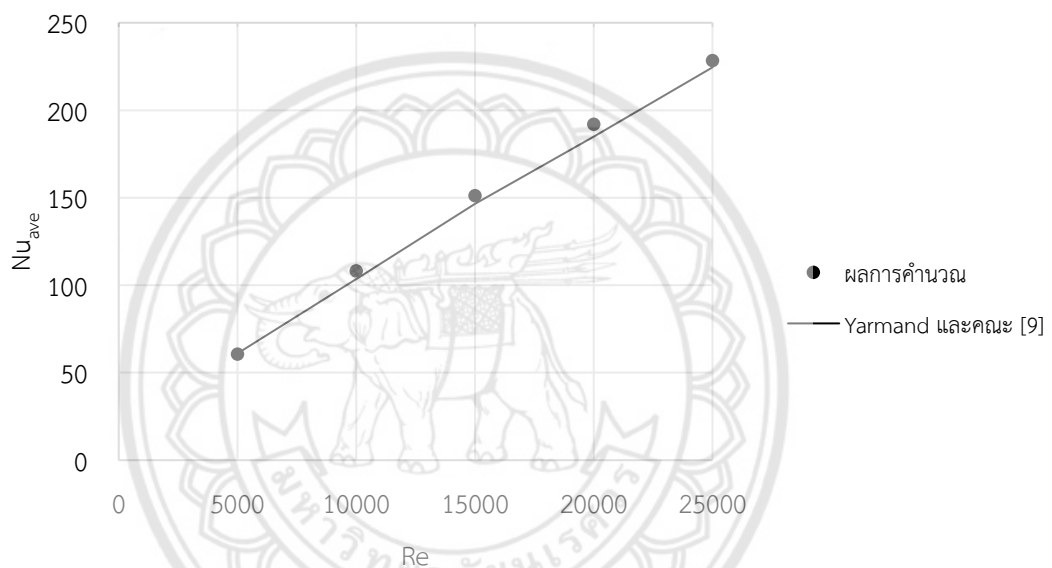
3.5 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลจากงานวิจัยจากรรณกรรม

รูปที่ 3.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณ Nu_{ave} จากการวิจัยนี้กับการศึกษาของ Bianco และคณะ [6] โดยใช้แบบจำลอง C ในการเปรียบเทียบ ซึ่งใช้ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีหน้าตัดขนาด 10 mm x 10 mm และมีความยาว 1 m ในงานวิจัยของเรากำหนดขอบเขตดังนี้ อุณหภูมิทางเข้าท่อเท่ากับ 293K พลักซ์ความร้อนคงที่ 500 kW/m^2 ที่เลข Reynolds ระหว่าง 20,000 ถึง 100,000 โดยใช้ น้ำเป็นของไหลทำงาน ผลการเปรียบเทียบ พบว่า ที่เลข Reynolds 20,000 40,000 60,000, 80,000 และ 100,000 ให้ค่า Nu_{ave} ที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Bianco ซึ่งแตกต่างกันคิดเป็น 9.12%, 2.07%, 1.58%, 3.85% และ 3.43% ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเลข Nusselt ของการถ่ายเทความร้อนจากการไหลของน้ำผ่านท่อพื้นผิวเรียบจากการคำนวณและผลการศึกษา [6]

นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบค่าของ Nusselt เฉลี่ยจากการคำนวณกับผลการศึกษาของ Yarmand และคณะ [10] โดยเลือกท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่หน้าตัดท่อ 0.01 m^2 และความยาว 2 m อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของเรากำหนดขอบเขตดังนี้ อุณหภูมิทางเข้าท่อเท่ากับ 300 K ผนังท่อด้านบนและด้านล่างมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ 20 kW/m^2 ที่เลข Reynolds ระหว่าง $5,000$ ถึง $30,000$ โดยมีของไหลนาโนของอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นของไหลทำงานที่ความเข้มข้น $3\% \text{ v/v}$ พบว่า ที่ $\text{Re} = 5,000 \ 10,000 \ 15,000 \ 20,000$ และ $25,000$ มีค่า Nu_{ave} ที่มีความแตกต่างกับงานวิจัยของ Yarmand คิดเป็น $1.7\%, 0.5\%, 3.1\%, 3.8\%$ และ 4.5% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Yarmand และคณะ [10] ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเลข Nusselt ของการถ่ายเทความร้อนจากการไหลของของไหลนาโนของอะลูมินา (Al_2O_3) ที่ความเข้มข้น 3% โดยปริมาตร ผ่านท่อพื้นผิวเรียบจากการคำนวณและผลการศึกษา [10]

บทที่ 4

ผลการคำนวณและการอภิปรายผล

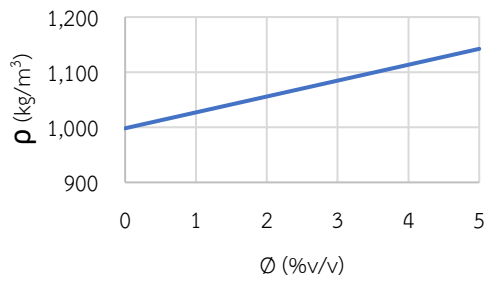
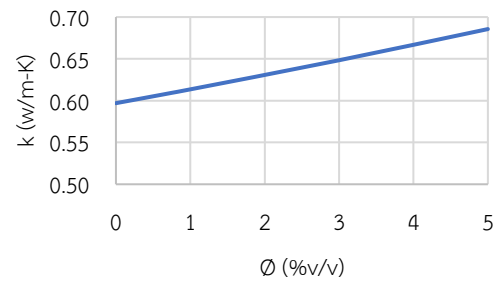
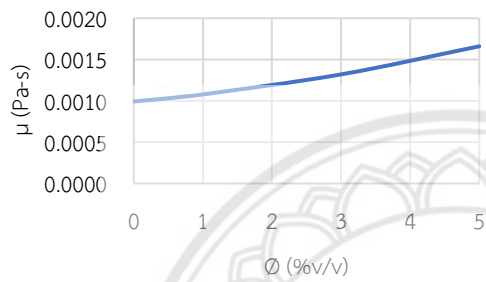
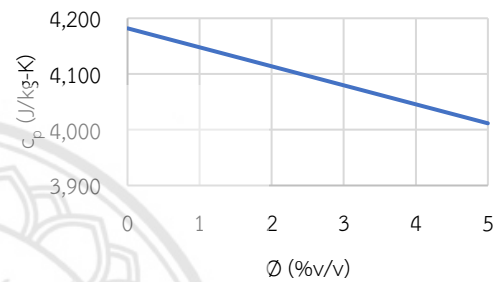
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยแสดงผลในรูปของเลขไร์หน่วย Nusselt Number (Nu) ของการไหลผ่านท่อที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูน โดยที่พื้นผิวล่างมีการกำหนดให้ฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ $500,000 \text{ W/m}^2$ ในงานวิจัยนี้เราใช้อนุภาคนาโนเป็นอนุภาคของอะลูมินา (Al_2O_3) โดยมีน้ำเป็นของไหลฐาน และศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของของไหลนาโน (ϕ) และเลข Reynolds (Re) นอกจากนี้ยังได้พิจารณาผลลัพธ์ในรูปของ Pumping Power ต่อหน่วยความกว้างของท่อด้วย

สุดท้ายเป็นการหาสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่าง Nu กับ ϕ และ Re โดยอาศัยการวิเคราะห์แบบพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) ผ่านการใช้ ANOVA Table

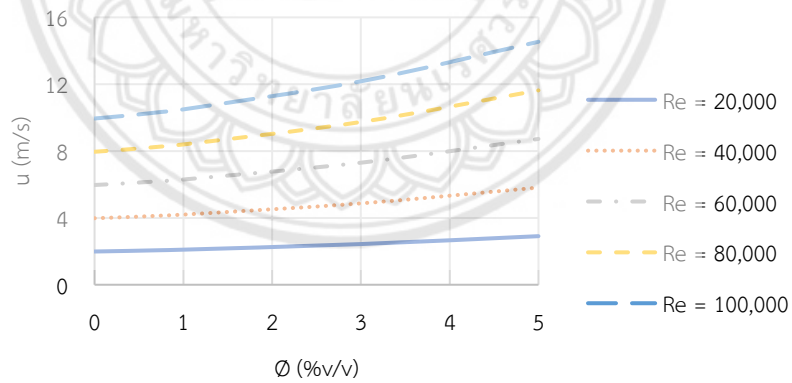
4.1 สมบัติเชิงความร้อนของของไหลนาโนที่ความเข้มข้น (ϕ) ต่าง ๆ

ในหัวข้อนี้ทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยการไหลผ่านท่อ 2 มิติที่มีพื้นด้านล่างผิวเรียบและพื้นผิวนูน โดยอาศัยสมบัติเชิงความร้อนของของไหลนาโนดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคอะลูมินาในน้ำมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้ความหนาแน่น (ρ) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) และความหนืดพลวัต (μ) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (c_p) มีค่าลดลง

รูปที่ 4.2 แสดงความเร็วของของไหลนาโนที่ทางเข้าของท่อที่ Re คงที่ที่ 20,000, 40,000, 60,000, 80,000 และ 100,000 เนื่องจากนิยามของ Re ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็ว ($\text{Re} = \frac{\rho u H}{\mu}$) เมื่อพิจารณาที่ Re และความสูงของท่อ (H) คงที่ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของของไหลนาโนมีค่าสูงขึ้น ความเร็วของของไหลนาโนที่ทางเข้า (u) มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ของไหลนาโนที่ $\phi = 5\% \text{ v/v}$ ที่ $\text{Re} = 100,000$ มีความเร็วที่ทางเข้าสูงที่สุด ซึ่งสูงกว่าน้ำที่ Re เดียวกัน คิดเป็น 46.17% และมีความเร็วที่ทางเข้าสูงกว่าของไหลนาโนที่ $\phi = 0.25\%, 0.50\%, 0.75\%, 1\%$ และ $3\% \text{ v/v}$ ที่ Re เดียวกัน คิดเป็น 44.46%, 42.68%, 40.69%, 38.53% และ 19.48% ตามลำดับ สำหรับผลของการเปรียบเทียบความเร็วที่ค่า Re อื่น ๆ นำเสนออยู่ในภาคผนวก x

(a) ความหนาแน่น (ρ)(b) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k)(c) ความหนืดพลวัต (μ)(d) ค่าความร้อนจำเพาะ (c_p)

รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงความร้อนของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.2 ความเร็วของของไหลนาโนที่ทางเข้าของท่อ

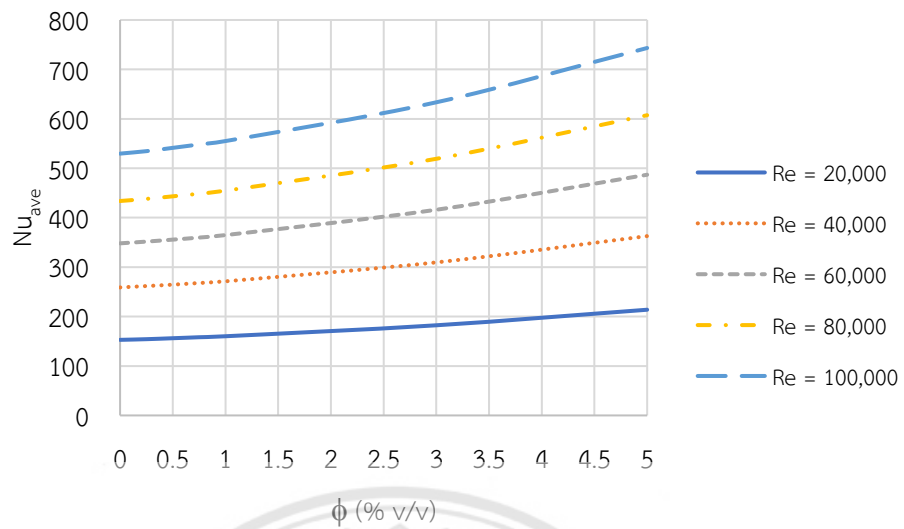
4.2 ผลของการถ่ายเทความร้อน

4.2.1 ผลกระทบของความเข้มข้น (ϕ)

