

การประมาณขนาดกริดใกล้ผนังสำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหล  
เชิงคำนวณของการไหลปั่นป่วนในท่อพื้นผิวขรุขระอินฟเลกชันแนล

NEAR-WALL GRID SIZE ESTIMATION FOR COMPUTATIONAL FLUID  
DYNAMICS SIMULATION OF TURBULENT FLOW IN AN INFLECTIONAL  
ROUGH SURFACE PIPE



ไกรวิชญ์ บุญเสมอ  
KRAIWIT BOONSAMER

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2567

KMITL-2025-EN-M- 227-033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NEAR-WALL GRID SIZE ESTIMATION FOR COMPUTATIONAL FLUID  
DYNAMICS SIMULATION OF TURBULENT FLOW IN AN INFLECTIONAL  
ROUGH SURFACE PIPE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

KMITL-2025-EN-M- 227-033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2025**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมาณขนาดกริดใกล้ผนังสำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการไหลปั่นป่วนในท่อพื้นผิวขรุขระอินเฟกชันแนล
นักศึกษา	นายไกรวิชญ์ บุญเสมอ
รหัสประจำตัว	66016008
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุกรณ์

### บทคัดย่อ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics (CFD)) เป็นวิธีสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การไหลในระบบที่หลากหลาย หนึ่งในตัวประกอบหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของผลการจำลองคือ ขนาดกริดใกล้ผนัง ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการที่เหมาะสมในการประมาณขนาดกริดใกล้ผนังสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อพื้นผิวขรุขระแบบ Inflectional ด้วยการพิจารณาระยะห่างจากผนังไร้มิติ ( $y^+$ ) ท่อหน้าตัดวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 246.8 มิลลิเมตร จะถูกลดความซับซ้อนให้เป็นแบบจำลองสองมิติที่สมมาตรตามแนวแกน สนามการไหลเฉลี่ยและความปั่นป่วนได้มาจากการคำนวณสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)) และแบบจำลองความปั่นป่วน standard k-epsilon (SKE) ตัวประกอบความเสียดทานและโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ถูกทำนายสำหรับขนาดกริดใกล้ผนังที่ได้จากวิธีการประมาณที่ต่างกันถูกเปรียบเทียบกับงานวิจัยอ้างอิงก่อนหน้าเพื่อหาวิธีการประมาณขนาดกริดใกล้ผนังที่เหมาะสมกับระบบที่ถูกพิจารณา การเปรียบเทียบเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าขนาดกริดใกล้ผนังที่ถูกประมาณด้วยความสูงของความขรุขระไร้มิติ ( $y^+ = k_s^+$ ) ให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงสุดสำหรับทุกสภาวะการไหลที่ถูกพิจารณา สุดท้ายนี้สามารถสรุปได้ว่าขนาดกริดใกล้ผนังที่ถูกประมาณด้วย  $k_s^+$  เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการจำลองการไหลปั่นป่วนในท่อพื้นผิวขรุขระ

<b>Thesis</b>	Near-wall grid size estimation for computational fluid dynamics simulation of turbulent flow in an inflectional rough surface pipe
<b>Student</b>	Mr. Kraiwit Boonsamer
<b>Student ID.</b>	66016008
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Chemical Engineering
<b>Year</b>	2025
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Santi Wattananusorn

## Abstract

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a key method for analyzing flow phenomena in various systems. One of the main factors that directly affects simulation result accuracy is the near-wall grid size. Therefore, this thesis aims to develop an appropriate method for estimating the near-wall grid size for turbulent flow in an inflectional rough surface pipe by considering the dimensionless wall distance ( $y^+$ ). A circular pipe with an internal diameter of 246.8 mm was simplified as a two-dimensional axisymmetric model. The mean flow and turbulence fields were obtained by resolving the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations with standard k-epsilon (SKE) turbulence model. The simulated friction factors and near-wall velocity profiles for near-wall grid sizes obtained by different estimation approaches were compared to the previous reference works to investigate an appropriate near-wall grid size estimation method of the considered system. These comparisons revealed that the near-wall grid size estimated by the dimensionless roughness height ( $y^+ = k_s^+$ ) provided the most accurate results for all considered flow conditions. Finally, it can be concluded that the near-wall grid size estimated by  $k_s^+$  is essential for simulating turbulent flow in a rough surface pipe.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับกลศาสตร์ของไหล ตลอดจนให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณในความเมตตาและความทุ่มเทของอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ นักวิจัยประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆ เกี่ยวกับการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ รวมทั้งช่วยวิเคราะห์ผลการวิจัยให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตลอดจนให้ความรู้และประการอันมีค่าแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ นายปิยะวุฒิ ทองน้อย รุ่นพี่ในห้องวิจัยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และนายณัฐอมร คำลือ กับนางสาวจริยาภรณ์ ธัญทิพย์พัฒน์ ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ภายในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ตลอดมา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ให้การอบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ และดูแลเอาใจใส่ต่อนักศึกษาตลอดมา อีกทั้งขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์สำหรับการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจให้การสนับสนุน และเป็นแรงผลักดันสำคัญในการศึกษาวิจัยจนประสบความสำเร็จ

ทั้งนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณประโยชน์จากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้แก่ผู้มีพระคุณของข้าพเจ้าทุกท่านที่ได้กล่าวมา หากมีข้อผิดพลาดประการใดในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้ด้วยความเต็มใจ และขออภัยมา ณ โอกาสนี้

ไกรวิชญ์ บุญเสมอ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD).....	3
2.1.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-processor).....	3
2.1.2 ขั้นตอนการคำนวณหาผลเฉลย (Solver).....	3
2.1.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-processor).....	4
2.2 สมการควบคุม (Governing equations).....	4
2.2.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation).....	4
2.2.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equations).....	4
2.2.3 สมการพลังงาน (Energy equation).....	5
2.3 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence and its modeling).....	5
2.3.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์.....	6
2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon.....	8
2.4 ฟังก์ชันของผนัง (Wall function).....	9
2.4.1 กฎของผนัง (Law of the wall).....	9
2.4.2 กฎของผนังที่ถูกปรับปรุงสำหรับความขรุขระ (Law of the wall modified for roughness).....	11
2.5 การไหลภายในท่อ (Flow in pipe).....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

IV

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 บริเวณทางเข้าของการไหลภายในท่อ (The entrance region) .....	13
2.5.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction factor) .....	14
2.5.2.1 การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับท่อเรียบ .....	14
2.5.2.2 การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับท่อขรุขระ .....	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	18
3.1 การสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD modeling) .....	18
3.1.1 การกำหนดโดเมนการคำนวณ (Definition of the computational domain) .....	18
3.1.2 การสร้างกริด (Grid generation) .....	19
3.2 การตั้งค่าทางกายภาพและเชิงตัวเลข (Physical and numerical setups) .....	19
3.3 กลยุทธ์การหาผลเฉลย .....	21
3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง .....	21
3.4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ Luafer [9] ...	21
3.4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับสมการเชิงประจักษ์ของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบนนิ่ง .....	22
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	23
4.1 การศึกษาความเป็นอิสระของกริด (Grid independence study) .....	23
4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation of the model).....	24
4.3 การวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการจำลอง (Analysis of simulation results) .....	25
4.3.1 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบนนิ่ง (Fanning friction factor).....	25
4.3.2 โปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนัง (Near-wall velocity profile).....	28
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	34
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	34
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	35
บรรณานุกรม.....	36
ประวัติผู้เขียน.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 ขนาดแบบจำลองของท่อที่สภาวะการศึกษาต่างๆ.....	18
ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	20



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โพรไฟล์ความเร็วของชั้นการไหลใกล้ผนัง (ดัดแปลงจาก [4]).....	10
รูปที่ 2.2 การพัฒนาโพรไฟล์ความเร็วของการไหลภายในท่อ [4].....	13
รูปที่ 2.3 แผนภาพสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อที่มีความขรุขระแบบโมนโทนิคและ อินเฟกชันแนล [7].....	15
รูปที่ 3.1 โดเมนการคำนวณของท่อที่ใช้ศึกษา .....	18
รูปที่ 4.1 โพรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยแบบนอร์มัลไลซ์ของการไหลภายในท่อเรียบสำหรับความละเอียด ของกริด 3 ระดับที่แตกต่างกัน.....	23
รูปที่ 4.2 โพรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยแบบนอร์มัลไลซ์ของการไหลภายในท่อเรียบสำหรับเลขเรย์โนลด์ ที่ 50,000 .....	24
รูปที่ 4.3 โพรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยแบบนอร์มัลไลซ์ของการไหลภายในท่อเรียบสำหรับเลขเรย์โนลด์ ที่ 500,000.....	25
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแผ่นนิ่งที่เลขเรย์โนลด์และระยะทางจาก ผนังไร้มิติต่างๆ สำหรับท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.00026 m.....	26
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแผ่นนิ่งที่เลขเรย์โนลด์และระยะทางจาก ผนังไร้มิติต่างๆ สำหรับท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.0012 m.....	26
รูปที่ 4.6 แผนภาพขนาดกริดใกล้ผนังที่ใช้ในการจำลอง .....	27
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไร้มิติต่างๆ สำหรับเลข เรย์โนลด์ 50,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.00026 m .....	28
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไร้มิติต่างๆ สำหรับเลข เรย์โนลด์ 75,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.00026 m .....	29
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไร้มิติต่างๆ สำหรับเลข เรย์โนลด์ 100,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.00026 m .....	29
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไร้มิติต่างๆ สำหรับเลข เรย์โนลด์ 300,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.00026 m.....	29
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไร้มิติต่างๆ สำหรับเลข เรย์โนลด์ 500,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.00026 m.....	30
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไร้มิติต่างๆ สำหรับเลข เรย์โนลด์ 50,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.0012 m .....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไรมิตต่างๆ สำหรับเลข เรย์โนลด์ 75,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.0012 m .....	31
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไรมิตต่างๆ สำหรับเลข เรย์โนลด์ 100,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.0012 m .....	31
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไรมิตต่างๆ สำหรับเลข เรย์โนลด์ 300,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.0012 m .....	32
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไรมิตต่างๆ สำหรับเลข เรย์โนลด์ 500,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.0012 m .....	32



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมเคมี ท่อถือเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญในการลำเลียงของไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยในการออกแบบระบบท่อหรือการเลือกขนาดของปั๊มที่ใช้ในการเพิ่มพลังงานให้กับของไหล หนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่ต้องพิจารณาคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนถึงการสูญเสียพลังงานจากแรงต้านภายในท่อ ค่าดังกล่าวจะมีความแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของพื้นผิวภายในท่อ อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบท่อถูกใช้งานเป็นระยะเวลานาน พื้นผิวภายในของท่ออาจก่อให้เกิดการสะสมของตะกอนหรือการกัดกร่อน ซึ่งจะทำให้ลักษณะของผิวท่อที่มีความขรุขระมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้แรงเสียดทานภายในระบบสูงขึ้นตาม และอาจทำให้พลังงานจากปั๊มไม่เพียงพอสำหรับการขนส่งของไหล ดังนั้น การพิจารณาถึงลักษณะของพื้นผิวภายในท่อและผลกระทบที่มีต่อความต้านทานการไหล จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงอย่างรอบคอบ เพื่อให้กระบวนการผลิตสามารถดำเนินการไปได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ