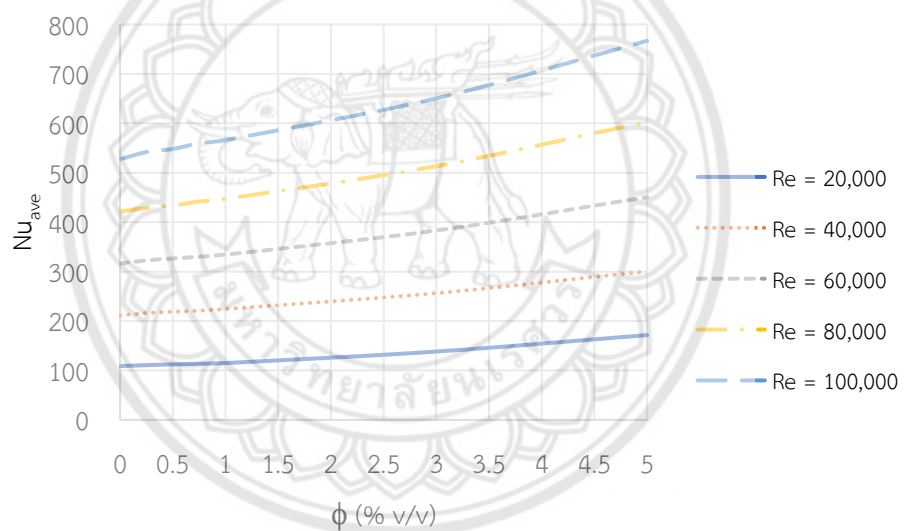
ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาผลกระทบของความเข้มข้น (ϕ) ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของการไหลผ่านท่อ โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของอนุภาค Al_2O_3 ที่ $\phi = 0\% - 5\%$ v/v ที่เลข Re ในช่วง 20,000 - 100,000 โดยกำหนดให้มีพลักซ์ความร้อนคงที่ที่บริเวณผิวล่างสำหรับท่อพื้นผิวเรียบ และเฉพะะบริเวณที่ติดตั้งชิปสำหรับพื้นผิวนูน สุดท้ายจะแสดงการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลข Nusselt

รูปที่ 4.3 แสดงเลข Nusselt เฉลี่ย (Nu_{ave}) ของน้ำเปรียบเทียบกับของไหลนาโนของ Al_2O_3 สำหรับพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูน (ชิป) ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบ Nu_{ave} ระหว่างน้ำ ($\phi = 0\%$ v/v) และของไหลนาโนที่ $\phi = 0.25\%, 0.50\%, 0.75\%, 1\%, 3\%$ และ 5% v/v พบว่า ของไหลนาโนที่ทุกค่าความเข้มข้นให้ Nu_{ave} สูงกว่าน้ำ โดยของไหลนาโนที่ $\phi = 5\%$ v/v ให้ค่า Nu_{ave} สูงที่สุด รองลงมาเป็นที่ $\phi = 3\%, 1\%, 0.75\%, 0.5\%$ ตามลำดับ และที่ $\phi = 0.25\%$ v/v ให้ค่า Nu_{ave} ต่ำที่สุดที่ทุกค่าของ Re เนื่องจากการที่ความเข้มข้น (ϕ) ของของไหลนาโนที่เพิ่มขึ้นไปเปลี่ยนสมบัติเชิงความร้อนของของไหลฐาน ทำให้ค่าความหนาแน่น (ρ) สูงขึ้นส่งผลให้อัตราของโมเมนตัมสูงขึ้น ทำให้ถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น $\dot{m}V = (\rho v)V$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bianco และคณะ [6] ที่กล่าวว่า การเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคอะลูมินาส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) สูงขึ้น จะส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น

รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบ Nu_{ave} เป็นเปอร์เซ็นต์ของของไหลนาโนกับของน้ำ ($\Delta\text{Nu}_{\text{ave}} = \text{Nu}_{\text{nf}} - \text{Nu}_{\text{b}}$) พบว่า สำหรับพื้นผิวเรียบที่ความเข้มข้นเดียวกันที่ทุก ๆ ค่าของ Re จะให้ค่า $\Delta\text{Nu}_{\text{ave}}$ ใกล้เคียงกัน ในขณะที่พื้นผิวนูน ที่ ϕ น้อยกว่า 1 มีค่า $\Delta\text{Nu}_{\text{ave}}$ ใกล้เคียงกัน และที่ $\phi = 3\%, 5\%$ v/v Re = 20,000 ให้ค่า $\Delta\text{Nu}_{\text{ave}}$ สูงที่สุด รองลงมาเป็นที่ Re = 100,000 ในขณะที่ค่า Re อื่น ๆ ให้ผลต่างที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากที่ Re = 20,000 $\phi=3$ และ 5% v/v มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) สูงเนื่องจากความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและสมบัติเชิงความร้อนของของไหล แต่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ต่ำ เนื่องจากที่ Re = 20,000 ความเร็วของการไหลต่ำสุด จึงพาความร้อนบริเวณผิวชิปได้น้อย จากความสัมพันธ์ $\text{Nu} = hH/k$ จึงส่งผลให้ $\Delta\text{Nu}_{\text{ave}}$ ที่ Re = 20,000 $\phi=3$ และ 5% v/v เทียบกับน้ำนั้นมีค่ามากกว่ากรณีอื่น ๆ

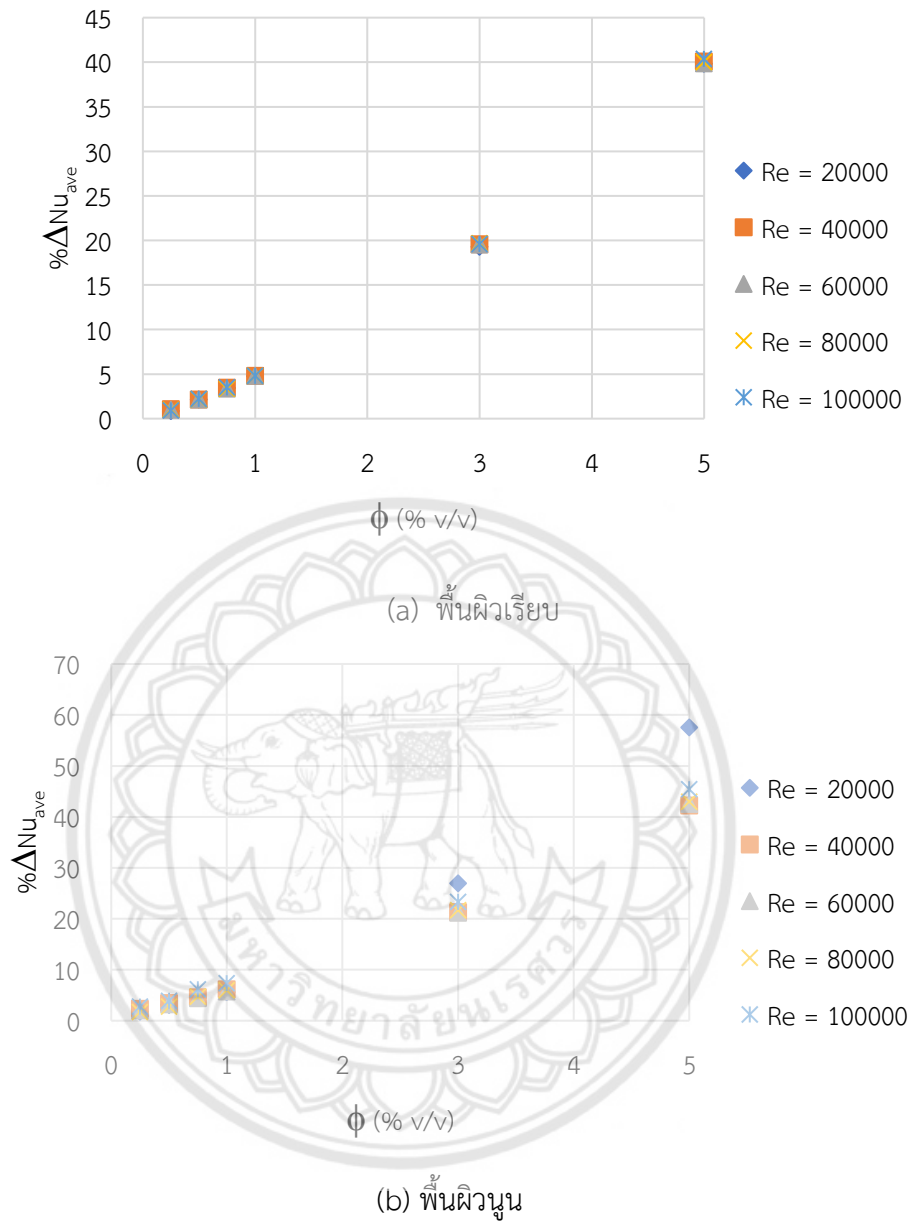


(a) พื้นผิวเรียบ



(b) พื้นผิวรูพรุน

รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า Nu_{ave} กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ Re ต่าง ๆ

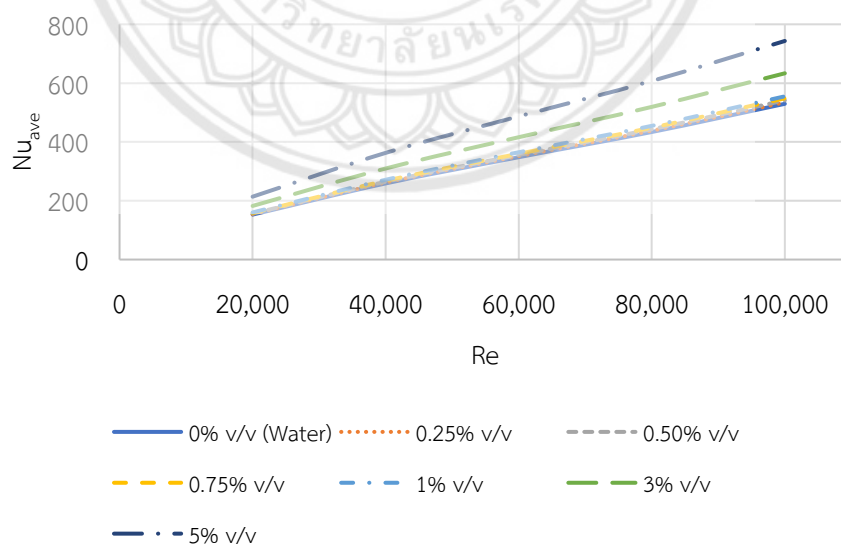


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่า $\% \Delta Nu_{ave}$ ของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับน้ำที่ Re ต่าง ๆ

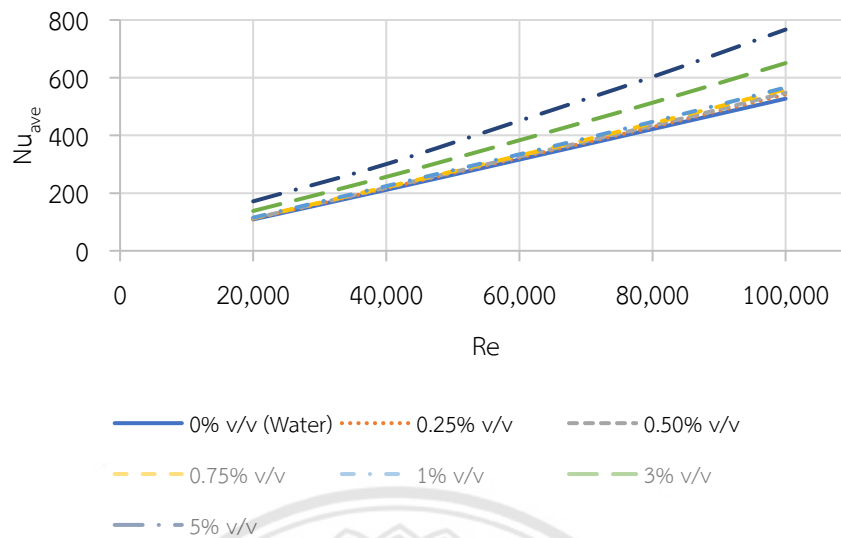
4.2.2 ผลกระทบของเลข Reynolds (Re)

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาผลกระทบของเลข Reynolds (Re) ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของชิปคอมพิวเตอร์ โดยทำการเปรียบเทียบที่เลข Re ในช่วง 20,000 - 100,000 และที่ความเข้มข้น (ϕ) ในช่วง 0% (น้ำ) - 5% v/v โดยกำหนดให้มีฟลักซ์ความร้อนที่บริเวณผิวล่างสำหรับท่อพื้นผิวเรียบ และเฉพาะบริเวณที่ติดตั้งชิปสำหรับพื้นผิวขรุขระ สุดท้ายการถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปของเลข Nusselt

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงค่า Nu_{ave} ของน้ำและของไหลนาโนของ Al_2O_3 สำหรับพื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระ (ชิป) ที่ $Re = 20,000, 40,000, 60,000, 80,000$ และ $100,000$ และที่ $\phi = 0\%, 0.25\%, 0.50\%, 0.75\%, 1\%, 3\%$ และ $5\% v/v$ เมื่อทำการเปรียบเทียบ Nu_{ave} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ที่ $Re = 100,000$ ให้ค่า Nu_{ave} สูงสุดที่ความเข้มข้นเดียวกัน รองลงมาเป็นที่ $Re = 80,000, 60,000$ และ $40,000$ ตามลำดับ และที่ $Re = 20,000$ ให้ค่า Nu_{ave} ต่ำที่สุด ที่ทุก ๆ ค่าของ ϕ เนื่องจาก Re ที่สูงขึ้นส่งผลให้ Nu_{ave} สูงขึ้นด้วย เพราะความเร็วในการไหลในท่อที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากความสัมพันธ์ $Re = \frac{\rho u H}{\mu}$ เมื่อค่าความหนาแน่น (ρ) ความสูงท่อ (H) และความหนืดพลวัต (μ) มีค่าคงที่จึงทำให้ค่าความเร็วแปรผันตรงกับ Re จึงส่งผลไปถึงค่าโมเมนตัมในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นจากความสัมพันธ์ $\dot{m}V = (\rho v)V$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bianco [6] และ Yarmand [10] กล่าวไว้ว่า ที่ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลกระทบของ Nu_{ave} กับ Re ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ สำหรับกรณีผิวเรียบ



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของ Nu_{ave} กับ Re ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ สำหรับกรณีผิววน

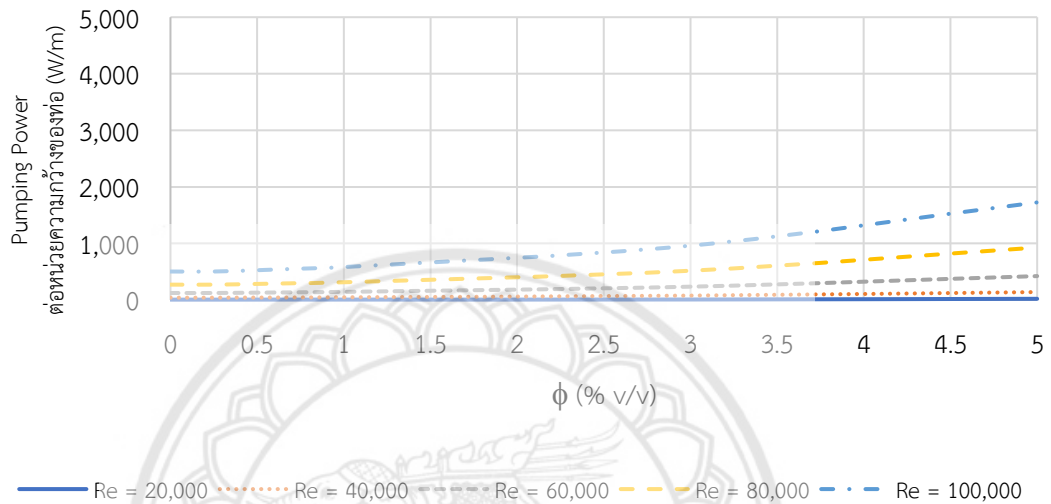
4.3 ผลของกำลังของปั๊ม (Pumping Power)

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณากำลังของปั๊มน้ำที่ใช้ในการส่งของไหลเข้ามาภายในท่อ แต่เนื่องจากเราพิจารณาโดเมนเป็นแบบสองมิติ ดังนั้นกำลังของปั๊มจะแสดงในรูปของกำลังปั๊มต่อหน่วยความกว้างของท่อ (W/m)

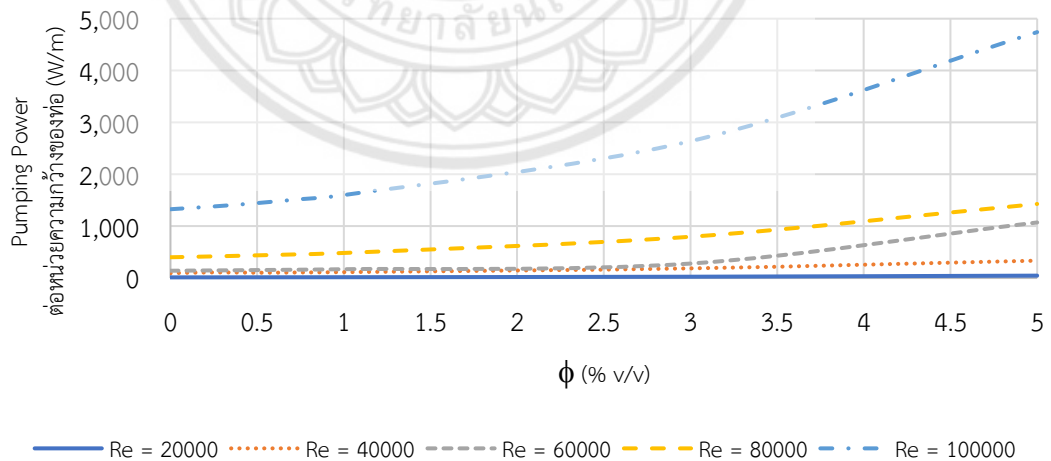
รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 แสดงผลของของไหลนาโนต่อกำลังปั๊มต่อหน่วยความกว้างของท่อ ที่ ϕ และ Re ต่าง ๆ สำหรับพื้นผิวเรียบและพื้นผิววน พบว่า ที่ค่า ϕ และ Re เดียวกัน กรณีผิววนใช้กำลังปั๊มมากกว่ากรณีผิวเรียบเนื่องจากพื้นผิววนมีการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดการไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรณี $Re = 100,000$ ผิววนให้ค่ากำลังปั๊มมากกว่าผิวเรียบ 63.6% ที่ $Re = 80,000$ ผิววนให้ค่ากำลังปั๊มมากกว่าผิวเรียบ 35.1% และที่กรณี Re อื่น ๆ ผิววนให้ค่ากำลังปั๊มมากกว่าผิวเรียบประมาณ 58.28%

รูปที่ 4.9 แสดงผลของของไหลนาโนต่อกำลังปั๊มต่อหน่วยความกว้างของท่อ ที่ $Re = 20,000$ สำหรับพื้นผิวเรียบและพื้นผิววน เนื่องจากรูปที่ 4.7 และ 4.8 การเปรียบเทียบไม่สามารถสังเกตความแตกต่างได้ พบว่า ที่ ϕ เดียวกันในทุก ๆ ค่าของพื้นผิววนใช้กำลังปั๊มมากกว่าพื้นผิวเรียบ โดยที่ $\phi = 5\%$ ผิววนให้ค่ากำลังปั๊มมากกว่าผิวเรียบ 68.5% ที่ $\phi = 1\%$, 3%, 0.75%, 0.5% และ 0.25% v/v ผิววนให้ค่ากำลังปั๊มมากกว่าผิวเรียบประมาณ 57.9% เนื่องจากที่ค่า Re เดียวกันเมื่อกำหนดความสูงท่อ (H) คงที่ เมื่อ ϕ สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความหนืดพลวัต (μ) และค่าความหนาแน่น (ρ) มีอัตราการเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ของไหลนาโนมีความเร็วเพิ่มขึ้น ($v = \frac{Re\mu}{\rho H}$) ทำให้กำลังของปั๊มมากขึ้นเช่นกัน ($P = AV\Delta p$)

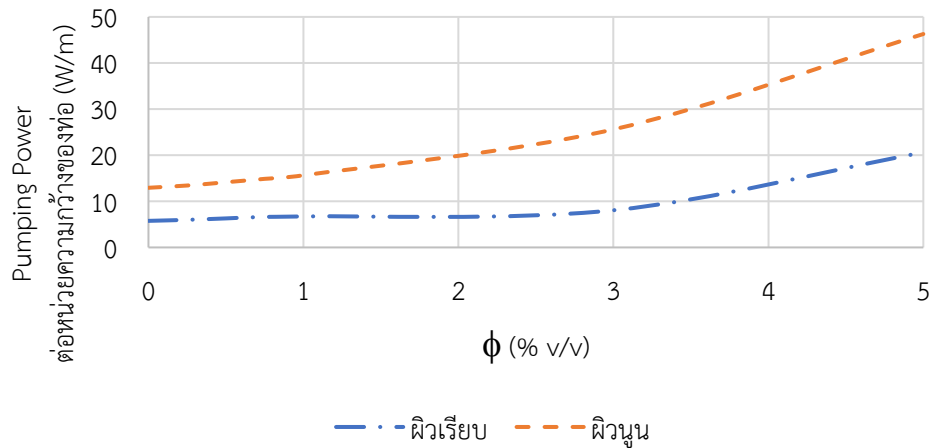
จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดพลวัตกับความเข้มข้นในรูปที่ 4.1 (c) พบว่า อยู่ในรูปควอดรติก และพบว่า จุดเปลี่ยนโค้งอยู่บริเวณ $\phi = 3\%$ v/v ซึ่งแสดงการเพิ่มขึ้นของค่า μ อย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้เองอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้กราฟในรูปที่ 4.8 สำหรับ $\phi = 3\% - 5\%$ สำหรับผิวที่ติดตั้งซี่ใช้ Pumping Power สูงกว่ากรณีแผ่นเรียบอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนกับ Pumping Power ที่ Re ต่าง ๆ สำหรับกรณีผิวเรียบ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนกับ Pumping Power ที่ Re ต่าง ๆ สำหรับกรณีผิวขรุขระ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนกับ Pumping Power ที่ $Re = 20,000$ สำหรับกรณีผิวเรียบและผิวขรุขระ

4.4 การหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (Correlations)

ในหัวข้อนี้เราจะหาความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_{ave} กับ ϕ และ Re ในรูป $Nu_{ave} = f(\phi, Re)$ ในช่วง $Re = 20,000$ ถึง $100,000$ และ ϕ ในช่วง 0% (น้ำ) ถึง 5% โดยปริมาตร โดยเริ่มจากการหาความสัมพันธ์แยกทีละตัวแปรต้นและกำหนดให้อีกตัวแปรหนึ่งคงที่ กล่าวคือ หา $Nu_{ave} = f(Re)$ และ $Nu_{ave} = f(\phi)$ เพื่อให้ได้รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์คร่าว ๆ ก่อนใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) สำหรับของไหลฐาน และแบบเชิงเส้นพหุถดถอย (Multiple Linear Regression Analysis) สำหรับของไหลนาโนโดยผ่านการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) แบบ 2 ด้าน (2-sided)

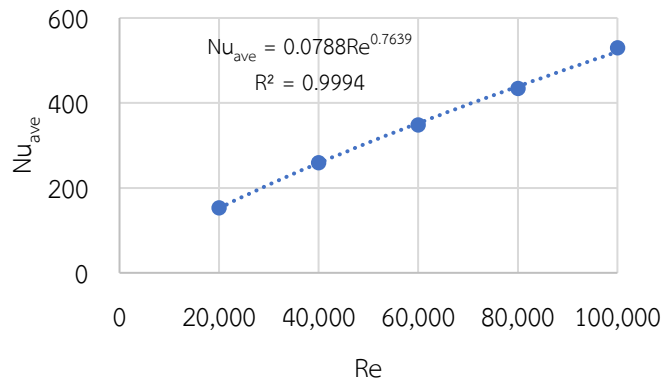
4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับเลข Reynolds

- ของไหลฐาน (น้ำ)

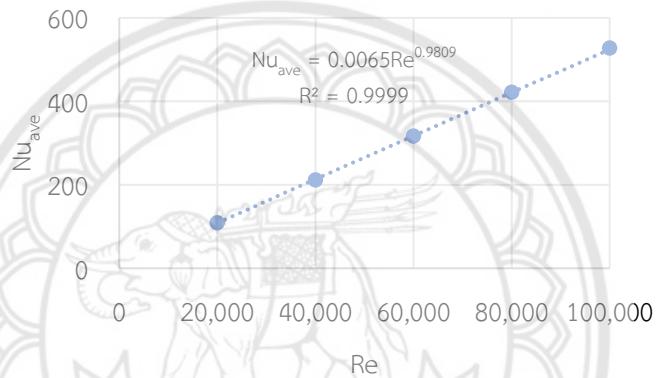
รูปที่ 4.10 แสดง Curve Fitting ของความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ Re ของของไหลฐาน สำหรับพื้นผิวเรียบและผิวขรุขระ โดยหาความสัมพันธ์จากการเลือกเส้นแนวโน้มแบบเชิงเส้นโดยมีความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\text{ผิวเรียบ} : \quad Nu_{ave} = 0.0788Re^{0.7639} \quad ; \quad R^2 = 0.9994 \quad (4.1)$$

$$\text{ผิวขรุขระ} : \quad Nu_{ave} = 0.0065Re^{0.9809} \quad ; \quad R^2 = 0.9999 \quad (4.2)$$



(a) พื้นผิวเรียบ



(b) พื้นผิวขรุขระ

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ Re ของของไหลฐาน

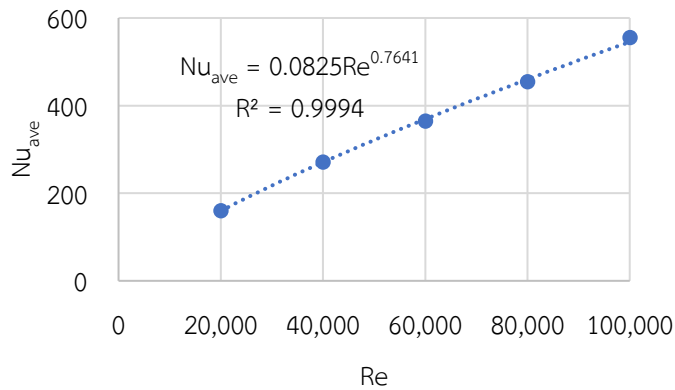
- ของไหลนาโน

รูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่าง Curve Fitting ของความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ Re สำหรับพื้นผิวเรียบ และผิวขรุขระในกรณี $\phi = 1\% v/v$ ซึ่งกรณีอื่น ๆ แสดงความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก. โดยหาความสัมพันธ์จากการเลือกเส้นแนวโน้มแบบยกกำลัง โดยมีความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