ทั้งนี้ เนื่องจากท่อเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างทางเรขาคณิตเรียบง่ายและลักษณะการไหลภายในที่ไม่ซับซ้อน จึงมักถูกเลือกมาใช้ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์เกี่ยวกับปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการศึกษาด้วยวิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการจำลองพฤติกรรมของการไหล การถ่ายเทความร้อน การแพร่กระจายของอนุภาค ตลอดจนปฏิบัติการทางเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบได้อย่างแม่นยำและน่าเชื่อถือ อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนและระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษา จึงทำให้วิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมในภาคอุตสาหกรรม

ในการศึกษาที่ดำเนินงานด้วยวิธีดังกล่าว หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มักทำให้ผลการจำลองเบี่ยงเบนออกไปจากทางทฤษฎีคือ การกำหนดขนาดกริดใกล้ผนัง ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยค่าระยะทางจากผนังไร้มิติ หรือ  $y^+$  ในการคำนวณ แม้ว่าจะมีแนวทางแนะนำให้ใช้ค่า  $y^+ = 30$  สำหรับการจำลองการไหลบนพื้นผิวเรียบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ [1] แต่ในกรณีของการไหลบนพื้นผิวที่มีความขรุขระ ยังไม่มีข้อมูลที่ชัดเจนว่าวิธีการเดียวกันนี้จะสามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ ด้วยเหตุนี้เอง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางในการกำหนดค่าขนาดกริดใกล้ผนังสำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนบนพื้นผิวขรุขระผ่านการเลือกค่า  $y^+$  ที่เหมาะสม เพื่อให้ผลการจำลองของการไหลที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำและสามารถสะท้อนพฤติกรรมทางฟิสิกส์ได้อย่างน่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดกริดใกล้เคียงกับความแม่นยำในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อขรุขระแบบอินเฟกชันแนล
2. เพื่อพัฒนาวิธีการกำหนดขนาดกริดใกล้เคียงที่เหมาะสมสำหรับการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายในท่อขรุขระแบบอินเฟกชันแนล

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนที่สภาวะการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ภายในท่อหน้าตัดวงกลม โดยพิจารณาลักษณะความขรุขระแบบอินเฟกชันแนล ซึ่งมีความสูงของความขรุขระเท่ากับ 0.26 mm และ 1.2 mm
2. ดำเนินการจำลองการไหลด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณผ่านแบบจำลองของท่อสองมิติแบบสมมาตรตามแนวแกน โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 12.0
3. จำลองสนามการไหลเฉลี่ยและความปั่นป่วนด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์และแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ตามลำดับ
4. พัฒนาวิธีการกำหนดขนาดกริดใกล้เคียงที่เหมาะสมผ่านการพิจารณาค่า  $y^+$  ที่แตกต่างกันทั้งหมด 5 รูปแบบ ได้แก่  $y^+ = 10$ ,  $y^+ = 11.225$ ,  $y^+ = 30$ ,  $y^+ = TSM$ , และ  $y^+ = k_s^+$

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถพัฒนาวิธีการที่เหมาะสมในการกำหนดขนาดกริดใกล้เคียงสำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนบนพื้นผิวขรุขระ ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำของผลการจำลองที่ดำเนินการด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. สามารถเสนอข้อแนะนำเบื้องต้นเพื่อการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต เช่น การศึกษาผลของค่าคงที่ของความขรุขระ สำหรับพื้นผิวขรุขระประเภทอื่น เพื่อเพิ่มความครอบคลุมของการจำลองในหลากหลายสภาวะมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่รวมองค์ความรู้ทางกลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanics) วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) และวิทยาการทางคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกัน เพื่อใช้ในการจำลองและแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การถ่ายเทความร้อน การแพร่กระจายของอนุภาค และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยอาศัยการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations) ผ่านวิธีเชิงตัวเลขและอัลกอริทึมทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถวิเคราะห์ปรากฏการณ์ต่างๆ ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้เทคนิคทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงได้รับการยอมรับและถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม โดยมีขั้นตอนหลักในการดำเนินงาน 3 ขั้นตอน ได้แก่ [2]

#### 2.1.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-processor)

ขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมข้อมูลที่จำเป็นสำหรับปัญหาการไหล เพื่อป้อนเข้าสู่โปรแกรมการคำนวณ ซึ่งประกอบด้วย

1. สร้างแบบจำลองของพื้นที่การคำนวณ (Computational domain)
2. สร้างกริด (Grid) โดยแบ่งพื้นที่การคำนวณออกเป็นส่วนย่อยๆ จำนวนมากที่เรียกว่า เซลล์ (Cell)
3. เลือกสมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์
4. กำหนดคุณสมบัติของของไหล
5. กำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary condition) ที่เหมาะสมกับแบบจำลอง

#### 2.1.2 ขั้นตอนการคำนวณหาผลเฉลย (Solver)

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการคำนวณโดยอาศัยเทคนิคเชิงตัวเลข เช่น วิธีผลต่างจำกัด (Finite difference method) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) และวิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume method) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐานดังนี้

1. ประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าด้วยฟังก์ชันอย่างง่าย
2. แทนค่าตัวแปรที่ประมาณไว้ลงในสมการควบคุมของการไหล
3. แปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิต (Algebraic equations) ด้วยกระบวนการดิสครีไทเซชัน (Discretization)

4. คำนวณหาคำตอบของสมการพีชคณิตด้วยวิธีการคำนวณซ้ำ (Iterative method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ส่วนบุคคลที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-processor)

ขั้นตอนนี้เป็นการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และตีความข้อมูล ซึ่งสามารถแสดงผลออกมาได้หลากหลายรูปแบบ เช่น ภาพคอนทัวร์ เวกเตอร์ความเร็ว เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค และกราฟสองมิติ เป็นต้น

## 2.2 สมการควบคุม (Governing equations)

สมการควบคุมพื้นฐานของการไหลที่มีความหนืด หรือที่เรียกว่า “สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations)” เป็นสมการพื้นฐานในพลศาสตร์ของไหล ซึ่งได้มาจากหลักการทางฟิสิกส์ 3 ข้อ ได้แก่ กฎการอนุรักษ์มวล (Mass conservation law) กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน (Newton’s second law of motion) และกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (First law of thermodynamics) จากกฎดังกล่าว จึงสามารถแสดงสมการสำหรับการไหลของของไหลได้ดังนี้ [3]

### 2.2.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

จากกฎการอนุรักษ์มวลที่กล่าวไว้ว่า “มวลไม่สามารถสูญหายได้” สามารถเขียนสมการความต่อเนื่อง เพื่ออธิบายการไหลของของไหลที่อัดตัวได้ (Compressible fluid) ในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) ภายใต้ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) ได้ดังสมการที่ 2.1

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (2.1)$$

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (2.2)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล,  $t$  คือ เวลา,  $\mathbf{U}$  คือ เวกเตอร์ความเร็วของของไหล, และ  $u \ v \ w$  คือ ความเร็วตามแนวแกน  $x \ y \ z$  ตามลำดับ

### 2.2.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equations)

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันที่กล่าวไว้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของมวลใดๆ จะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่อมวลนั้น” สามารถเขียนสมการโมเมนตัม เพื่ออธิบายการไหลของของไหลที่อัดตัวได้ในสภาวะไม่คงตัวภายใต้ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ได้ดังสมการที่ 2.3 ถึงสมการที่ 2.5

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.3)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.4)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.5)$$

โดยที่  $p$  คือ ความดันของของไหล,  $\tau$  คือ ความเค้นเฉือน (Shear stress), และ  $S_{Mx}$   $S_{My}$   $S_{Mz}$  คือ เทอมของแหล่งกำเนิดโมเมนตัมตามแนวแกน  $x$   $y$   $z$  ตามลำดับ

### 2.2.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ที่กล่าวไว้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของกลุ่มอนุภาคของไหล เท่ากับผลรวมของอัตราการถ่ายโอนความร้อนกับอัตราการทำงานที่กระทำสู่กลุ่มอนุภาคของไหล” สามารถเขียนสมการพลังงาน เพื่ออธิบายการไหลของของไหลที่อัดตัวได้ในสถานะไม่คงตัวภายใต้ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ได้ดังสมการที่ 2.6

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (p\mathbf{U}) + \nabla \cdot (k\nabla T) + \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} + S_E \quad (2.6)$$

โดยที่  $E$  คือ พลังงานรวมต่อมวลของของไหล,  $k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล,  $T$  คือ อุณหภูมิ, และ  $S_E$  คือ เทอมของแหล่งกำเนิดพลังงาน

### 2.3 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence and its modeling)

การศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ของการไหลแบบปั่นป่วนถือเป็นความท้าทายสำคัญในทางพลศาสตร์ของไหล เนื่องจากการไหลมีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบ (Irregularity), คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Unsteady state), มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติแบบปั่นป่วน (Chaotic), เกิดการแพร่ (Diffusivity), เกิดขึ้นในสามมิติ (Three dimensional), เกิดการหมุนวน (Rotational), และพลังงานสามารถสลายตัวได้ (Dissipative) ทำให้การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยโดยตรงเป็นไปได้ยาก จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการจำลองเข้าช่วยเพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีแรก “การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (Direct numerical simulation, DNS)” วิธีนี้จะทำการจำลองความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นโดยตรง ผ่านการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับทุกขนาดของการหมุนวน (Eddy scale) ซึ่งแม้ว่าวิธีนี้จะให้ผลการจำลองที่สมจริงและแม่นยำมากที่สุด แต่ก็มีข้อเสียคือต้องใช้ทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ที่สูงและระยะเวลาในการคำนวณที่ยาวนาน จึงเป็นที่มาของวิธีที่สองก็คือ “การจำลองการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large eddy simulation, LES)” ซึ่งจะลดความซับซ้อนลงมาจากวิธีก่อนหน้า โดยจะทำการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ที่ผ่านการกรอง (Filtered Navier-Stokes equations) สำหรับการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large eddy) ส่วนการหมุนวนขนาดเล็ก (Small eddy) จะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเข้ามาช่วย ซึ่งวิธีนี้จะสามารถลดระยะเวลาและทรัพยากรในการคำนวณลงได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม ในงานเชิงวิศวกรรม การวิเคราะห์แนวโน้มของปรากฏการณ์การไหลผ่านค่าการไหลเฉื่อยนั้น ถือว่าเพียงพอแล้วสำหรับการนำไปใช้ในการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้งาน ดังนั้น การจำลองความปั่นป่วนวิธีสุดท้ายอย่าง “สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, RANS)” จึงเป็นวิธีที่เหมาะสม และถูกนำมาใช้ในงานศึกษาครั้งนี้ โดยวิธีนี้จะจำลองทุกขนาดของการหมุนวนที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถประมาณค่าคุณสมบัติของการไหลเฉลี่ยของระบบได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ทรัพยากรในการคำนวณที่สูง

### 2.3.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์

การวิเคราะห์พฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสมการควบคุมการไหลเป็นเรื่องที่ซับซ้อนและทำได้ยาก เนื่องจากลักษณะการไหลที่ไม่เป็นระเบียบและแปรผันตามเวลา ดังนั้นเทคนิค “การแยกของเรย์โนลด์ (Reynolds decomposition)” และ “การเฉลี่ยเชิงเวลา (Time average)” จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้กับสมการนาเวียร์-สโตกส์ เพื่อให้ได้สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ สำหรับใช้พิจารณาค่าการไหลเฉลี่ยที่เกิดขึ้น โดยสมการสำหรับการไหลของของไหลที่อัดตัวได้ในสถานะไม่คงตัวภายใต้ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.7 ถึงสมการที่ 2.10

สมการความต่อเนื่อง:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}) = 0 \quad (2.7)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน x:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \left[ -\frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho(u')^2}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho u'w'}) \right] + S_{Mx} \quad (2.8)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{\mathbf{U}}) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} \\ + \left[ -\frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho(v')^2}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho v'w'}) \right] &+ S_{My} \end{aligned} \quad (2.9)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน z:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{\mathbf{U}}) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} \\ + \left[ -\frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho u'w'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho v'w'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho(w')^2}) \right] &+ S_{Mz} \end{aligned} \quad (2.10)$$

โดยที่  $\mu$  คือ ความหนืดของของไหล,  $\bar{p}$  คือ ความดันเฉลี่ย,  $\bar{\mathbf{U}}$  คือ เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, และ  $\bar{u}$   $\bar{v}$   $\bar{w}$  คือ ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x y z ตามลำดับ

ในการแก้ปัญหาของการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์จะมีพจน์เพิ่มเติมที่เรียกว่า ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stress,  $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ ) ปรากฏขึ้นมาเนื่องจากกระบวนการเฉลี่ยของสมการ พจน์ดังกล่าวนี้จะสะท้อนถึงลักษณะของการแพร่กระจายของความปั่นป่วน (Turbulence diffusion) ที่เกิดขึ้น ซึ่งไม่สามารถทำการคำนวณโดยตรงผ่านการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์เพียงอย่างเดียวได้ จึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence models) เข้ามาช่วย ทั้งนี้ ในปี ค.ศ. 1877 Boussinesq ได้เสนอสมมติฐานที่ว่า ความเค้นเรย์โนลด์สามารถจำลองได้จากการใช้ค่าความหนืดหมุนวน (Eddy viscosity) หรือความหนืดปั่นป่วน (Turbulent viscosity) ซึ่งสมมติฐานนี้แสดงให้เห็นว่าเทนเซอร์ของความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stress tensor) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราการเสียรูปเฉลี่ย (Mean strain rate) ดังแสดงในสมการที่ 2.11 [2]

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $u'_i$  และ  $u'_j$  คือ ความเร็วผันผวน (Fluctuation velocity) ในทิศทาง  $i$  และ  $j$ ,  $\mu_t$  คือ ความหนืดปั่นป่วน,  $\delta_{ij}$  คือ Kronecker delta, และ  $\bar{u}_i$ ,  $\bar{u}_j$ ,  $\bar{u}_k$  คือ ความเร็วเฉลี่ยในทิศทาง  $i$ ,  $j$ ,  $k$  ตามลำดับ

จากสมมติฐานข้างต้น เมื่อทำการพิจารณาร่วมกับสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ จะสามารถปรับรูปแบบของสมการที่ 2.8 ถึงสมการที่ 2.10 ใหม่ได้ดังต่อไปนี้

สมการโมเมนตัมในแนวแกน x:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{u}) + \nabla \cdot (\rho\bar{u}\bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{u} + S_{Mx} \quad (2.12)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน y:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{v}) + \nabla \cdot (\rho\bar{v}\bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{v} + S_{My} \quad (2.13)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน z:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{w}) + \nabla \cdot (\rho\bar{w}\bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{w} + S_{Mz} \quad (2.14)$$

โดยที่  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดสมมูล (Effective viscosity coefficient)

### 2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

ในปัจจุบันยังไม่มีแบบจำลองความปั่นป่วนสากลที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพกับทุกสถานการณ์ของการไหลที่ถูกจำลองด้วยวิธีนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ อย่างไรก็ตาม หนึ่งในแบบจำลองที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาคาร์ไหลและอธิบายปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นก็คือ “แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon (SKE)” เนื่องจากแบบจำลองนี้ใช้ระยะเวลาในการคำนวณที่น้อย อีกทั้งยังให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการไหลในระบบที่ไม่ซับซ้อนอย่างการไหลภายในท่อ โดยแบบจำลองนี้จะประกอบไปด้วยสมการถ่ายโอน (Transport equations) สองสมการ ดังต่อไปนี้ [1]

สมการถ่ายโอนพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $k$ ):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการถ่ายโอนอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $\varepsilon$ ):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon\bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.16)$$

ความหนืดปั่นป่วน ( $\mu_t$ ):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.17)$$

โดยค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วนจะประกอบไปด้วย  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ , และ  $\sigma_\varepsilon = 1.3$

แม้ว่าแบบจำลองความปั่นป่วนนี้จะมีประสิทธิภาพสูงและใช้ทรัพยากรในการคำนวณต่ำ แต่ก็มีข้อจำกัดในการจำลองพฤติกรรมการไหลในบริเวณใกล้ผนัง (Near-wall region) โดยตรง เนื่องจากแบบจำลองถูกพัฒนาให้เหมาะกับการไหลที่มีเลขเรย์โนลด์สูงและการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่ (Fully turbulent flow) ทำให้ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของของไหลในบริเวณดังกล่าวได้อย่างแม่นยำ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณซึ่งถูกพัฒนาขึ้นจากสมการเชิงประจักษ์ (Empirical equations) เพื่อช่วยในการคำนวณการไหลในบริเวณใกล้ผนังให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยจะทำการกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป [1]

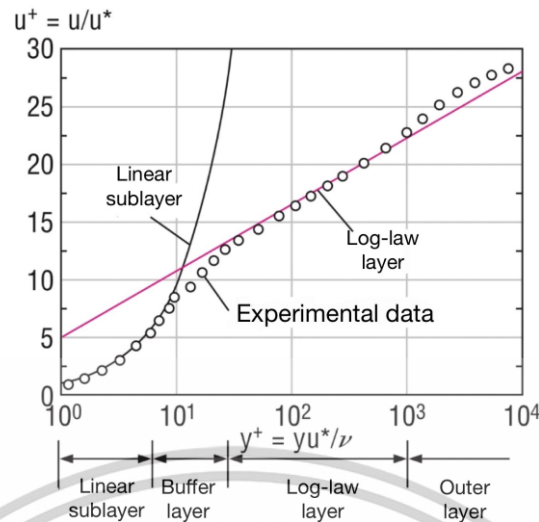
## 2.4 ฟังก์ชันของผนัง (Wall function)

ฟังก์ชันของผนังเป็นเทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นจากสมการที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลในชั้นกอลูการิทิม ที่เป็นส่วนหนึ่งของการไหลในชั้นขอบเขต (Boundary layer) เทคนิคนี้จะถูกใช้งานร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon เพื่อจำลองการไหลในบริเวณใกล้ผนัง ทำให้สามารถลดความจำเป็นในการสร้างกริดละเอียดสูงในบริเวณดังกล่าวและยังคงรักษาไว้ซึ่งความแม่นยำของผลลัพธ์ทางการจำลองได้ อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาและทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]

### 2.4.1 กฎของผนัง (Law of the wall)

กฎของผนังเป็นหลักการพื้นฐานสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลบริเวณใกล้ผนังที่อยู่ภายในชั้นขอบเขต ซึ่งเป็นบริเวณที่มีเกรเดียนต์ของความเร็วและการถ่ายโอนโมเมนตัมที่สูง ทำให้พฤติกรรมของการไหลในบริเวณนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองชั้นหลัก คือ ชั้นการไหลด้านใน (Inner layer) และชั้นการไหลด้านนอก (Outer layer) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 2.1 [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โปรไฟล์ความเร็วของชั้นการไหลใกล้ผนัง (ดัดแปลงจาก [4])

สำหรับชั้นการไหลด้านใน สามารถแบ่งออกได้เป็นสามชั้นย่อยตามระยะห่างจากผนัง โดยชั้นแรกคือ ชั้นย่อยเชิงเส้น (Linear sublayer,  $y^+ < 5$ ) ซึ่งเป็นบริเวณที่บางและอยู่ชิดผนังมากที่สุด ในบริเวณนี้ความเร็วของของไหลที่ผนังจะมีค่าเป็นศูนย์ตามเงื่อนไขขอบเขตแบบไม่ลื่นไหล (No-slip boundary condition) ส่งผลให้การหมุนวนจากความปั่นป่วนลดลงอย่างต่อเนื่องและหายไปเมื่อเข้าใกล้ผนัง ดังนั้นพฤติกรรมของการไหลในชั้นนี้จึงถูกควบคุมด้วยความหนืดเป็นหลัก ซึ่งสามารถแสดงโปรไฟล์ความเร็วของชั้นการไหลในรูปของปริมาณไร้มิติได้ดังสมการที่ 2.18

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{y_p u_\tau \rho}{\mu} \quad (2.18)$$

หรือ

$$u^+ = y^+ \quad (2.19)$$

ชั้นการไหลถัดจากชั้นย่อยเชิงเส้นขึ้นมาคือ ชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer layer,  $5 < y^+ < 30$ ) ซึ่งเป็นบริเวณที่อิทธิพลจากความปั่นป่วนเริ่มเข้ามามีบทบาทต่อพฤติกรรมของการไหล อย่างไรก็ตาม ความหนืดยังคงเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมลักษณะการไหลในชั้นนี้ และสำหรับชั้นการไหลสุดท้ายในบริเวณใกล้ผนังคือ “ชั้นกฎลอการิทึม (Logarithmic law layer,  $30 < y^+ < 300$ )” ในบริเวณนี้ ความปั่นป่วนจะมีอิทธิพลมากกว่าความหนืด ทำให้การไหลมีลักษณะปั่นป่วนอย่างเด่นชัด ซึ่งสามารถแสดงโปรไฟล์ความเร็วของชั้นการไหลในรูปของปริมาณไร้มิติได้ดังสมการที่ 2.20 [1]

$$u^+ = (1/\kappa) \ln y^+ + B \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการไหลด้านนอก ความปั่นป่วนยังคงเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมพฤติกรรมของการไหล โดยมีอิทธิพลสูงกว่าความหนืดอย่างชัดเจน ทำให้ในบริเวณแกนกลางของการไหลภายในท่อแบบปั่นป่วน โปรไฟล์ความเร็วจะขึ้นอยู่กักระยะห่างจากศูนย์กลางของท่อเท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงโปรไฟล์ความเร็วของชั้นการไหลนี้ได้ดังสมการที่ 2.21

$$\frac{u_{\max} - u}{u_\tau} = 2.5 \ln \frac{R}{R-r} \quad (2.21)$$

โดยที่  $u^+$  คือ ความเร็วไร้มิติ (Dimensionless velocity),  $y^+$  คือ ระยะทางจากผนังไร้มิติ (Dimensionless wall distance),  $y_p$  คือ ระยะทางจากผนังถึงโหนดการคำนวณของกริดใกล้ผนัง (Wall distance to the computing node),  $\kappa = 0.41$  คือ ค่าคงที่ของ von Karman,  $B = 5.45$  คือ ค่าคงที่เชิงประจักษ์ (Empirical constant value) สำหรับผนังเรียบ,  $u_\tau = (\tau_w / \rho)^{1/2}$  คือ ความเร็วเสียดทาน (Friction velocity),  $\tau_w = \rho \lambda U^2 / 2$  คือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress),  $U$  หรือ  $V_{avg}$  คือ ความเร็วเฉลี่ย,  $\lambda$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผนัง (Skin friction factor,  $C_f$ ) หรือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแผ่นนิ่ง (Fanning friction factor,  $f_f$ ),  $u_{\max}$  คือ ความเร็วสูงสุด,  $R$  คือ รัศมีของท่อ, และ  $r$  คือ ระยะทางจากจุดศูนย์กลางท่อ