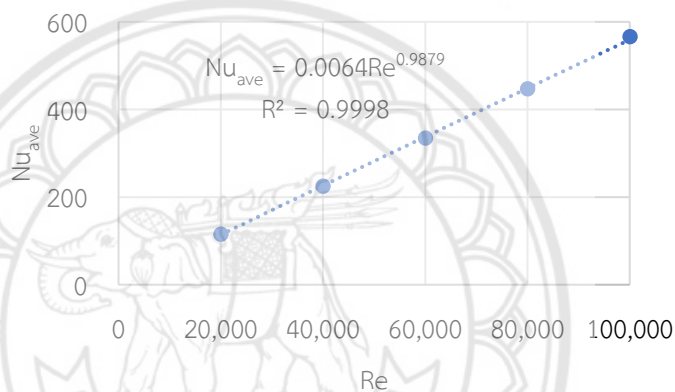
$$\text{ผิวเรียบ} : \quad Nu_{ave} = 0.0825Re^{0.7641} \quad ; R^2 = 0.9994 \quad (4.3)$$

$$\text{ผิวขรุขระ} : \quad Nu_{ave} = 0.0064Re^{0.9879} \quad ; R^2 = 0.9998 \quad (4.4)$$

โดยสรุป เราสังเกตได้ว่า Nu_{ave} มีความสัมพันธ์แบบยกกำลังกับ Re หรือ $Nu_{ave} = C_0Re^n$



(a) พื้นผิวเรียบ



(b) พื้นผิวขรุขระ

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ Re กรณี $\phi = 1\% v/v$

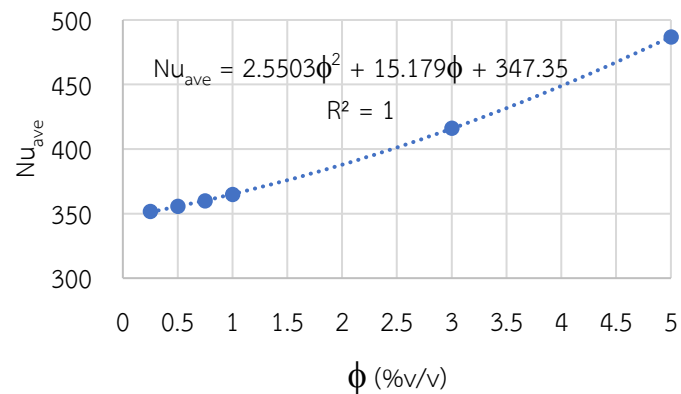
4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ยกับความเข้มข้นของอนุภาคนาโน (ϕ)

รูปที่ 4.12 แสดงตัวอย่าง Curve Fitting ของความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ ϕ สำหรับพื้นผิวเรียบและผิวขรุขระในกรณี $Re = 60,000$ ซึ่งกรณีอื่น ๆ แสดงความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก. โดยหาความสัมพันธ์จากการเลือกเส้นแนวโน้มแบบโพลีโนเมียลอันดับที่ 2 โดยมีความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

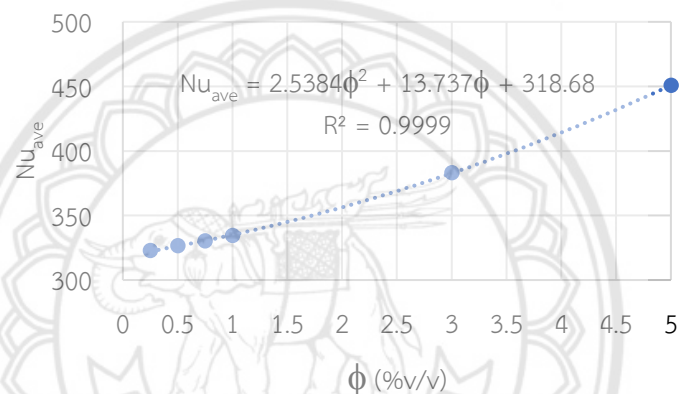
$$\text{ผิวเรียบ} : Nu_{ave} = 2.5503\phi^2 + 15.179\phi + 347.35 \quad ; R^2 = 1 \quad (4.5)$$

$$\text{ผิวขรุขระ} : Nu_{ave} = 2.5384\phi^2 + 13.737\phi + 318.68 \quad ; R^2 = 0.9999 \quad (4.6)$$

ดังนั้น สำหรับทั้งสองกรณีจะได้ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ ϕ ในรูปทั่วไปเป็น $Nu_{ave} = C_1\phi^2 + C_2\phi + C_3$



(a) พื้นผิวเรียบ



(b) พื้นผิวรูพรุน

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ ϕ กรณี $Re = 60,000$

4.4.3 การหาความสัมพันธ์ (Multiple Correlations)

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรมากกว่า 2 ตัวแปร ตัวแปรที่พิจารณาหาความสัมพันธ์นั้นมีด้วยกันทั้งหมด 3 ตัวแปรคือ เลข Nusselt เฉลี่ย (Nu_{ave}) เลข Reynolds (Re) และความเข้มข้น (ϕ) โดยตัวแปรต้น (Independent Variables) ได้แก่ Re และ ϕ และตัวแปรตาม (Dependent Variable) ได้แก่ Nu_{ave} โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุ (Multiple Linear Regression Analysis) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งเหมาะกับการวิเคราะห์ที่มีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว และตัวแปรตาม 1 ตัว [16] กำหนดค่า Re อยู่ในช่วง 20,000 – 100,000 ค่าความเข้มข้น 0% (น้ำ), 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1%, 3% และ 5% โดยปริมาตร พิจารณาการไหลเป็น 2 กรณีคือพื้นผิวเรียบและพื้นผิวรูพรุน จะได้ความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.1

จากหัวข้อที่ 4.4.1 และ 4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_{ave} และ Re และ ϕ อยู่ในรูปของ $Nu_{ave} = C_0 Re^n$ และ $Nu_{ave} = C_1 \phi^2 + C_2 \phi + C_3$ ซึ่งสังเกตได้ว่าทั้งสองตัวแปรต้นมีความสัมพันธ์กับ Nu_{ave} ในรูปของเลขยกกำลัง ดังนั้น การทำ Logarithmic Regression น่าจะทำให้การทำ Multiple Regression ทำได้ง่ายขึ้น จึงนำเสนอแบบจำลองในรูป

$$\ln(Nu_{ave}) = A \ln(Re) + B \ln(\phi^2) + C$$

โดย A , B , และ C เป็นค่าคงที่

จากนั้นทำการจัดข้อมูลในรูปของ \ln ได้แก่ $\ln Nu_{ave}$, $\ln Re$ และ $\ln \phi^2$ แล้วนำข้อมูลผ่านการวิเคราะห์โดยอาศัย ANOVA Table สำหรับ F-Test ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 สำหรับกรณีผิวเรียบและกรณีผิวขรุขระ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.14 จะได้ความสัมพันธ์สำหรับผิวเรียบดังนี้

$$\ln Nu_{ave} = 0.765 \ln Re + 0.053 \ln \phi^2 - 1.961 \quad (4.8)$$

ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดที่ปรับแล้ว (Adjusted R Square) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้พิจารณาแนวโน้มของสมการถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9877 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ที่ได้เหมาะสมที่จะเป็นตัวแทนของข้อมูล และยังแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ที่ได้สามารถ fit ข้อมูลจำนวน 30 ข้อมูลได้ดี นอกจากนี้ตาราง ANOVA ยังได้แสดงค่าของสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ (Coefficients) และค่า 2 sided p-value ที่น้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นการสนับสนุนให้ปฏิเสธสมมติฐานว่าง (Null Hypothesis : H_0) ที่ว่าสัมประสิทธิ์มีค่าเท่ากับ 0

จากรูปที่ 4.15 จะได้ความสัมพันธ์สำหรับผิวขรุขระดังนี้

$$\ln Nu_{ave} = 0.972 \ln Re + 0.058 \ln \phi^2 - 4.287 \quad (4.9)$$

สำหรับความสัมพันธ์ที่พื้นผิวขรุขระจะให้ค่า Adjusted R Square เท่ากับ 0.9897 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ที่ได้สามารถ fit ข้อมูลจำนวน 30 ข้อมูลได้ดีเช่นกัน และแสดงค่า 2 sided p-value ที่น้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นการสนับสนุนให้ปฏิเสธสมมติฐานว่าง (Null Hypothesis : H_0) ที่ว่าสัมประสิทธิ์มีค่าเท่ากับ 0

เมื่อ	df	คือ Degrees of Freedom
	SS	คือ Sum of Square ผลรวมกำลังสองของความเบี่ยงเบนของค่าต่าง ๆ จากค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง
	MS	คือ Mean square error เท่ากับ $\frac{SS}{df}$
	F หรือ F-test	คือ เครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อพิจารณาว่าตัวแปรอิสระ (Re, ϕ) มีผลต่อตัวแปรตาม (Nu_{ave}) หรือไม่
	Standard Error	คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน
	t - stat	คือ การทดสอบสมมติฐานชนิด t-distribution โดยที่กลุ่มตัวอย่างมีขนาดเล็ก ($n \leq 30$) โดยอาศัยค่าความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างในการวิเคราะห์
	p - value	คือ ระดับนัยสำคัญที่น้อยที่สุดที่ทำให้ปฏิเสธ Null Hypothesis กล่าวคือ ค่าความน่าจะเป็นที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐาน โดยทั่วไปจะใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือระดับนัยสำคัญที่ 0.05 และใช้รูปแบบการทดสอบสองด้าน (2-sided)

SUMMARY OUTPUT					
<i>Regression Statistics</i>					
Multiple R	0.994279667				
R Square	0.988592056				
Adjusted R Square	0.987747023				
Standard Error	0.050719				
Observations	30				
<i>ANOVA</i>					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	2	6.018868421	3.00943421	1169.885855	5.9197E-27
Residual	27	0.069455258	0.002572417		
Total	29	6.088323679			
<i>Coefficients</i>					
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	
Intercept	-1.960658473	0.181909224	-10.77822463	2.77717E-11	
ln Re	0.76459866	0.016290824	46.93431426	2.02508E-27	
ln Phi^2	0.053031788	0.004531773	11.70221582	4.40053E-12	

รูปที่ 4.13 ANOVA table ของของไหลนาโนสำหรับพื้นผิวเรียบ

SUMMARY OUTPUT					
<i>Regression Statistics</i>					
Multiple R	0.995226913				
R Square	0.990476608				
Adjusted R Square	0.989771172				
Standard Error	0.058439393				
Observations	30				
<i>ANOVA</i>					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	2	9.59020169	4.795100845	1404.062217	5.17234E-28
Residual	27	0.092209392	0.003415163		
Total	29	9.682411081			
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	
Intercept	-4.286593039	0.209599255	-20.45137536	5.78099E-18	
ln Re	0.972481375	0.018770596	51.80876288	1.44578E-28	
ln Phi^2	0.058139716	0.005221595	11.13447451	1.34881E-11	

รูปที่ 4.14 ANOVA table ของของไหลนาโนสำหรับพื้นผิวฉนวน

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของของไหลฐานและของไหลนาโนอนุภาคอะลูมินาสำหรับพื้นผิวเรียบและพื้นผิวฉนวน และเนื่องจากสมการความสัมพันธ์ที่ได้อยู่ในรูปของ Natural Logarithm (ln) เราจึงต้องทำการ Antilog เพื่อให้ได้สมการตัวแทนที่อยู่ในรูปอย่างง่าย ดังนี้

เมื่อทำการ Antilog สมการที่ 4.8 เราจะได้สมการสำหรับพื้นผิวเรียบ ดังนี้

$$Nu_{ave} = 0.1407 (Re)^{0.765} x (\phi^2)^{0.053} \quad 4.10$$

เมื่อทำการ Anti - log สมการที่ 4.9 เราจะได้สมการสำหรับพื้นผิวฉนวน ดังนี้

$$Nu_{ave} = 0.0138 (Re)^{0.972} x (\phi^2)^{0.058} \quad 4.11$$

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของของไหลฐานและของไหลนาโนอนุภาคอะลูมินาสำหรับพื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระ

ชนิดของของไหล	พื้นผิว	สมการสหสัมพันธ์
ของไหลฐาน (น้ำ)	เรียบ	$Nu_{ave} = 0.0788Re^{0.7639}$
	ขรุขระ	$Nu_{ave} = 0.0065Re^{0.9809}$
ของไหลนาโนอนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3)	เรียบ	$Nu_{ave} = 0.1407 (Re^{0.765} \times (\phi^2)^{0.053})$
	ขรุขระ	$Nu_{ave} = 0.0138 (Re^{0.972} \times (\phi^2)^{0.058})$