#### 2.4.2 กฎของผนังที่ถูกปรับปรุงสำหรับความขรุขระ (Law of the wall modified for roughness)

สำหรับกรณีการไหลบนพื้นผิวขรุขระ โปรไฟล์ความเร็วในชั้นกฎลอการิทึมยังคงสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลบริเวณใกล้ผนังได้ อย่างไรก็ตาม ค่าคงที่เชิงประจักษ์ดังปรากฏในสมการที่ 2.20 สำหรับกรณีผนังเรียบ จะเปลี่ยนเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความสูงของความขรุขระไร้มิติ (Dimensionless roughness height) ซึ่งนิยามได้จากสมการที่ 2.22 ดังนั้น โปรไฟล์ความเร็วของชั้นการไหลใกล้ผนังนี้จะสามารถปรับเปลี่ยนได้ดังสมการที่ 2.23

$$k_s^+ = \frac{k_s u_\tau \rho}{\mu} \quad (2.22)$$

$$u^+ = (1/\kappa) \ln y^+ + B(k_s^+) \quad (2.23)$$

เมื่อ  $k_s^+$  คือ ความสูงของความขรุขระไร้มิติ,  $k_s$  หรือ  $\mathcal{E}$  คือ ความสูงของความขรุขระ, และ  $B(k_s^+)$  คือค่าคงที่เชิงประจักษ์สำหรับกรณีการไหลบนพื้นผิวขรุขระ โดยค่าดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้ 3 ช่วงตามความสูงของความขรุขระไร้มิติ ได้แก่ Hydrodynamically smooth ( $k_s^+ \leq 2.25$ ),

Transitional ( $2.25 < k_s^+ \leq 90$ ), และ Completely rough ( $k_s^+ > 90$ ) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.24, 2.25 และ 2.26 ตามลำดับ [5]

$$B = c \approx 5.2 \quad (2.24)$$

$$B = c + [8.5 - c - (1/\kappa) \ln k_s^+] \sin 0.4258 (\ln k_s^+ - 0.811) \quad (2.25)$$

$$B = 8.5 - (1/\kappa) \ln k_s^+ \quad (2.26)$$

จากสมการความสัมพันธ์ของการไหลในชั้นกฏลอการิทึมที่ได้อธิบายไว้ในส่วนก่อนหน้า จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันของผนังเป็นเทคนิคที่ช่วยให้สามารถประมาณค่าการไหลบริเวณใกล้ผนังได้โดยตรง โดยจะข้ามการคำนวณรายละเอียดของการไหลในชั้นย่อยเชิงเส้นและชั้นบัฟเฟอร์ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความซับซ้อนและต้องการกริดความละเอียดสูง อย่างไรก็ตาม ฟังก์ชันของผนังจะทำงานเฉพาะที่ตำแหน่งของกริดใกล้ผนังเท่านั้น ดังนั้น เพื่อให้เทคนิคนี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขนาดของกริดใกล้ผนัง (Near-wall grid size,  $2y_p$ ) ควรจะต้องอยู่ในระยะที่เหมาะสม เพื่อให้การประมาณค่าการไหลเฉลี่ยในบริเวณใกล้ผนังมีความแม่นยำสูงสุด

## 2.5 การไหลภายในท่อ (Flow in pipe)

จากการศึกษาทดลองของ Osborne Reynolds ในอดีต พบว่าลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อสามารถจำแนกออกได้ โดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงหนืด (Viscous force) หรือที่เรียกว่า ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number,  $Re$ ) ซึ่งรูปแบบของการไหลจะสามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะ ได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow,  $Re < 2300$ ), การไหลแบบเปลี่ยนผ่าน (Transition flow,  $2300 \leq Re < 4000$ ), และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow,  $Re \geq 4000$ ) โดยที่ตัวเลขเรย์โนลด์สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.27 [4]

$$Re = \frac{V_{avg} D}{\nu} \quad (2.27)$$

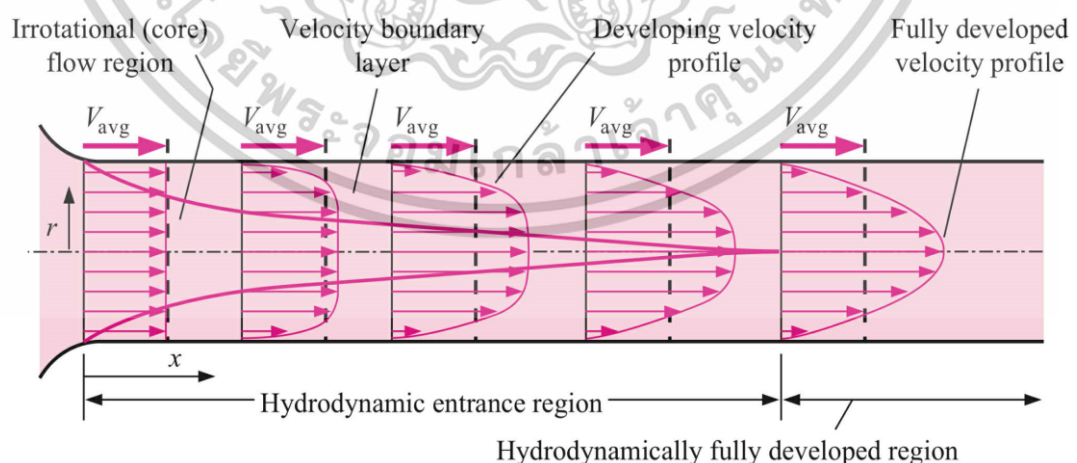
เมื่อ  $D$  คือ ความยาวคุณลักษณะของรูปทรงหน้าตัด (Characteristic length of geometry) ซึ่งกรณีของท่อหน้าตัดวงกลมจะมีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และ  $\nu = \mu / \rho$  คือ ความหนืดจลศาสตร์ของของไหล (Kinematic viscosity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 บริเวณทางเข้าของการไหลภายในท่อ (The entrance region)

เมื่อของไหลไหลเข้าสู่ท่อทรงกระบอกที่มีหน้าตัดวงกลมด้วยความเร็วสม่ำเสมอ (Uniform velocity) จะพบว่าโปรไฟล์ความเร็วของของไหลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงระยะความยาวหนึ่งของท่อ เนื่องจากการมีสภาวะไม่ลื่นไถล (No-slip condition) ทำให้อนุภาคของของไหลที่สัมผัสกับผนังท่อเกิดการหยุดนิ่งหรือมีความเร็วเป็นศูนย์ ดังนั้น ความเร็วบริเวณแกนกลางท่อจึงต้องมีค่าสูงขึ้นเพื่อรักษาอัตราการไหลเชิงมวลให้คงที่ตลอดแนวการไหล

ในทางทฤษฎีแล้ว การไหลภายในท่อจะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองบริเวณหลัก ได้แก่ บริเวณชั้นขอบเขตการไหล (Boundary layer region) ซึ่งเป็นบริเวณที่แรงหนืดมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ความเร็วของของไหลมีการเปลี่ยนแปลงตามแนวรัศมีอย่างชัดเจน และบริเวณการไหลหลัก (Core flow region) ซึ่งเป็นบริเวณที่อิทธิพลของความหนืดลดลงจนแทบไม่มี ส่งผลให้ความเร็วของของไหลในแนวรัศมีมีค่าคงที่ โดยบริเวณของการไหลที่ได้รับอิทธิพลจากแรงเฉือนอันเนื่องมาจากความหนืดของของไหลจะเรียกว่า ชั้นขอบเขตความเร็ว (Velocity boundary layer) ซึ่งความหนาของชั้นขอบเขตนี้จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามทิศทางการไหลจนกระทั่งใหญ่เท่ากับรัศมีของท่อจะเรียกบริเวณที่ยังคงมีการพัฒนาของโปรไฟล์ความเร็วนี้ว่า บริเวณทางเข้าไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamically entrance region) และช่วงระยะของบริเวณนี้เรียกว่า ความยาวทางเข้าไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic entry length,  $L_e$ ) ส่วนบริเวณหลังจากนี้ ซึ่งโปรไฟล์ความเร็วจะมีลักษณะการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully developed flow) และไม่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกนของท่อจะเรียกว่า บริเวณไฮโดรไดนามิกที่พัฒนาเต็มที่ (Hydrodynamically fully developed region) [4]



รูปที่ 2.2 การพัฒนาโปรไฟล์ความเร็วของการไหลภายในท่อ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยความยาวทางเข้าไฮดรอดนามิกสำหรับการไหลแบบราบเรียบและการไหลปั่นป่วนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.28 และ 2.29 ตามลำดับ [6]

$$L_h = 0.06DRe \quad (2.28)$$

$$L_h = 4.4D(Re^{1/6}) \quad (2.29)$$

## 2.5.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction factor)

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานถือเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการประเมินการสูญเสียพลังงานของของไหล (Head loss) และความดันลด (Pressure drop) ที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานภายในท่อ โดยการคำนวณค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวภายในของท่อ ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็นสองกรณีหลัก ได้แก่ ท่อเรียบและท่อขรุขระ

### 2.5.2.1 การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับท่อเรียบ

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อพื้นผิวเรียบ สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผนังหรือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานพานิ่งได้จากสมการที่ 2.30

$$f_D = 0.316 Re^{-0.25} \quad (2.30)$$

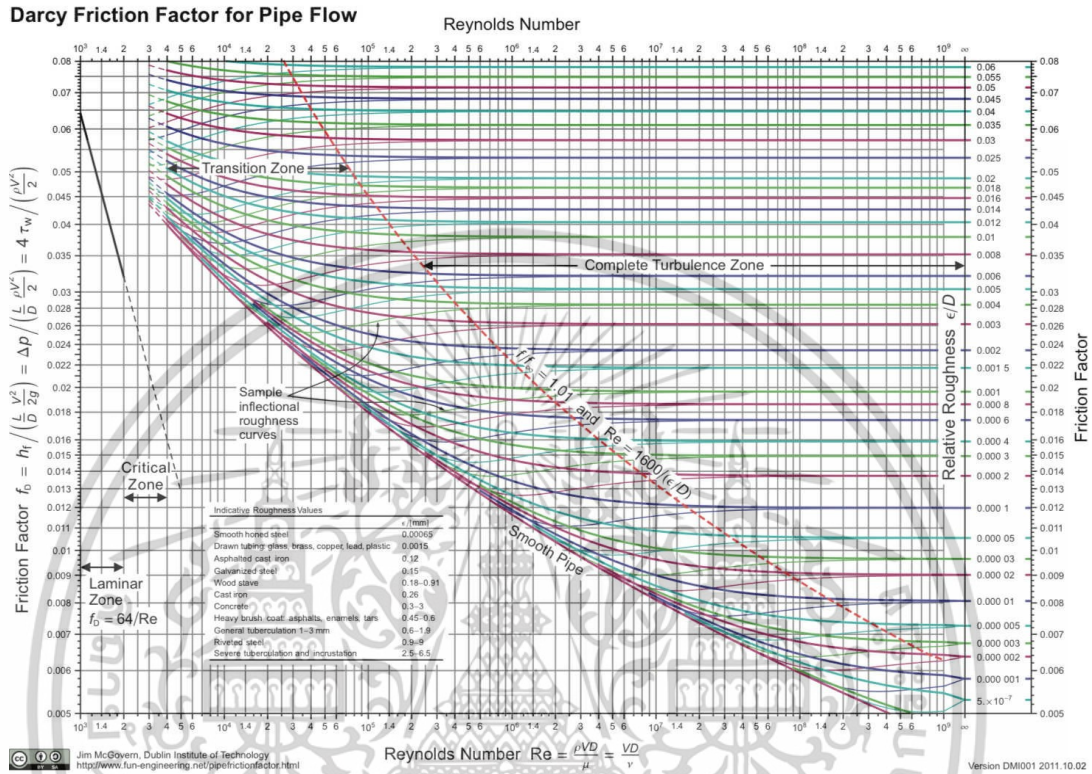
### 2.5.2.2 การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับท่อขรุขระ

โดยทั่วไป ลักษณะของความขรุขระสามารถจำแนกได้เป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ ความขรุขระแบบโมนอนโทนิค (Monotonic roughness) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่ โดยจะมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการของ Colebrook และความขรุขระแบบอินเฟกชันแนล (Inflectional roughness) ซึ่งแสดงลักษณะความสัมพันธ์ของเส้นโค้งความขรุขระตามผลการทดลองของ Nikuradse โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะลดลงในช่วงแรก จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ก่อนจะเริ่มคงที่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่เมื่อเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับความขรุขระทั้งสองรูปแบบสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.3 และคำนวณได้จากสมการที่ 2.31 [7]

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 \log_{10} \left[ \frac{\varepsilon/D}{3.7} \exp \left( -j \frac{2.83}{Re(\varepsilon/D)\sqrt{f_D}} \right) + \frac{2.51}{Re\sqrt{f_D}} \right] \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $f_D = 4f_F$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานดาร์ซี (Darcy friction factor) และ  $j$  คือ ค่าคงที่ของความขรุขระ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0 ในกรณีของความขรุขระแบบโมนโทนิคและเท่ากับ 11 ในกรณีของความขรุขระแบบอินเฟกชันแนล



รูปที่ 2.3 แผนภาพสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อที่มีความขรุขระแบบโมนโทนิคและอินเฟกชันแนล [7]

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปีคริสต์ศักราช 1933 Nikuradse [8] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความขรุขระต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและโปรไฟล์ความเร็ว โดยทำการทดลองการไหลภายในท่อที่ผิวด้านในถูกติดด้วยเม็ดทรายขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่ จากผลการศึกษาพบว่าพฤติกรรมของการไหลสามารถแบ่งออกได้เป็นสามช่วง ได้แก่ Hydraulically smooth, Transition, และ Complete turbulence zone โดยในช่วงสุดท้ายนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์อีกต่อไป แต่จะขึ้นอยู่กับความขรุขระสัมพัทธ์เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบอีกว่าโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังในกรณีผิวขรุขระจะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการกฏลอการิทึมสำหรับพื้นผิวเรียบ โดยสามารถอธิบายความเบี่ยงเบนนี้ได้ผ่านฟังก์ชันของความขรุขระ (Roughness function) ซึ่งสะท้อนถึงผลของแรงต้านที่เพิ่มขึ้นจากลักษณะของพื้นผิว ต่อมา Laufer [9] ได้ทำการศึกษาการไหลแบบปั่นป่วน

ภายในท่อทรงกระบอกทองเหลืองที่มีโปรไฟล์ความเร็วพัฒนาเต็มที่ เพื่อทำความเข้าใจถึงลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของการไหลในแต่ละบริเวณที่เกิดขึ้น โดยใช้เทคนิคการวัดความเร็วด้วยลวดร้อน (Hot-wire anemometry) ซึ่งเป็นวิธีที่ละเอียดอย่างมากในขณะนั้น จากผลการศึกษาทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างของการไหลภายในท่อออกได้เป็นสามบริเวณหลัก ได้แก่ “บริเวณการไหลใกล้ผนัง” เป็นบริเวณที่ผลของความปั่นป่วน การแพร่กระจาย และความหนืดจะมีความสำคัญเทียบเท่ากัน ถัดมา “บริเวณกลางท่อ” ในบริเวณนี้การแพร่กระจายของพลังงานจะมีบทบาทสำคัญที่สุดต่อการไหล และสุดท้าย “บริเวณระหว่างการไหลใกล้ผนังและกลางท่อ” เป็นบริเวณที่อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของความปั่นป่วนที่ตำแหน่งต่างๆ มีอิทธิพลเหนือพลังงานที่ได้รับจากการแพร่กระจาย จากนั้นในปี 1974 Wang [10] ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วนในบริเวณทางเข้าของท่อที่มีพื้นผิวขรุขระ โดยศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาของความเค้นเฉือนที่ผนังและชั้นขอบเขตของการไหล ซึ่งผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าความเค้นเฉือนที่ผนังจะเริ่มมีค่าที่เมื่อของไหลไหลผ่านระยะทางประมาณ 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ โดยในบริเวณทางเข้าค่าดังกล่าวจะสูงกว่าค่าในบริเวณที่การไหลพัฒนาเต็มที่ถึง 2.5 เท่า นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของชั้นขอบเขตของการไหลจะค่อยๆ มีความหนามากขึ้นจนใหญ่เทียบเท่ากับรัศมีของท่อ เมื่อของไหลไหลผ่านระยะทางประมาณ 30 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

หลายทศวรรษต่อมา เมื่อการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการศึกษางานวิจัยทางด้านกริดภายในท่อ ในปี 2009 Salim และ Cheah [11] ได้เสนอแนวทางการเลือกแบบจำลองความปั่นป่วนและการกำหนดขนาดของกริดให้เหมาะสมกับบริเวณใกล้ผนัง โดยใช้ค่า  $y^+$  ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติที่สะท้อนถึงความละเอียดของกริด จากผลการศึกษาพบว่าในการสร้างกริดไม่ควรวางโหนดแรกของการคำนวณไว้ในช่วงของชั้นบัฟเฟอร์ ( $5 < y^+ < 30$ ) เนื่องจากแบบจำลองความปั่นป่วนส่วนใหญ่จะให้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนสูงในบริเวณนี้ นอกจากนี้ยังพบว่า แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds stress model (RSM) จะให้ผลลัพธ์แม่นยำที่สุดเมื่อค่า  $y^+$  อยู่ในช่วงของชั้นกฎลอการิทึม ( $y^+ > 30$ ) ขณะที่แบบจำลอง Spalart-Allmaras (SA) ให้ผลดีที่สุดเมื่อค่า  $y^+$  อยู่ในช่วงของชั้นย่อยเชิงเส้น ( $y^+ < 5$ ) หลังจากนั้นไม่นาน Salim และคณะ [12] ได้ศึกษาต่อยอดแนวคิดเรื่องการไหลผ่านสิ่งกีดขวางทรงลูกบาศก์ (Wall-mounted cube) โดยทำการจำลองการไหลผ่านแบบจำลองความปั่นป่วนรูปแบบต่างๆ ร่วมกับการกำหนดขนาดกริดด้วยค่า  $y^+$  ที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน SA สามารถให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำเมื่อใช้งานในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำและกริดที่ค่า  $y^+ < 5$  ในขณะที่แบบจำลองความปั่นป่วน SKE จะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำในช่วงที่เลขเรย์โนลด์สูงและกริดในช่วงที่ค่า  $y^+ > 30$  ทั้งนี้ผลการศึกษา

ยังสามารถยืนยันงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้อีกว่า ไม่ควรวางโหนดแรกของการคำนวณในช่วงบัฟเฟอร์ เนื่องจากจะทำให้ผลลัพธ์ทางการจำลองที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนส่วนใหญ่เกิดคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างชัดเจน ต่อมา Vijiapurapu และ Cui [13] ได้ทำการจำลองการไหลภายในท่อที่ติดตั้งความขรุขระแบบซี่ (Rib roughness) ที่มีระยะห่างต่างๆ กัน เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจำลองความปั่นป่วนผ่าน RANS และ LES ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การใช้ RANS ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วนสามารถให้ผลลัพธ์ทางการจำลองที่แม่นยำ แต่จะไม่สามารถให้ข้อมูลของสนามการไหล ณ ตำแหน่งและเวลาใดๆ (Instantaneous flow field) ได้เหมือนการจำลองด้วย LES แต่ก็มีข้อดีในเรื่องของการใช้ระยะเวลาในการคำนวณที่น้อยกว่า

ต่อมาในปี 2014 Ahsan [14] ได้ทำการศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อนำตัวดวงกลมที่มีเลขเรย์โนลด์สูง และมีโปรไฟล์ความเร็วพัฒนาเต็มที่ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SKE ร่วมกับ Enhanced wall treatment ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการจำลองการไหลใกล้ผนังได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในช่วงที่มีค่า  $y^+$  ต่ำและสูง จากผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและความเค้นเฉือนที่ผนังที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีอย่างชัดเจน เฉพาะในช่วงที่เลขเรย์โนลด์มากกว่า 10,000 ซึ่งเป็นบริเวณที่การไหลเข้าสู่สภาวะปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นในปี 2021 Temsiriphan [15] ได้ศึกษาการเลือกแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมและเสนอวิธีการประมาณค่าขนาดกริดใกล้ผนังสำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ โดยพิจารณาทั้งกรณีของท่อผิวเรียบและท่อที่มีพื้นผิวขรุขระสองลักษณะ ได้แก่ แบบอินเฟกชันแนลและแบบโมนोटอนิก ซึ่งการจำลองสนามการไหลในงานวิจัยนี้จะดำเนินการผ่านวิธี RANS จากผลการศึกษาพบว่า SKE เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีความแม่นยำและเหมาะสมกับกรณีศึกษาดังกล่าว โดยสามารถใช้งานได้ดีทั้งในท่อเรียบและท่อขรุขระ อย่างไรก็ตาม วิธีการประมาณขนาดกริดใกล้ผนังที่เหมาะสมจะแตกต่างกันไปตามลักษณะของพื้นผิวท่อ นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าคงที่ของความขรุขระ (Roughness constant,  $C_s$ ) ที่เหมาะสมสำหรับการจำลองการไหลในช่วงเปลี่ยนผ่าน (Transitional regime) คือ 0.5 สำหรับท่อขรุขระแบบอินเฟกชันแนล และ 0.7 สำหรับท่อขรุขระแบบโมนोटอนิก ส่วนในกรณีของการไหลที่อยู่ในช่วงขรุขระสมบูรณ์ (Completely rough regime) ค่าคงที่ของความขรุขระที่เหมาะสมสำหรับท่อทั้งสองลักษณะเท่ากับ 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 การสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD modeling)

##### 3.1.1 การกำหนดโดเมนการคำนวณ (Definition of the computational domain)

ในการประเมินอิทธิพลของขนาดกริดใกล้เคียงสำหรับการไหลบนพื้นผิวขรุขระ งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการจำลองสนามการไหลเฉลี่ยผ่านแบบจำลองของท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D) เท่ากับ 246.8 mm โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Laufer [9] ส่วนความยาวของท่อ (L) ถูกกำหนดจากความยาวทางเข้าไฮโดรไดนามิกสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งจะเพิ่มความยาวของท่อขึ้นอีก 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน สำหรับทุกแบบจำลองของท่อพื้นผิวขรุขระ เพื่อให้มั่นใจว่าสนามการไหลที่ศึกษาอยู่มีลักษณะการไหลที่พัฒนาเต็มรูปแบบ นอกจากนี้ เพื่อประหยัดทรัพยากรในการคำนวณ การศึกษานี้จึงดำเนินการผ่านแบบจำลองของท่อสองมิติแบบสมมาตรตามแนวแกน (2D Axis symmetrical model) ที่ถูกสร้างด้วยโปรแกรม GAMBIT 2.4.6 โดยโดเมนการคำนวณของท่อและขนาดที่สภาวะในการศึกษาต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.1 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 โดเมนการคำนวณของท่อที่ใช้ศึกษา