เมื่อ Nu_{ave} คือ เลข Nusselt เฉลี่ย
 Re คือ เลข Reynolds
 ϕ คือ ความเข้มข้นของของไหลนาโน (% v/v)



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนจากชิปคอมพิวเตอร์ โดยใช้ น้ำ และของไหลนาโนอนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3) ในน้ำที่สภาวะคงที่ที่ความเข้มข้น (ϕ) = 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1%, 3% และ 5% โดยปริมาตร และเลข Reynolds (Re) = 20,000, 40,000, 60,000, 80,000 และ 100,000 โดยไหลขนานท่อที่มีลักษณะพื้นผิวแบบต่าง ๆ ได้แก่ พื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูน (ชิป) โดยอาศัยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณ กำหนดให้โดเมนการคำนวณเป็นแบบสองมิติและใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนตามแบบจำลอง k- ϵ และรายงานผลของการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลข Nusselt เฉลี่ย (Nu_{ave}) และ Pumping Power ต่อหน่วยความกว้างของท่อ พบว่า

1. เมื่อพิจารณาผลกระทบของความเข้มข้นของของไหลนาโนของอนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3) ในน้ำ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเปรียบเทียบกับน้ำ พบว่า สำหรับทั้งกรณีพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูน ของไหลนาโนที่ทุกค่าของ Re มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าน้ำ และยังพบว่าสำหรับทั้งกรณีพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูน ที่ Re เดียวกัน ของไหลนาโนที่ความเข้มข้น = 5% โดยปริมาตร ให้ค่า Nu_{ave} สูงที่สุด รองลงมาได้แก่ 3%, 1%, 0.75%, 0.5% และ 0.25% โดยปริมาตร ตามลำดับ เนื่องจากการที่ความเข้มข้น (ϕ) ของของไหลนาโนที่เพิ่มขึ้นไปเปลี่ยนสมบัติเชิงความร้อนของของไหลฐาน ทำให้ค่าความหนาแน่น (ρ) สูงขึ้นส่งผลให้อัตราของโมเมนตัมสูงขึ้น ทำให้ถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังพิจารณากำลังของปั๊มต่อหน่วยความกว้างของท่อ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของของไหลนาโนสูงขึ้นทำให้ต้องใช้กำลังของปั๊มมากขึ้น

2. พิจารณาผลกระทบของ Re ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของชิปคอมพิวเตอร์ พบว่าทั้งกรณีพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูน ที่ $Re = 100,000$ ให้ค่า Nu_{ave} สูงสุดที่ความเข้มข้นเดียวกัน รองลงมาเป็นที่ $Re = 80,000, 60,000$ และ $40,000$ ตามลำดับ และที่ $Re = 20,000$ ให้ค่า Nu_{ave} ต่ำที่สุด ที่ทุก ๆ ค่าของ ϕ เนื่องจาก Re ที่สูงขึ้นส่งผลให้ Nu_{ave} สูงขึ้นด้วย เพราะความเร็วในการไหลในท่อที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากความสัมพันธ์ $Re = \frac{\rho u H}{\mu}$ เมื่อค่าความหนาแน่น (ρ) ความสูงท่อ (H) และความหนืดพลวัต (μ) มีค่าคงที่ จึงทำให้ค่าความเร็วแปรผันตรงกับ Re ส่งผลให้ค่าโมเมนตัมในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพิจารณากำลังของปั๊มต่อหน่วยความกว้างของท่อ พบว่า เมื่อ Re สูงขึ้นทำให้ความเร็ว เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังของปั๊มมีค่าเพิ่มขึ้น

3. เมื่อพิจารณาหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่าง Nu_{ave} กับ Re และ ϕ สำหรับพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูน โดยทำการหาความสัมพันธ์ที่เลข Reynolds ช่วง 20,000 ถึง 100,000 และที่ ϕ ช่วง 0% (น้ำ) ถึง 5% โดยปริมาตร และอาศัยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

สำหรับของไหลฐาน และแบบเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression Analysis) สำหรับของไหลนาโนโดยผ่านการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) แบบ 2 ด้าน (2-sided) พบว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปของเลขยกกำลังและโพลีโนเมียลอันดับที่ 2 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างเลข Nusselt เฉลี่ย (Nu_{ave}) กับความเข้มข้นของของไหลนาโนอนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3) สำหรับพื้นผิวเรียบและพื้นผิวนูน

ชนิดของของไหล	พื้นผิว	สมการสัมพันธ์	R^2
ของไหลฐาน (น้ำ)	เรียบ	$Nu_{ave} = 0.0788Re^{0.7639}$	0.9994
	นูน	$Nu_{ave} = 0.0065Re^{0.9809}$	0.9999
ของไหลนาโนอนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3)	เรียบ	$Nu_{ave} = 0.1407 (Re^{0.765} \times (\phi^2)^{0.053})$	0.9877
	นูน	$Nu_{ave} = 0.0138 (Re^{0.972} \times (\phi^2)^{0.058})$	0.9897

ข้อเสนอแนะ

- เนื่องจากขีดทนความร้อนได้สูงสุดที่ $67.9^\circ C$ ผู้ศึกษาจึงขอเสนอให้ใช้ของไหลนาโนของอนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3) ที่ $\phi = 3\% v/v$ และ $Re = 80,000$ ซึ่งให้การถ่ายเทความร้อนที่ดีและเหมาะสม โดยสามารถทำให้อุณหภูมิที่ผิวชิปเหลือประมาณ $35.4^\circ C$ และนอกจากนี้ยังใช้กำลังส่งของปั๊มมากกว่าที่ $Re = 60,000$ $\phi = 3\% v/v$ ซึ่งทำให้อุณหภูมิที่ผิวชิปมีค่าประมาณ $44^\circ C$ และถ้าเลือกที่จะใช้ความเข้มข้นและ Re ที่มากกว่านี้ก็จะให้การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า แต่ก็จะมีภาระด้านกำลังปั๊มที่มากยิ่งขึ้นด้วยเช่นกัน



ตารางแสดงเลข Nusselt เฉลี่ย (Nu_{ave}) ที่ได้จากการคำนวณ

ตาราง ก.1 แสดงค่า Nu_{ave} ของของไหลฐาน (น้ำ) สำหรับพื้นผิวเรียบ

Re	Nu_{ave}
20,000	152.883
40,000	258.954
60,000	348.133
80,000	433.815
100,000	529.683

ตาราง ก.2 แสดงค่า Nu_{ave} ของของไหลฐาน (น้ำ) สำหรับพื้นผิวขรุขระ (ขีป)

Re	Nu_{ave}
20,000	108.830
40,000	211.265
60,000	316.138
80,000	421.702
100,000	527.313

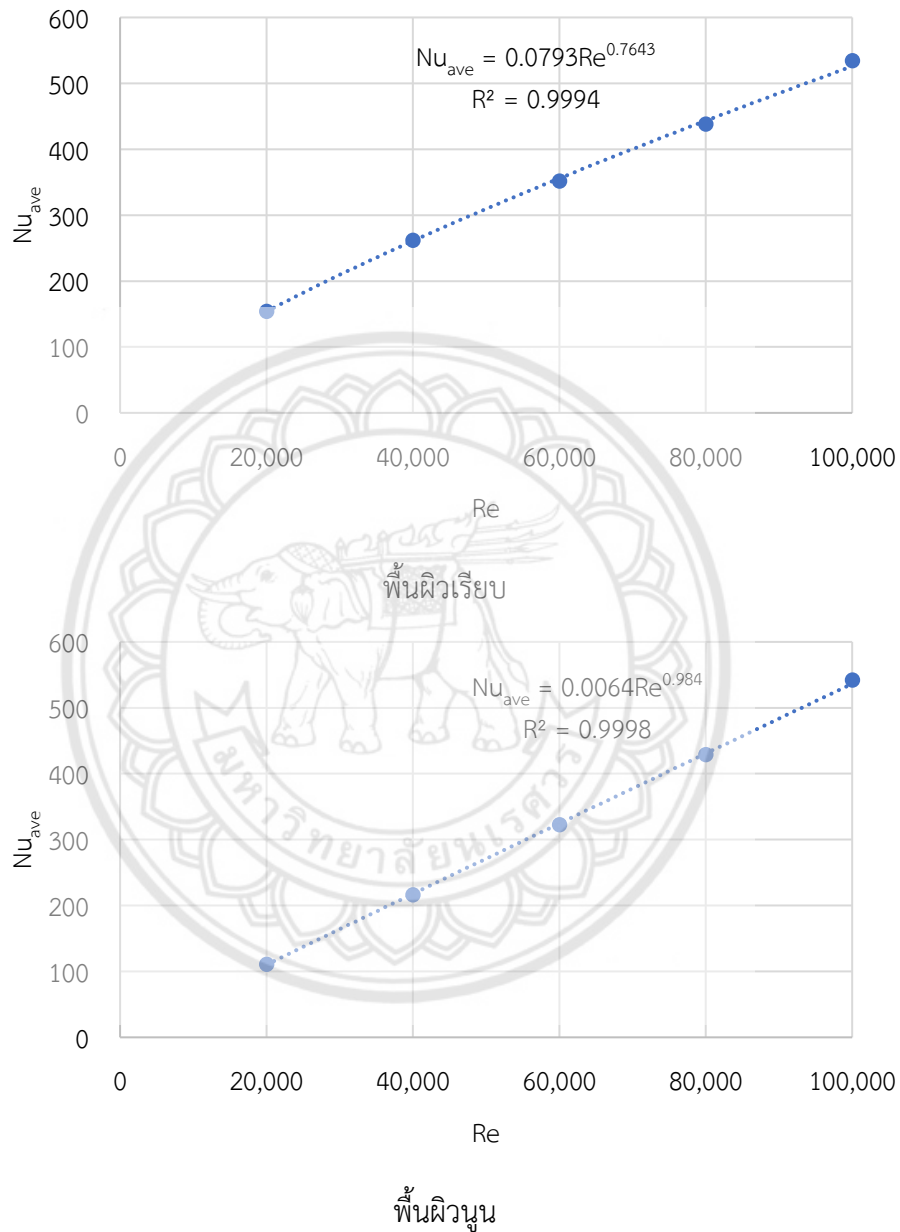
ตาราง ก.3 แสดงค่า Nu_{ave} ของของไหลนาโนของอะลูมินา (Al_2O_3) สำหรับพื้นผิวเรียบ

ϕ (% v/v)	Nu_{ave}				
	Re = 20,000	Re = 40,000	Re = 60,000	Re = 80,000	Re = 100,000
0.25	154.218	261.728	351.651	438.046	534.649
0.5	156.164	264.532	355.655	443.247	541.317
0.75	158.151	267.909	359.788	448.498	548.212
1	160.182	271.376	364.883	454.714	555.08
3	182.352	309.652	416.089	519.206	633.487
5	213.792	362.764	486.937	607.332	743.392

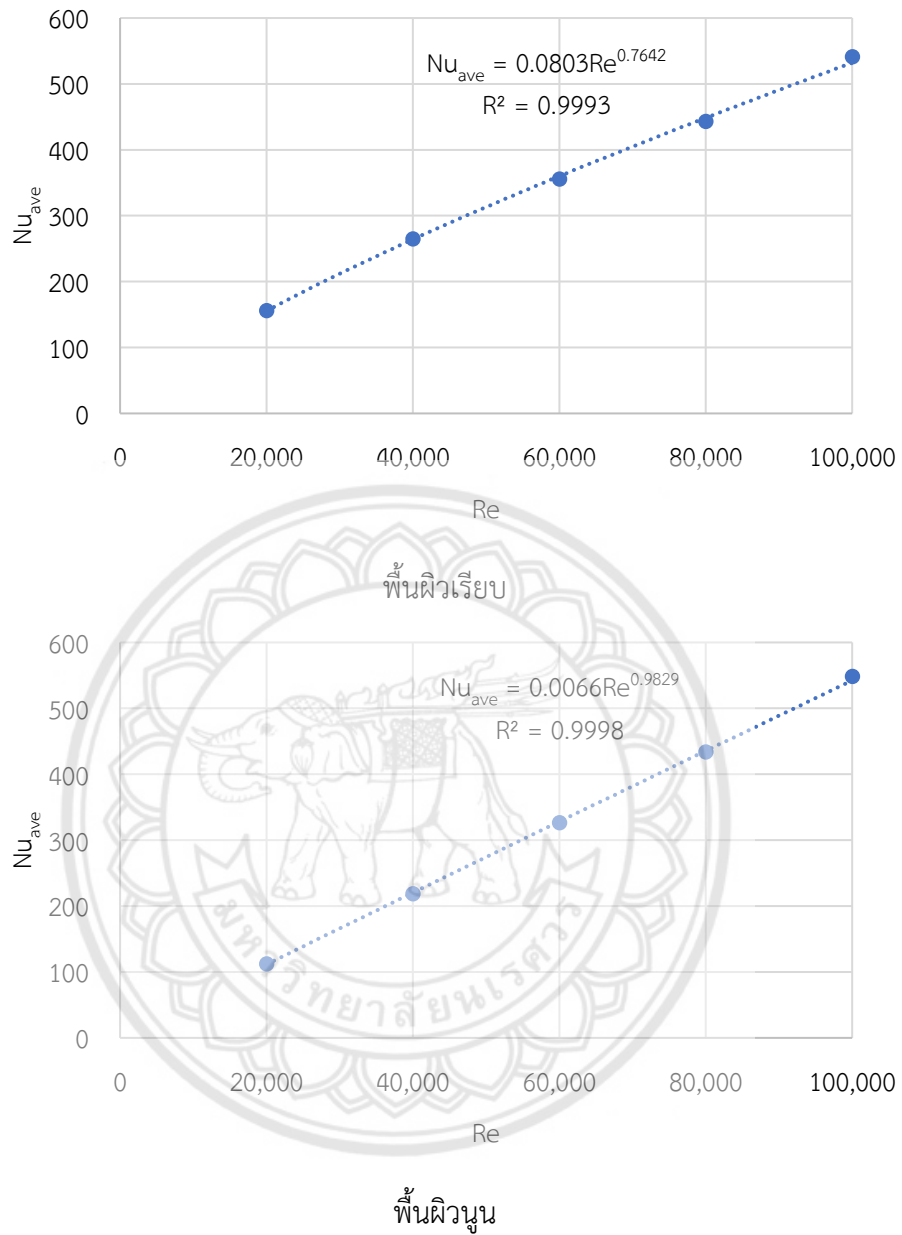
ตาราง ก.4 แสดงค่า Nu_{ave} ของของไหลนาโนของอะลูมินา (Al_2O_3) สำหรับพื้นผิวขรุขระ (ซี่ป)

ϕ (% v/v)	Nu_{ave}				
	Re = 20,000	Re = 40,000	Re = 60,000	Re = 80,000	Re = 100,000
0.25	110.753	216.25	322.677	428.892	541.915
0.5	112.223	218.6	326.39	433.517	548.071
0.75	113.696	220.957	330.126	441.769	559.792
1	114.927	224.347	334.371	447.121	566.191
3	138.197	256.345	383.135	513.142	650.483
5	171.495	300.566	450.719	603.068	766.912

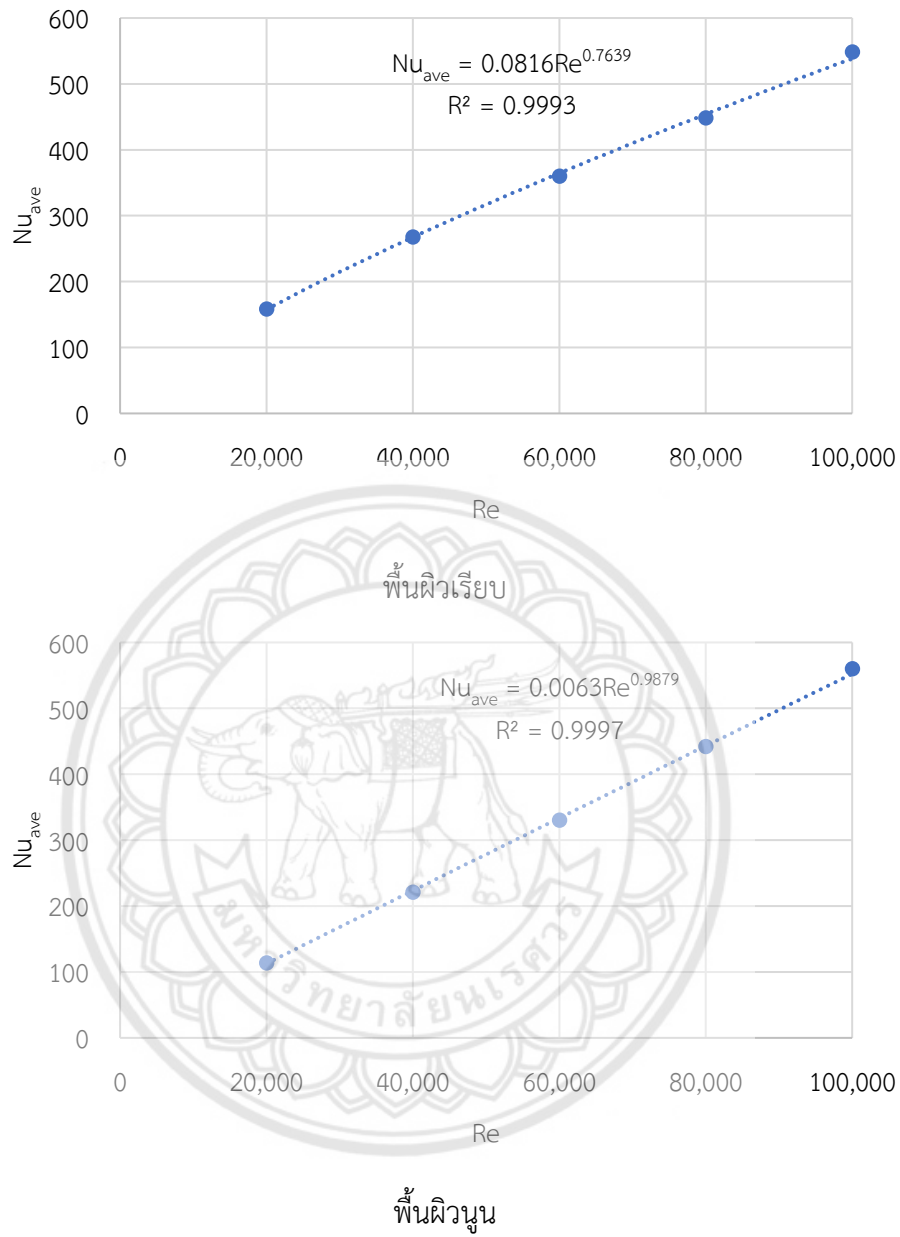
ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่าง Nu_{ave} กับ Re ที่ ϕ ต่าง ๆ สำหรับของไหลนาโน Al_2O_3



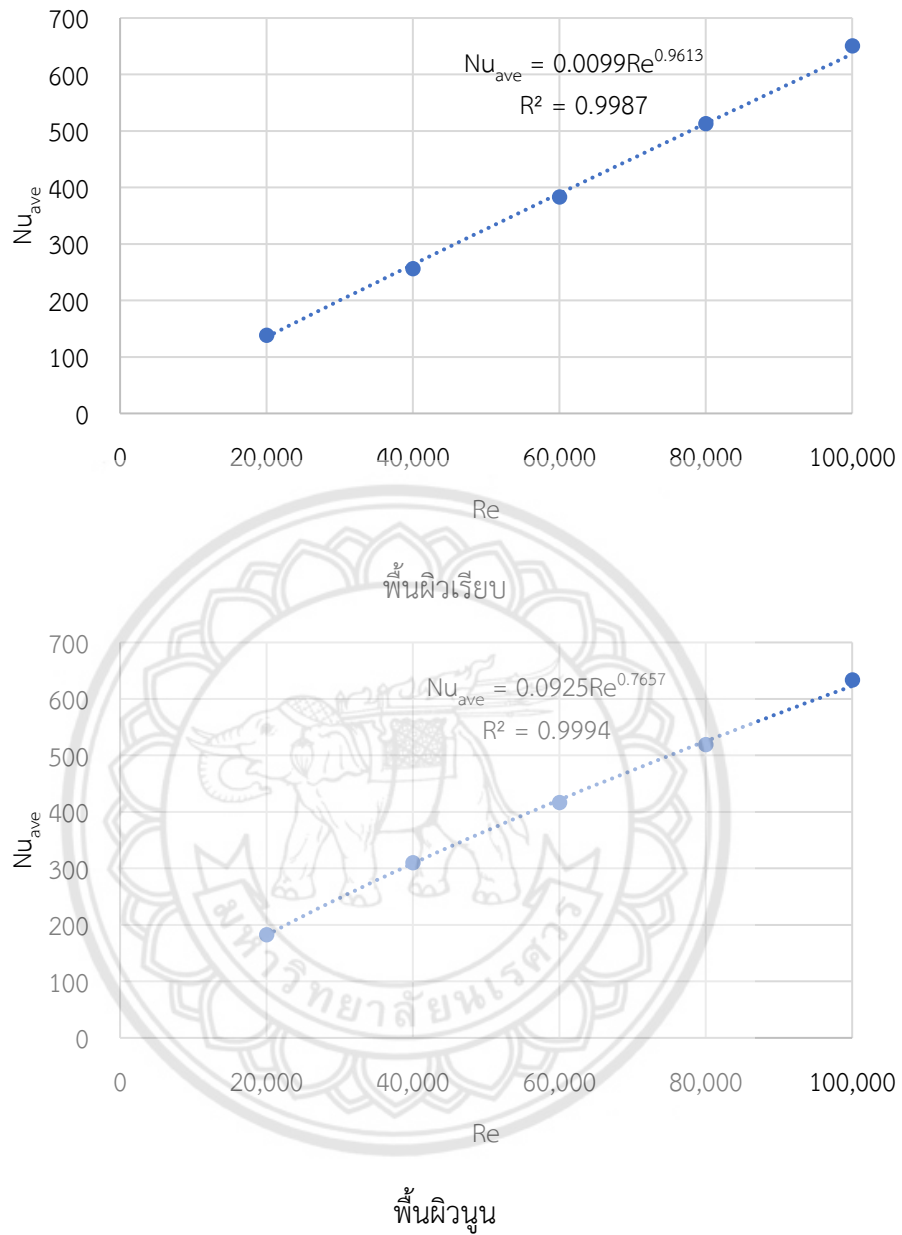
รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ Re สำหรับพื้นผิวเรียบ และผิวนูนในกรณี $\phi = 0.25\% v/v$



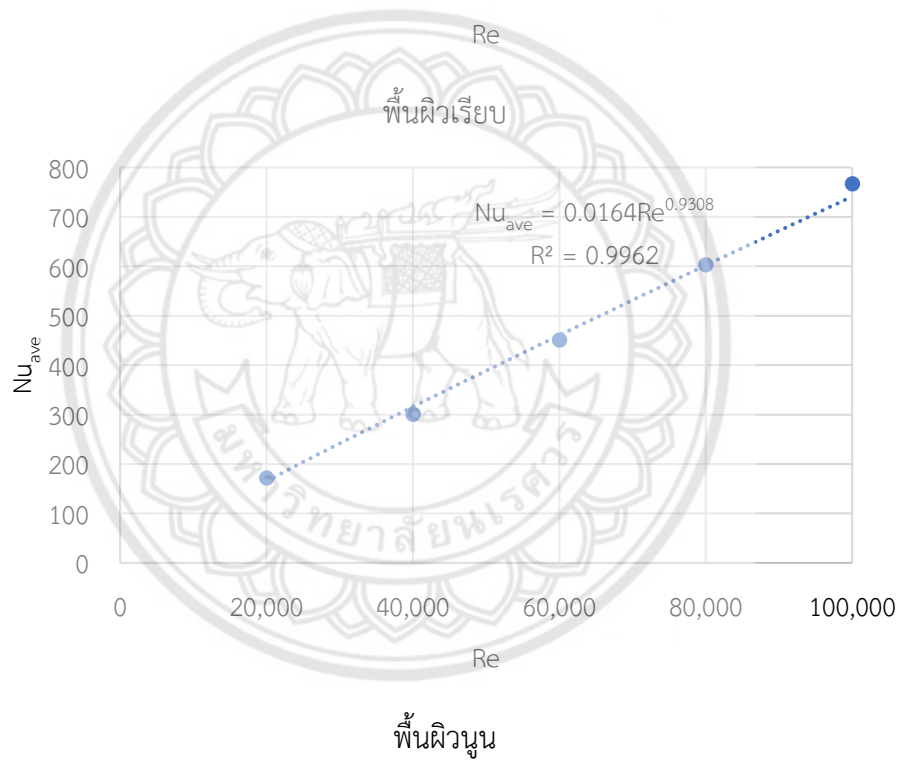
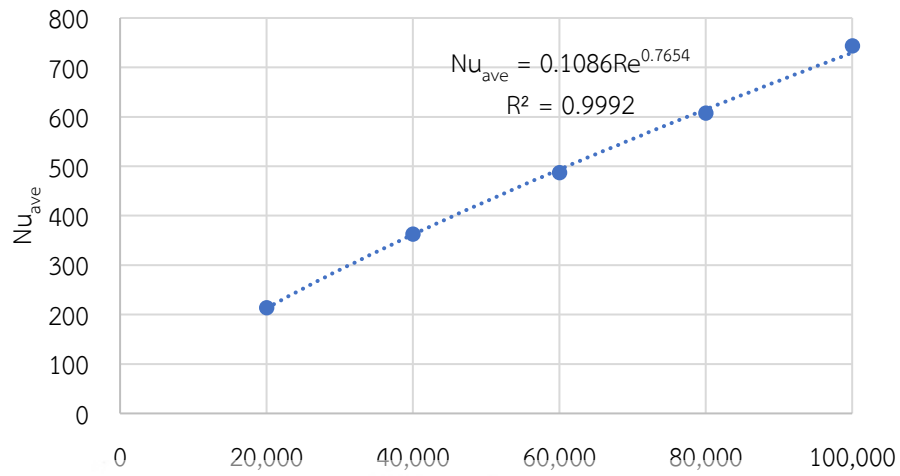
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ Re สำหรับพื้นผิวเรียบ และผิวขรุขระในกรณี $\phi = 0.50\% v/v$