ตารางที่ 3.1 ขนาดแบบจำลองของท่อที่สภาวะการศึกษาต่างๆ

เลขเรย์โนลด์	ความเร็วขาเข้า (m/s)	ความยาว (mm)	
		เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	ความยาวท่อ
5,000	0.2851	246.9	9429.846
50,000	2.8508	246.9	11,531.241
75,000	4.2760	246.9	11,992.205
100,000	5.7020	246.9	12,338.685
300,000	17.1050	246.9	13,825.804
500,000	28.5080	246.9	14,615.666

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การสร้างกริด (Grid generation)

ในการจำลองสนามการไหลเฉลี่ยด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ฟังก์ชันของผนังร่วมในการคำนวณนั้น การกำหนดขนาดกริดใกล้ผนังซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2y_p$  สำหรับโปรแกรมการคำนวณแบบ Cell-center based CFD ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของผลเฉลย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงกำหนดขนาดกริดใกล้ผนังของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผ่านการพิจารณาค่า  $y^+$  ที่แตกต่างกันสำหรับเลขเรย์โนลด์ต่างๆ ได้แก่  $y^+ = 10$  (ค่าที่ต่ำกว่าลิมิตล่างของการใช้งานฟังก์ชันของผนัง),  $y^+ = 11.225$  (ค่าที่เท่ากับลิมิตล่างของการใช้งานฟังก์ชันของผนัง),  $y^+ = 30$  (ค่าที่จุดเริ่มต้นของการไหลในชั้นกฏลอการิทึมสำหรับพื้นผิวเรียบ),  $y^+ = TSM$  (ค่าที่ได้จากวิธีของ Temsiriphan [15]), และ  $y^+ = k_s^+$  (ค่าที่สอดคล้องกับความสูงของความขรุขระไร้มิติ) โดยสมการที่เกี่ยวข้องสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้ [16]

$$y_p = \frac{y^+ \mu}{\rho U \sqrt{\lambda/2}} \quad (3.1)$$

$$k_s = \frac{k_s^+ \mu}{\rho U \sqrt{\lambda/2}} \quad (3.2)$$

สำหรับรูปทรงของกริดที่ใช้ในขั้นตอนนี้ กริดสี่ด้าน (Quadrilateral) จะถูกเลือกใช้ในการดำเนินงาน โดยกำหนดสัดส่วนการเติบโตของกริด (Growth ratio) ในแนวรัศมีให้อยู่ระหว่าง 1.05 ถึง 1.07 และในแนวแกนอยู่ระหว่าง 1 ถึง 1.1 โดยค่าดังกล่าวจะปรับเปลี่ยนไปตามขนาดของกริดใกล้ผนังที่คำนวณได้

### 3.2 การตั้งค่าทางกายภาพและเชิงตัวเลข (Physical and numerical setups)

การจำลองสนามการไหลแบบปั่นป่วนในงานศึกษานี้ ถูกคำนวณโดยใช้สมการความต่อเนื่องเฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds-averaged continuity equation) และสมการโมเมนตัมเฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds-averaged momentum equations) ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon เพื่อให้ได้มาซึ่งสนามการไหลเฉลี่ย โดยรายละเอียดของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 ทั้งนี้ ฟังก์ชันของผนังแบบปรับขนาดได้ (Scalable wall functions) จะถูกเลือกใช้งานแทนฟังก์ชันของผนังมาตรฐาน (Standard wall functions) ในการจำลองการไหลบริเวณใกล้ผนัง เพื่อหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นเมื่อโหนดการคำนวณของกริดใกล้ผนัง (Computing nodes of near-wall grid) มีค่า  $y^+$  ต่ำกว่า 11.225 [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

รายละเอียด	ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
Pressure-velocity coupling scheme	SIMPLE
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second order
Momentum	Second order upwind
Turbulence kinetic energy	Second order upwind
Turbulence dissipation rate	Second order upwind

ในส่วนของการควบคุมการไหล ได้รับการแก้ไขเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 12.0 โดยกำหนดคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการจำลองให้มีค่าความหนาแน่นและความหนืดเท่ากับ  $1.229 \text{ kg/m}^3$  และ  $1.73 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  ตามลำดับ อ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยของ Laufer [9] ขณะที่ประเภทของความขรุขระที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแบบอินเฟกชันแนล ซึ่งได้กำหนดความสูงของความขรุขระไว้สองค่า ได้แก่  $0.26 \text{ mm}$  และ  $1.2 \text{ mm}$  สำหรับเงื่อนไขขอบเขตการไหล (Boundary condition) กำหนดให้ความเร็วอากาศขาเข้าเป็นแบบความเร็วสม่ำเสมอ (Uniform velocity) โดยรายละเอียดของค่าความเร็วที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ส่วนบริเวณท่อทางเข้าและทางออกกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Velocity-inlet และ Pressure-outlet ตามลำดับ ผนังท่อกำหนดเป็น No-slip และแกนกลางของท่อกำหนดเป็นแบบ Axisymmetric เนื่องจากเป็นการจำลองการไหลภายในท่อสองมิติที่สมมาตรตามแนวแกน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การทำนายค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับกรณีความขรุขระ  $1.2 \text{ mm}$  จะถูกตัดแปลงข้อมูลมาจาก ไกรวิชญ์ บุญเสมอ และคณะ. (2568). *อิทธิพลของขนาดกริดใกล้ผนังสำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการไหลปั่นป่วนในท่อพื้นผิวขรุขระ*. ในการประชุมวิชาการการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ ครั้งที่ 22 (หน้า 279–283). กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. และเนื่องจากในบทความนำเสนอของการประชุมวิชาการดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น มีการรายงานผลเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ถูกทำนายได้ ดังนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์ผลในงานศึกษานี้เกิดความเท่าเทียมและสมบูรณ์ โปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ถูกทำนายได้สำหรับกรณีความขรุขระ  $1.2 \text{ mm}$  จะถูกวิเคราะห์เพิ่มเติมจากการจำลองเดียวกันกับที่ใช้ในบทความนำเสนอของการประชุมวิชาการดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ในการศึกษายังได้กำหนดสภาวะการดำเนินงานและความสูงของความขรุขระอย่างเหมาะสม เพื่อให้สามารถครอบคลุมลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนในช่วงต่าง ๆ ได้แก่ Hydrodynamically smooth regime, Transitionally rough regime, และ Completely rough regime โดยมีค่าความสูงของความขรุขระไร้มิติอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.36 ถึง 147.96 ซึ่งช่วงของค่าดังกล่าวถือว่าเป็นเพียงพอที่จะทำให้เกิดข้อสรุปสำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อพื้นผิวขรุขระอินเฟกชันแนลได้อย่างครอบคลุม อีกทั้ง ในการศึกษาการไหลในช่วงของ Completely rough regime ยังได้มีการกำหนดค่าความสูงของความขรุขระไร้มิติสูงสุดให้อยู่ที่ 147.96 เพียงจุดเดียว เพื่อให้เกิดความเหมาะสมทางด้านประสิทธิภาพของการคำนวณ กล่าวคือ แม้ว่าการใช้ค่าความสูงของความขรุขระไร้มิติที่สูงกว่านี้จะยังอยู่ในขอบเขตของ Completely rough regime ได้เช่นกัน แต่จะต้องแลกมาด้วยความละเอียดของกริดบริเวณใกล้ผนังและจำนวนกริดรวมที่สูงขึ้น ส่งผลให้ทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

### 3.3 กลยุทธ์การหาผลเฉลย

สนามการไหลและสนามความปั่นป่วนภายในท่อจะถูกคำนวณโดยวิธีการคำนวณซ้ำ (Iterative method) โดยที่กระบวนการคำนวณจะหยุดลงเมื่อค่าคงเหลือ (Residual) ของสมการต่างๆ มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในโปรแกรม ANSYS FLUENT อย่างไรก็ตาม เพื่อให้มั่นใจว่าการคำนวณซ้ำมีการลู่เข้าอย่างเหมาะสม (Iterative convergence) และผลเฉลยที่ได้เป็นอิสระต่อรอบของการคำนวณ ดังนั้น การคำนวณในงานศึกษานี้จะดำเนินต่อไปจนกระทั่งค่าคงเหลือของทุกสมการมีค่าคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

### 3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการศึกษาที่ดำเนินการผ่านวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ โดยการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง หรือค่าที่ได้จากสมการเชิงประจักษ์ต่างๆ ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวถือมีสำคัญอย่างมาก เพราะหากผลจากการจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง จะสามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่ใช้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่าชุดของแบบจำลองความปั่นป่วน ตลอดจนวิธีการเชิงตัวเลขที่เลือกมาใช้ในการคำนวณนั้น มีความเหมาะสมและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาภายใต้เงื่อนไขอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 3.4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ Luafer [9]

เพื่อเป็นการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในขั้นตอนนี้ โปรไฟล์ความเร็วที่ได้จากการจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยของ Luafer [9] โดยการเปรียบเทียบจะดำเนินการผ่านกรณีของการไหลภายในท่อเรียบ ซึ่งทำการจำลองด้วยค่า  $y^+$  เท่ากับ 30 ที่เลขเรย์โนลด์ 50,000

### 3.4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับสมการเชิงประจักษ์ของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแผ่นนิ่ง

ภายหลังจากตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองในเบื้องต้นแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการวิเคราะห์ผลการจำลองสำหรับกรณีของการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อที่มีพื้นผิวขรุขระเพื่อนำมาใช้ในการประเมินค่า  $y^+$  ที่เหมาะสมในการกำหนดขนาดกริดใกล้ผนัง โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแผ่นนิ่งที่ได้จากสมการเชิงประจักษ์ ซึ่งคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.31 เพื่อพิจารณาความแม่นยำของผลการจำลองภายใต้สภาวะต่างๆ ของเลขเรย์โนลด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

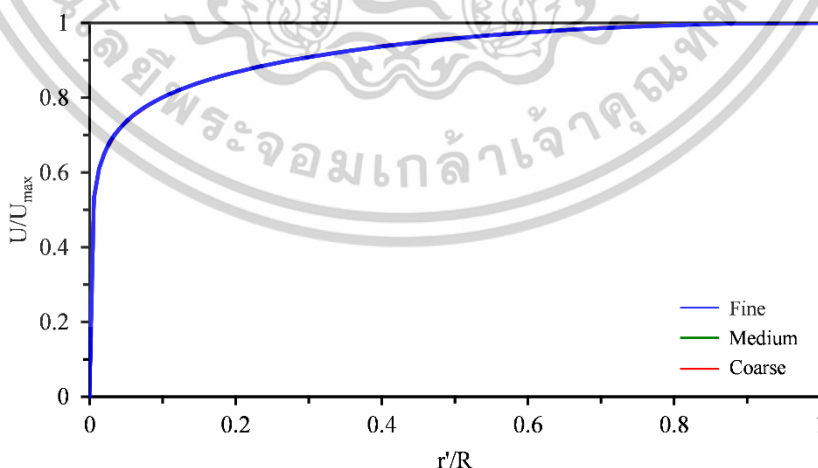
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 การศึกษาความเป็นอิสระของกริด (Grid independence study)

การศึกษาผลลัพธ์ที่ไม่ขึ้นกับความละเอียดของกริด ถือเป็นขั้นตอนแรกที่มีความสำคัญในการศึกษาทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เนื่องจากความละเอียดของกริดเป็นปัจจัยพื้นฐานที่ส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของผลเฉลยในการจำลอง อีกทั้งยังส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้น ขั้นตอนนี้จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการศึกษา เพื่อให้ผลเฉลยที่ได้จากการจำลองมีความน่าเชื่อถือสูงสุด และใช้ระยะเวลาในการคำนวณได้อย่างเหมาะสม

ในการศึกษานี้ ผลการจำลองจากกริดที่มีความละเอียดทั้ง 3 ระดับ ได้แก่ กริดความละเอียดสูง กริดความละเอียดกลาง และกริดความละเอียดต่ำ ซึ่งมีจำนวนเซลล์ 20,800 14,560 และ 10,400 เซลล์ ตามลำดับ ของแบบจำลองที่คำนวณขนาดกริดใกล้เคียงกับค่า  $y^+$  เท่ากับ 30 สำหรับการไหลภายในท่อเรียบที่เลขเรย์โนลด์ 500,000 จะถูกนำมาเปรียบเทียบผ่านโปรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized mean velocity) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อประเมินความเหมาะสมในการเลือกคุณภาพของกริดสำหรับการจำลองการไหลภายในท่อต่อไป โดยความละเอียดของกริดในแต่ละระดับที่ใช้ในการศึกษา จะถูกควบคุมค่าปัจจัยการปรับความละเอียด (Refinement Factor,  $r$ ) ให้อยู่ที่ ประมาณ 1.2 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าดังกล่าวได้ดังสมการที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โปรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยแบบนอร์มัลไลซ์ของการไหลภายในท่อเรียบสำหรับความละเอียดของกริด 3 ระดับที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

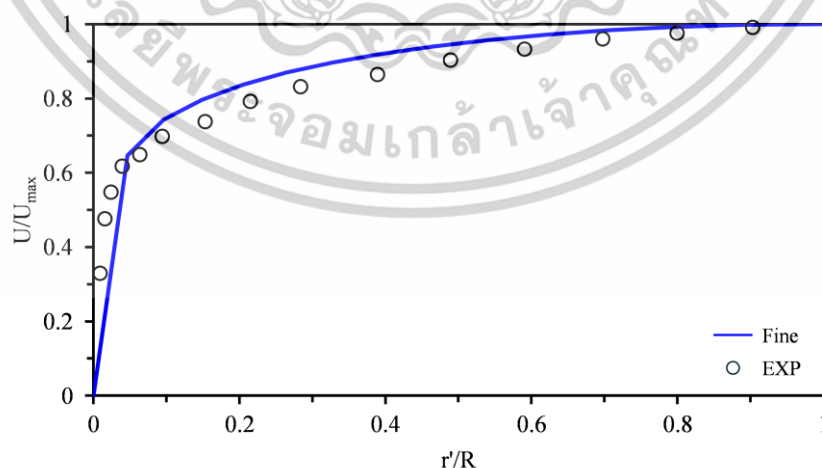
$$r = \left( \frac{N_{finer}}{N_{ref}} \right)^{1/D} \quad (4.1)$$

โดยที่  $N_{finer}$  และ  $N_{ref}$  คือ จำนวนของกริดสำหรับระดับกริดที่ละเอียดกว่าและระดับกริดอ้างอิงตามลำดับ,  $D$  คือมิติของโดเมนการจำลอง,  $U_{max}$  คือความเร็วเฉลี่ยสูงสุด, และ  $r' = R - r$  คือตำแหน่งใดๆ ตามรัศมีของท่อนับจากแกนกลาง

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าโปรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยแบบนอร์มัลไลซ์ของกริดทั้ง 3 ระดับ ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันในทุกตำแหน่งของหน้าตัดท่อ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความละเอียดของกริดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโปรไฟล์ความเร็วอย่างมีนัยสำคัญจากผลลัพธ์ดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่ากริดความละเอียดต่ำเพียงพอสำหรับการให้ผลลัพธ์ที่ไม่ขึ้นกับจำนวนกริด อย่างไรก็ตาม เพื่อกำจัดความไม่แน่นอนเชิงตัวเลข (Numerical uncertainty) ที่อาจเกิดขึ้น คุณภาพของกริดความละเอียดสูงที่ได้กล่าวถึงในส่วนก่อนหน้า จะถูกนำมาใช้ในการสร้างกริดสี่ด้านสำหรับการจำลองการไหลภายในท่อทั้งหมด ซึ่งหมายความว่าขนาดกริดและจำนวนเซลล์รวมของแบบจำลอง อาจแตกต่างกันไปตามสภาวะการศึกษาที่ใช้ในการจำลอง

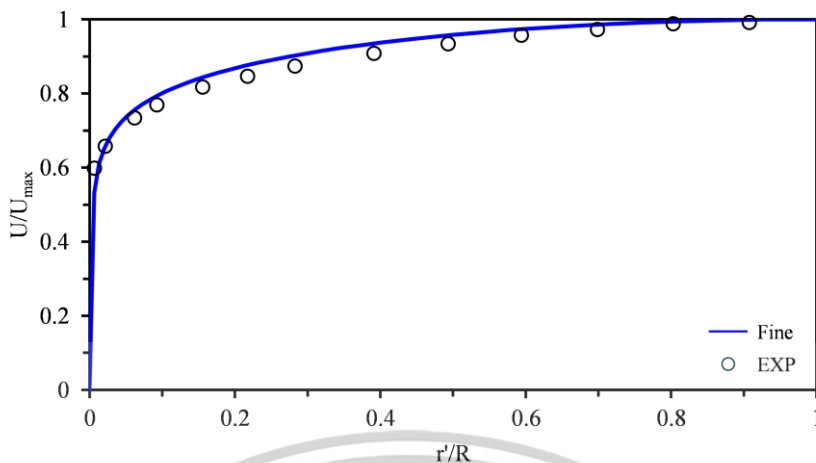
#### 4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation of the model)

หลังจากได้ความละเอียดของกริดที่เหมาะสมแล้ว ในขั้นตอนนี้ ผลการจำลองของกริดความละเอียดสูงที่ได้จากการไหลภายในท่อเรียบ ซึ่งคำนวณขนาดกริดใกล้เคียงกับค่า  $y^+$  เท่ากับ 30 สำหรับเลขเรย์โนลด์ 50,000 และ 500,000 จะถูกนำมาใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Laufer [9] ผ่านโปรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยแบบนอร์มัลไลซ์



รูปที่ 4.2 โปรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยแบบนอร์มัลไลซ์ของการไหลภายในท่อเรียบสำหรับเลขเรย์โนลด์ที่ 50,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 โพรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยแบบนอร์มัลไลซ์ของการไหลภายในท่อเรียบสำหรับเลขเรย์โนลด์ที่ 500,000

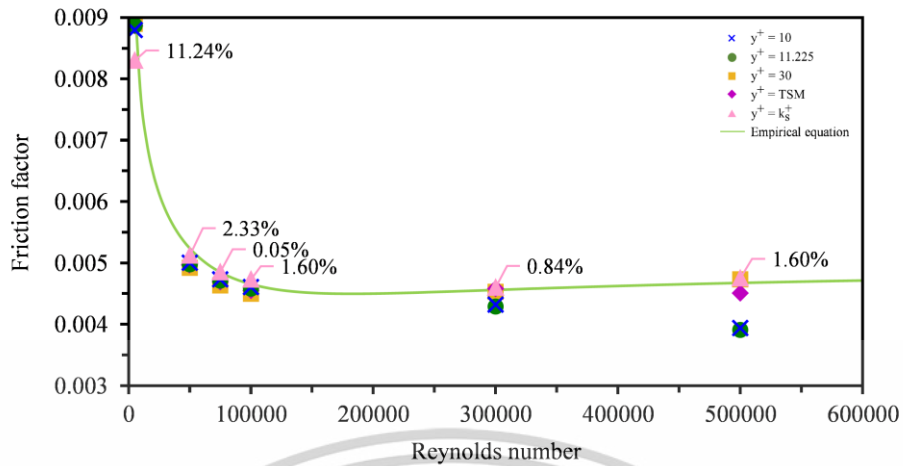
จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงให้เห็นว่าผลการจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองเป็นอย่างดี โดยเฉพาะในกรณีของเลขเรย์โนลด์ 500,000 ที่พบความแตกต่างเพียงเล็กน้อยระหว่างผลการจำลองกับข้อมูลการทดลอง อันเนื่องมาจากแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการแก้สมการควบคุมการไหลเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนั้น ได้รับการพัฒนาขึ้นภายใต้สมมติฐานหลายประการ ซึ่งส่งผลให้สามารถจำลองพฤติกรรมของการไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์สูงได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีของเลขเรย์โนลด์ 50,000 แม้ว่าผลการจำลองที่ได้จะมีลักษณะที่สูงเกินจริง (Overprediction) แต่โดยภาพรวมแล้ว ผลลัพธ์ยังคงแสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองได้เป็นอย่างดี ดังนั้น ความสอดคล้องระหว่างผลการจำลองและข้อมูลการทดลองที่ได้ จึงถือว่าเป็นไปตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในระดับที่ดีที่สุด ด้วยเหตุนี้เอง จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีความเหมาะสมสำหรับการทำนายพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ

#### 4.3 การวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการจำลอง (Analysis of simulation results)

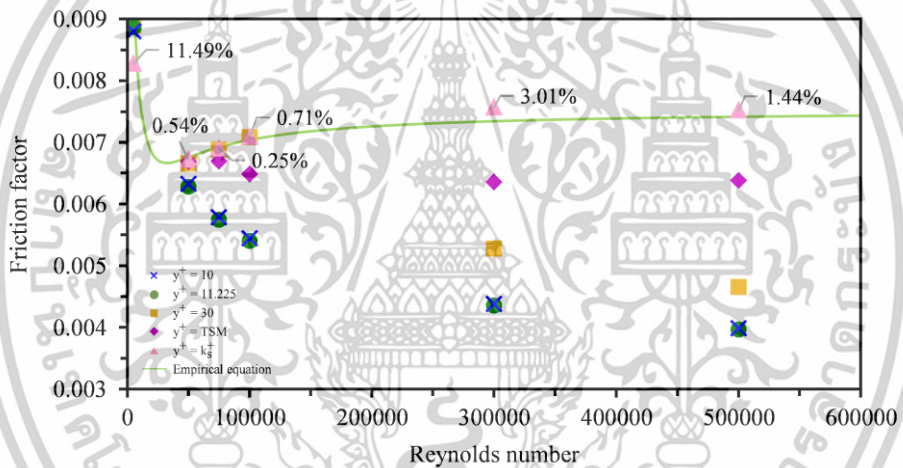
##### 4.3.1 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานแฟนนิง (Fanning friction factor)