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ Re สำหรับพื้นผิวเรียบ และผิวขรุขระในกรณี $\phi = 0.75\%$ v/v

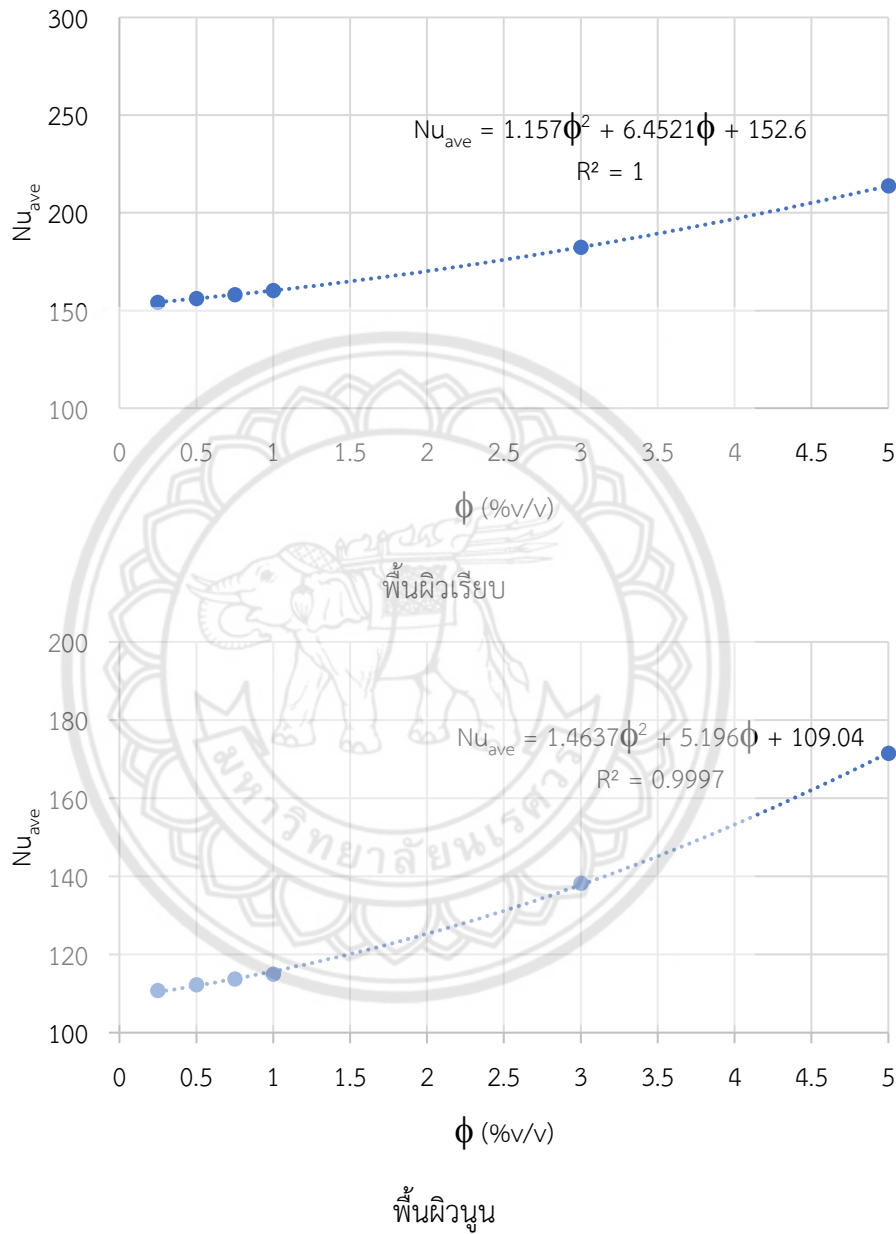


รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ Re สำหรับพื้นผิวเรียบ และผิวขรุขระในกรณี $\phi = 3\% v/v$

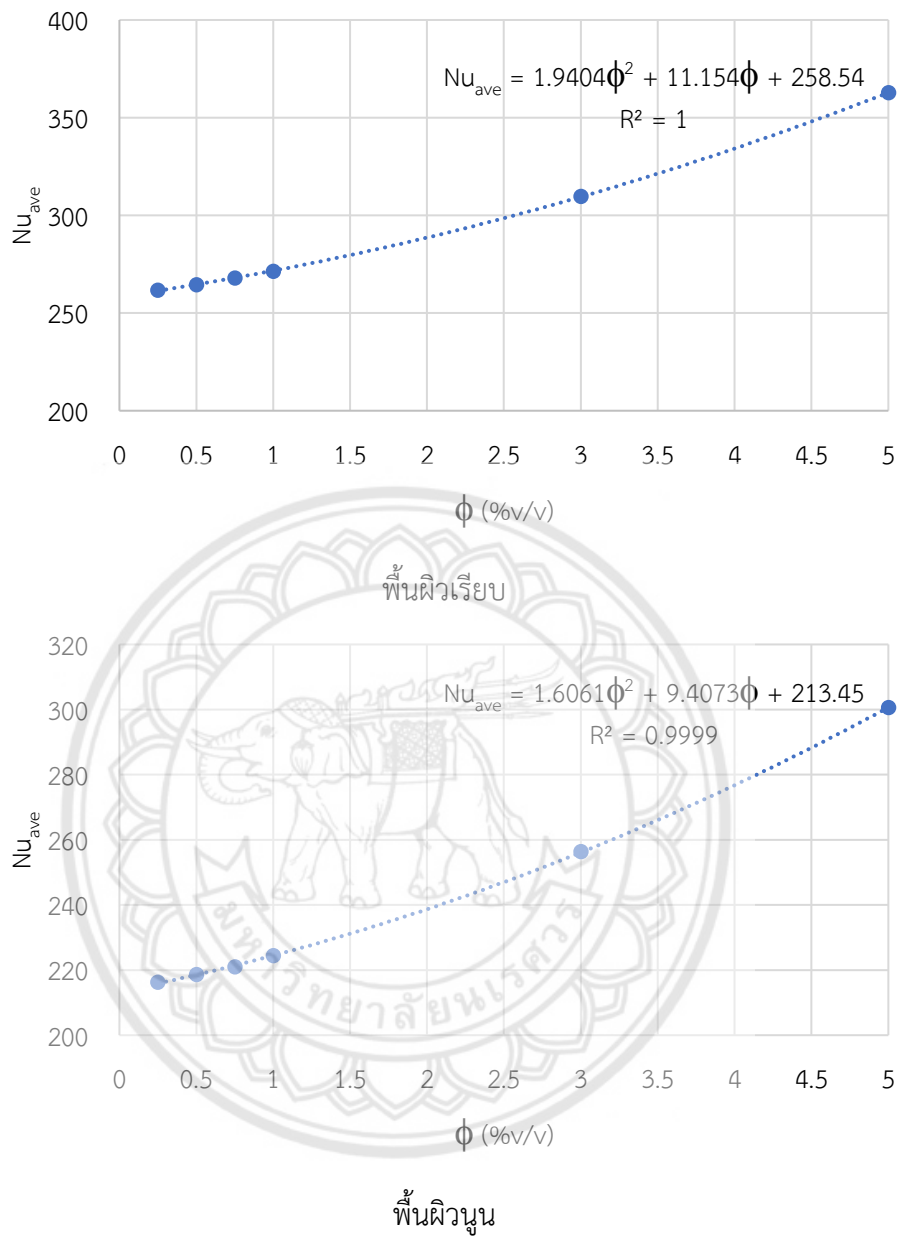


รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ Re สำหรับพื้นผิวเรียบ และผิวขรุขระในกรณี $\phi = 5\% v/v$

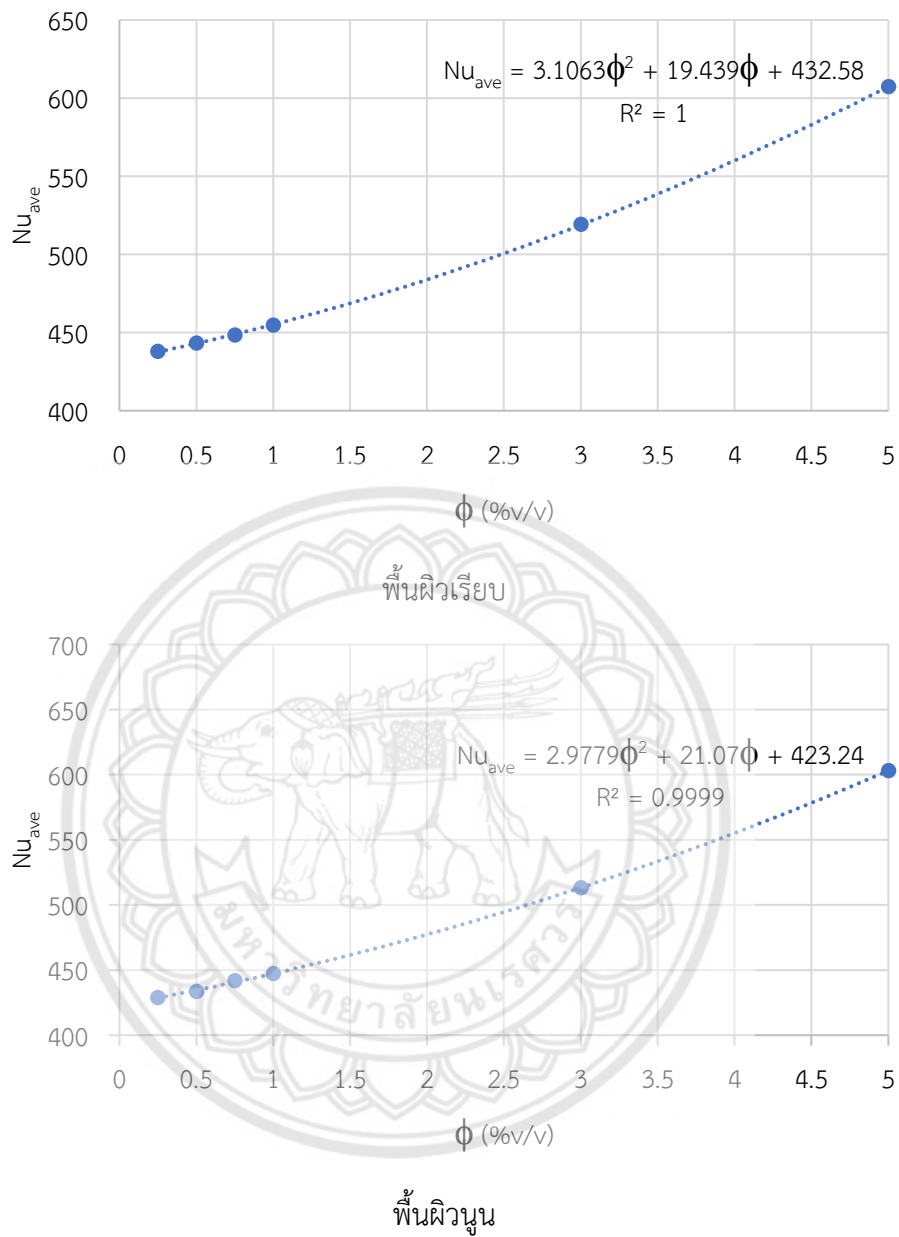
ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่าง Nu_{ave} กับ ϕ ที่ Re ต่าง ๆ สำหรับของไหลนาโน



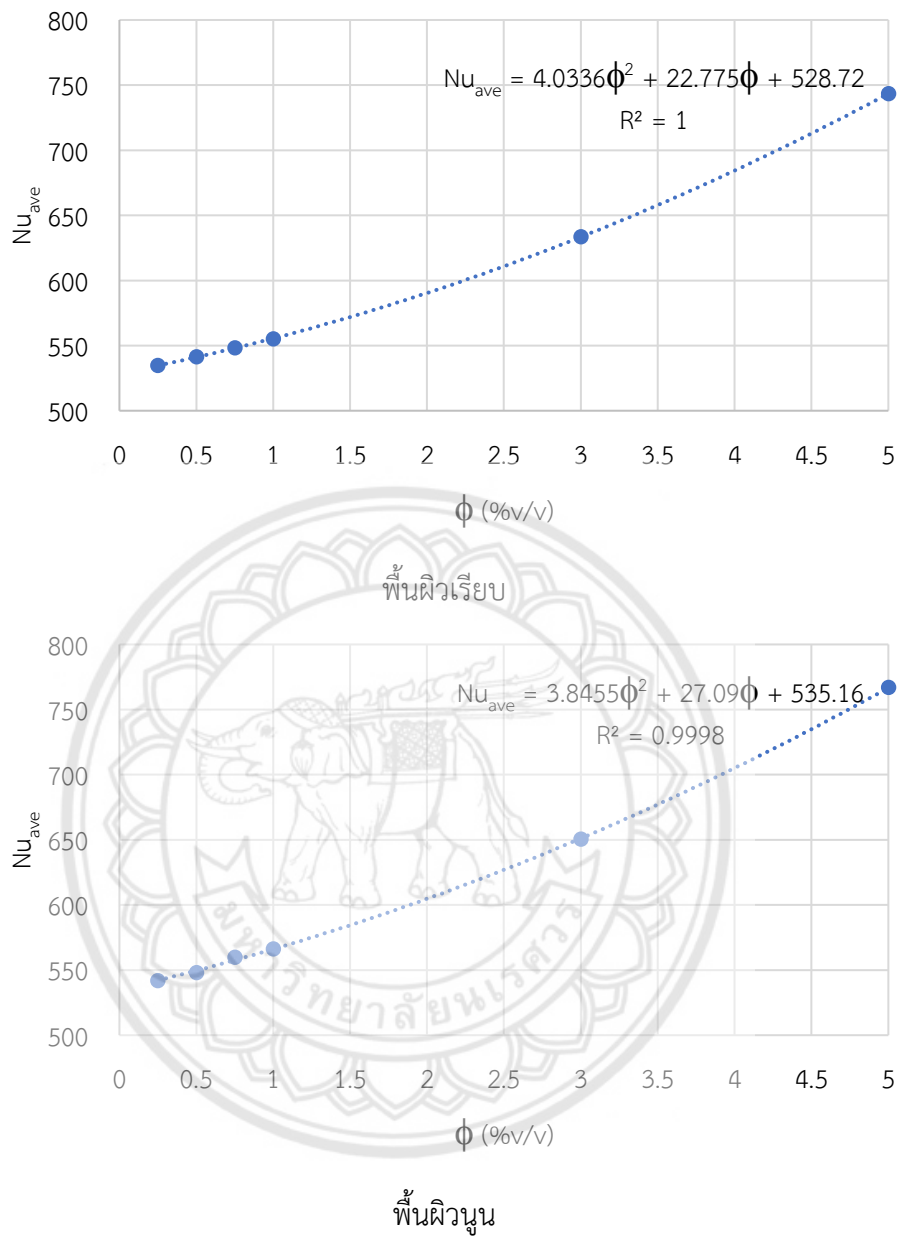
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ ϕ สำหรับพื้นผิวเรียบและผิววนในกรณี $Re = 20,000$



ที่ ก.7 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ ϕ สำหรับพื้นผิวเรียบและผิวขรุขระในกรณี $Re = 40,000$



รูปที่ 8.8 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ ϕ สำหรับพื้นผิวเรียบและผิวขรุขระในกรณี $Re = 80,000$



รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ของ Nu_{ave} กับ ϕ สำหรับพื้นผิวเรียบและผิวขรุขระในกรณี $Re = 100,000$



ภาคผนวก (ข)

ตารางเปรียบเทียบ Nu_{ave} ที่ได้จากการคำนวณและความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

ตารางที่ ข.1 ตารางเปรียบเทียบ Nu_{ave} ที่ได้จากการคำนวณและที่ได้จากความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์สำหรับพื้นผิวเรียบ

ϕ (% v/v)	Re	ln Nu	ln Re	ln ϕ^2	Nu_{ave} จากการคำนวณ	Nu_{ave} จากการแทน สมการ	% error
0.25	20000	5.038	9.903	-11.983	154.218	145.485	5.66
	40000	5.567	10.597	-11.983	261.728	247.233	5.54
	60000	5.863	11.002	-11.983	351.651	337.144	4.13
	80000	6.082	11.290	-11.983	438.046	420.140	4.09
	100000	6.282	11.513	-11.983	534.649	498.345	6.79
0.5	20000	5.051	9.903	-10.597	156.164	156.577	0.26
	40000	5.578	10.597	-10.597	264.532	266.082	0.59
	60000	5.874	11.002	-10.597	355.655	362.848	2.02
	80000	6.094	11.290	-10.597	443.247	452.171	2.01
	100000	6.294	11.513	-10.597	541.317	536.339	0.92
0.75	20000	5.064	9.903	-9.786	158.151	163.453	3.35
	40000	5.591	10.597	-9.786	267.909	277.767	3.68
	60000	5.886	11.002	-9.786	359.788	378.783	5.28
	80000	6.106	11.290	-9.786	448.498	472.029	5.25
	100000	6.307	11.513	-9.786	548.212	559.893	2.13
1	20000	5.076	9.903	-9.210	160.182	168.514	5.20
	40000	5.604	10.597	-9.210	271.376	286.368	5.52
	60000	5.900	11.002	-9.210	364.883	390.512	7.02
	80000	6.120	11.290	-9.210	454.714	486.645	7.02
	100000	6.319	11.513	-9.210	555.080	577.230	3.99

3	20000	5.206	9.903	-7.013	182.352	189.326	3.82
	40000	5.735	10.597	-7.013	309.652	321.736	3.90
	60000	6.031	11.002	-7.013	416.089	438.742	5.44
	80000	6.252	11.290	-7.013	519.206	546.748	5.30
	100000	6.451	11.513	-7.013	633.487	648.520	2.37
5	20000	5.365	9.903	-5.991	213.792	199.861	6.52
	40000	5.894	10.597	-5.991	362.764	339.637	6.38
	60000	6.188	11.002	-5.991	486.937	463.154	4.88
	80000	6.409	11.290	-5.991	607.332	577.169	4.97
	100000	6.611	11.513	-5.991	743.392	684.604	7.91

ตารางที่ ข.2 ตารางเปรียบเทียบ Nu_{ave} ที่ได้จากการคำนวณและที่ได้จากความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์สำหรับพื้นผิววน

ϕ (% v/v)	Re	ln Nu	ln Re	ln ϕ^2	Nu_{ave} จากการ คำนวณ	Nu_{ave} จากการ แทนสมการ	% error
0.25	20000	4.707306	9.903488	-11.9829	110.753	103.9781	6.12
	40000	5.376433	10.59663	-11.9829	216.250	203.959	5.68
	60000	5.77665	11.0021	-11.9829	322.677	302.4848	6.26
	80000	6.061205	11.28978	-11.9829	428.892	400.0774	6.72
	100000	6.295109	11.51293	-11.9829	541.915	496.9819	8.29
0.5	20000	4.720492	9.903488	-10.5966	112.223	112.6837	0.41
	40000	5.387244	10.59663	-10.5966	218.600	221.0357	1.11
	60000	5.788094	11.0021	-10.5966	326.390	327.8107	0.44
	80000	6.071932	11.28978	-10.5966	433.517	433.5743	0.01
	100000	6.306405	11.51293	-10.5966	548.071	538.5922	1.73
0.75	20000	4.733528	9.903488	-9.7857	113.696	118.1103	3.88
	40000	5.39797	10.59663	-9.7857	220.957	231.6802	4.85
	60000	5.799474	11.0021	-9.7857	330.126	343.5972	4.08
	80000	6.090786	11.28978	-9.7857	441.769	454.4542	2.87
	100000	6.327565	11.51293	-9.7857	559.792	564.5295	0.85

1	20000	4.744297	9.903488	-9.21034	114.927	122.1183	6.26
	40000	5.413193	10.59663	-9.21034	224.347	239.5421	6.77
	60000	5.81225	11.0021	-9.21034	334.371	355.2569	6.25
	80000	6.10283	11.28978	-9.21034	447.121	469.8757	5.09
	100000	6.338931	11.51293	-9.21034	566.191	583.6864	3.09
3	20000	4.92868	9.903488	-7.01312	138.197	138.7161	0.38
	40000	5.546523	10.59663	-7.01312	256.345	272.0996	6.15
	60000	5.948387	11.0021	-7.01312	383.135	403.5419	5.33
	80000	6.240552	11.28978	-7.01312	513.142	533.7392	4.01
	100000	6.477715	11.51293	-7.01312	650.483	663.0185	1.93
5	20000	5.144555	9.903488	-5.99146	171.495	147.1842	14.18
	40000	5.705667	10.59663	-5.99146	300.566	288.7104	3.94
	60000	6.110843	11.0021	-5.99146	450.719	428.1768	5.00
	80000	6.40203	11.28978	-5.99146	603.068	566.3221	6.09
	100000	6.642372	11.51293	-5.99146	766.912	703.4935	8.27

เอกสารอ้างอิง

- [1] Intel Thailand, “วิธีการใช้ซิลิโคนและซิลิโคนทำงานอย่างไร”, สืบค้นเมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน 2562, จาก <https://www.thailand.intel.com/content/www/th/th/gaming/resources/how-to-apply-thermal-paste.html#:~:text=ตัวกระจายความร้อนใน,ใช้ซิลิโคนทา>
- [2] Compute and More, “ดับร้อนด้วย Thermal Paste อาวุธลับของคนรักคอมพิวเตอร์”, สืบค้นเมื่อวันที่ 9 มิถุนายน 2563, จาก <https://computeandmore.com/blogs/Thermal-paste>
- [3] Intel Thailand, “การระบายความร้อน CPU : การระบายความร้อนของ CPU ด้วยของเหลว เทียบกับการระบายความร้อนของ CPU ด้วยลม”, สืบค้นเมื่อวันที่ 12 มีนาคม 2563, จาก <https://www.thailand.intel.com/content/www/th/th/gaming/resources/cpu-cooler-liquid-cooling-vs-air-cooling.html>
- [4] A. Mehta, “Water Cooling Explained: How It Works and What Parts You Need”, สืบค้นเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2562, จาก [youtube.com](https://www.youtube.com/watch?v=...)
- [5] C.J. Ho, L.C. Wei and Z.W. Li (2010), “An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al₂O₃/water nanofluid”, Applied Thermal Engineering, 30, 96-103
- [6] V. Bianco, S. Nardini and O. Manca (2011), “Enhancement of heat transfer and entropy generation analysis of nanofluids turbulent convection flow in square section tubes”, Nanoscale Research Letters, 6:252
- [7] W. Frei, (2017). *Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application?* สืบค้นเมื่อวันที่ 17 มิถุนายน 2562, จาก <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application>
- [8] M. Kalteh, A. Abbassi, M. Saffar-Avval, A. Frijns, A. Darhuber and J. Harting (2012), “Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink”, Applied Thermal Engineering, 36, 260-268
- [9] J. Bower, H. Cao, G. Qiao, Q. Li, G. Zhang, E. Muru, and Y. Ding (2018), “Flow and heat transfer behavior of nanofluids in microchannels”, Progress in Natural Science: Materials International, 28, 225-234

- [10] H. Yarmand, S. Gharahkhani, S.N. Kazi, E. Sadeghinezhad, and M.R. Safaei (2014), “Numerical Investigation of Heat Transfer Enhancement in a Rectangular Heated Pipe for Turbulent Nanofluid”, Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal, Article ID 369593, 9
- [11] สุจินต์ พรราวพันธุ์ (2002), “อะลูมินากับการนำไปใช้งานทางเซรามิก”, ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก, 1-3
- [12] Intel Thailand.com, “โปรเซสเซอร์ Intel Core™ i7-920”, สืบค้นเมื่อวันที่ 31 มิถุนายน 2563, จาก <https://ark.intel.com/content/www/th/th/ark/products/37147/intel-core-i7-920-processor-8m-cache-2-66-ghz-4-80-gt-s-intel-qpi.html>
- [13] COMSOL 5.4 (2018), “Outflow”, COMSOL Multiphysics Reference Manual, 14, p.869
- [14] C. Sert, “Formulation of FEM for Two-Dimensional Problems”, Finite Element Analysis in Thermofluids, 3, 1-13
- [15] AUTODESK.Help, “Mesh Density”, สืบค้นเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2563, จาก https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-5C59F2AD-6016-4D02-8755-33732C107FA5-htm.html?fbclid=IwAR3ehKayXBIH81MkEGEMxm6PsMoUJj99NDzMrxVnPNnl8Y_951ljYni5q0
- [16] ปรีดาภรณ์ กาญจนสำราญวงศ์ (2018), “วิเคราะห์ข้อมูลสถิติ และทำงานวิจัยด้วย Excel70”, กิตินันท์ พลสวัสดิ์ (บ.ก.), Excel Statistic Analysis (พิมพ์ครั้งที่ 1), (น. 221-253), นนทบุรี: สำนักพิมพ์อินโฟเพรส.