ในการประเมินหาค่า  $y^+$  ที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดขนาดกริดใกล้ผนังในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนบนพื้นผิวขรุขระ จะทำการวิเคราะห์ผ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการบ่งชี้ถึงการสูญเสียพลังงานของของไหล และความดันตกที่เกิดขึ้นในระบบจากแรงเสียดทานภายในท่อ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแฟนนิงที่คำนวณได้จากการจำลอง จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าจากสมการเชิงประจักษ์ที่ได้จากสมการที่ 2.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผนังที่เลขเรย์โนลด์และระยะทางจากผนังรั่วมิติต่างๆ สำหรับท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.00026 m



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผนังที่เลขเรย์โนลด์และระยะทางจากผนังรั่วมิติต่างๆ สำหรับท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.0012 m

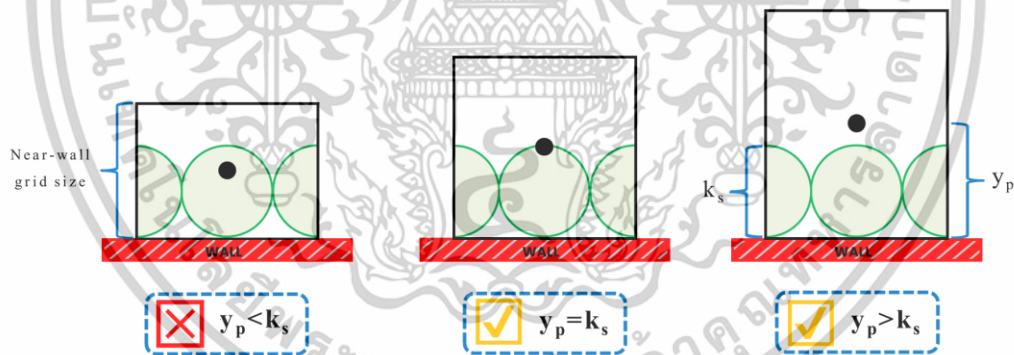
จากการเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4.4 สำหรับกรณีที่มีความสูงของความขรุขระเท่ากับ 0.00026 m จะเห็นได้ว่า ขนาดกริดใกล้เคียงกันที่คำนวณจากค่า  $y^+$  รูปแบบต่างๆ โดยเฉพาะในกรณีของค่า  $y^+ = k_s^+$  สามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผนังที่มีความสอดคล้องกับค่าจากสมการเชิงประจักษ์ได้เป็นอย่างดีในทุกช่วงของเลขเรย์โนลด์ ยกเว้นในกรณีของค่า  $y^+ = 10$ ,  $y^+ = 11.225$ , และ  $y^+ = TSM$  สำหรับเลขเรย์โนลด์ 300,000 และ 500,000 ซึ่งจะเริ่มแสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ทางการจำลองที่มีความคลาดสูงกว่ากรณีอื่นๆ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมในกรณีที่มีความสูงของความขรุขระเท่ากับ 0.0012 m ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า ขนาดกริดใกล้เคียงกันที่คำนวณจากค่า  $y^+ = k_s^+$  ยังคงสามารถให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับค่าจากสมการเชิงประจักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ดีที่สุดในทุกช่วงของเลขเรย์โนลด์ ขณะที่ค่า  $y^+ = 30$  และ  $y^+ = TSM$  ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ เฉพาะในช่วงที่เลขเรย์โนลด์ไม่เกิน 100,000 และ 50,000 ตามลำดับ ส่วนค่า  $y^+ = 10$  และ  $y^+ = 11.225$  จะแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่ากรณีอื่นๆ อย่างชัดเจน และไม่สามารถให้ผลลัพธ์ทางการจำลองที่แม่นยำได้ในทุกช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่ศึกษา

แม้ว่าผลการจำลองของกริดใกล้ผนังที่คำนวณจากค่า  $y^+ = k_s^+$  จะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่สุดในทุกภาพรวม แต่เมื่อพิจารณาที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 5,000 จะพบว่า ขนาดกริดใกล้ผนังจากทุกค่าที่ใช้ในการศึกษา จะให้ผลการจำลองที่คลาดเคลื่อนสูงกว่ากรณีของเลขเรย์โนลด์อื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการเชิงประจักษ์ ซึ่งเป็นผลมาจากข้อจำกัดของแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ที่ถูกพัฒนาให้เหมาะสมสำหรับใช้ทำนายการไหลในช่วงที่มีค่าเลขเรย์โนลด์สูง (High Reynolds number flow) หรือก็คือช่วงที่เลขเรย์โนลด์สูงกว่า 10,000 สำหรับการไหลแบบมีผนังล้อมรอบ ซึ่งทำให้ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมกริดได้อย่างแม่นยำในช่วงของเลขเรย์โนลด์ดังกล่าว

ดังนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นถึงสาเหตุหลักที่ทำให้ผลการจำลองมีลักษณะเป็นไปตามที่อธิบายไว้ข้างต้น จึงสามารถสรุปผลการจำลองผ่านแผนภาพขนาดกริดใกล้ผนังดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพขนาดกริดใกล้ผนังที่ใช้ในการจำลอง

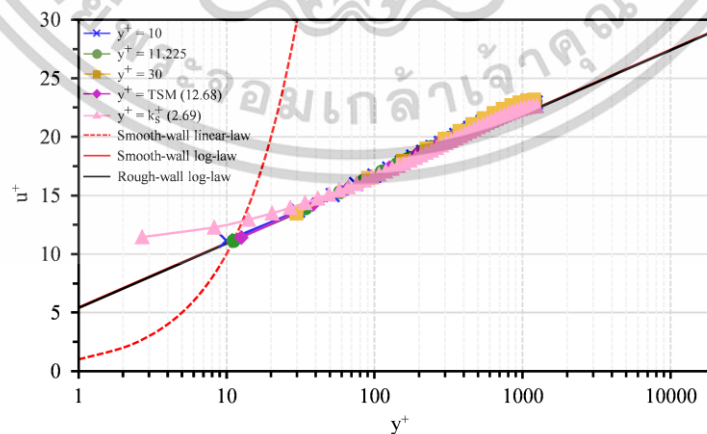
โดยจะเริ่มพิจารณาจากภาพตรงกลางของรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นกรณีที่ตั้งตำแหน่งโหนดการคำนวณของกริดใกล้ผนังหรือระยะ  $y_p$  ถูกคำนวณจากค่า  $y^+ = k_s^+$  จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าวิธีการคำนวณดังกล่าวจะทำให้ตำแหน่งของโหนดการคำนวณที่ได้ มีระยะที่พอดีกับยอดความสูงของความขรุขระ โดยจะเป็นกรณีเดียวเท่านั้นที่ตำแหน่งของโหนดไม่แปรผันตามค่าเลขเรย์โนลด์ ซึ่งทำให้ผลการจำลองที่ได้มีความแม่นยำสูงที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการคำนวณอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับภาพทางด้านขวา ซึ่งเป็นกรณีที่ตั้งตำแหน่งโหนดการคำนวณของกริดใกล้ผนัง อยู่สูงกว่าค่าความสูงของความขรุขระเนื่องจากอิทธิพลของค่า  $y^+$  และเลขเรย์โนลด์ที่ใช้ในการศึกษา ในกรณีนี้แม้ว่าผลการจำลองที่ได้จะไม่แม่นยำเท่ากับกรณีของค่า  $y^+ = k_s^+$  แต่ผลลัพธ์ที่ได้ ยังคงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมีความถูกต้องในระดับที่ดี ในทางกลับกัน เมื่อพิจารณาจากภาพทางด้านซ้าย จะเห็นได้ว่าในเป็นกรณีที่ตำแหน่งโหนดการคำนวณอยู่ต่ำกว่าค่าความสูงของความขรุขระ จะส่งผลให้การจำลองไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมการไหลจริงที่เกิดขึ้น เนื่องจากโปรแกรมการคำนวณจะทำการลดผลกระทบของความขรุขระลง เพื่อให้สามารถเกิดการไหลขึ้นได้จริงในระบบ ซึ่งหากโหนดการคำนวณยิ่งอยู่ลึกลงไปจากค่าความสูงของความขรุขระมากเท่าใด ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นก็จะยิ่งเพิ่มขึ้นมากเท่านั้น

#### 4.3.2 โปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนัง (Near-wall velocity profile)

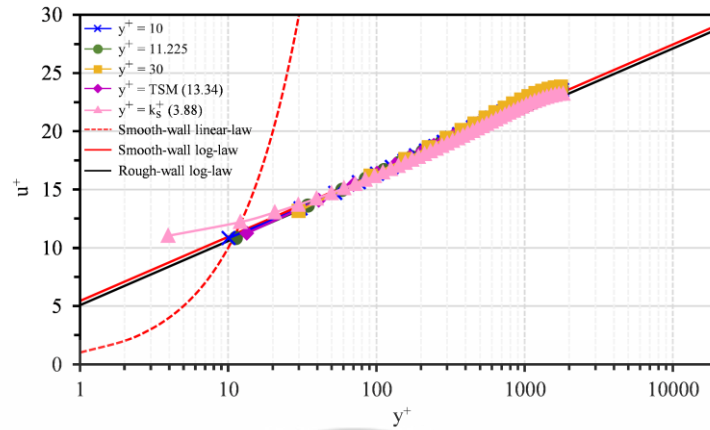
แม้ว่าผลการจำลองที่วิเคราะห์ในหัวข้อก่อนหน้านี้จะชี้ให้เห็นว่า ค่าขนาดกริดใกล้ผนังที่คำนวณจากกรณีของ  $y^+ = k_s^+$  จะสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผนังที่มีความแม่นยำ และสอดคล้องกับค่าจากสมการเชิงประจักษ์ได้เป็นอย่างดีในทุกช่วงของเลขเรย์โนลด์ แต่อย่างไรก็ตาม การประเมินความถูกต้องของการจำลองยังจำเป็นต้องพิจารณาสนามการไหลเพิ่มเติม โดยเฉพาะในบริเวณใกล้ผนังซึ่งใช้ฟังก์ชันของผนังในการคำนวณค่าการไหลและเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการประมาณค่าคำตอบของสนามการไหลในบริเวณอื่นๆ ของโดเมน ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงได้ดำเนินการวิเคราะห์ค่าความเร็วไร้มิติหรือว่า  $u^+$  ของกริดใกล้ผนัง ผ่านโปรไฟล์ความเร็วที่คำนวณได้จากการจำลอง เปรียบเทียบกับค่าจากสมการกฎลอการิทึมสำหรับการไหลบนพื้นผิวขรุขระที่ได้จากสมการที่ 2.23



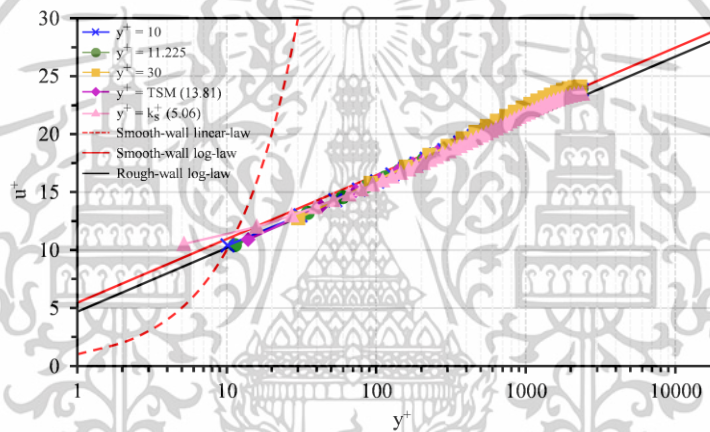
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไร้มิติต่างๆ

สำหรับเลขเรย์โนลด์ 50,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.00026 m

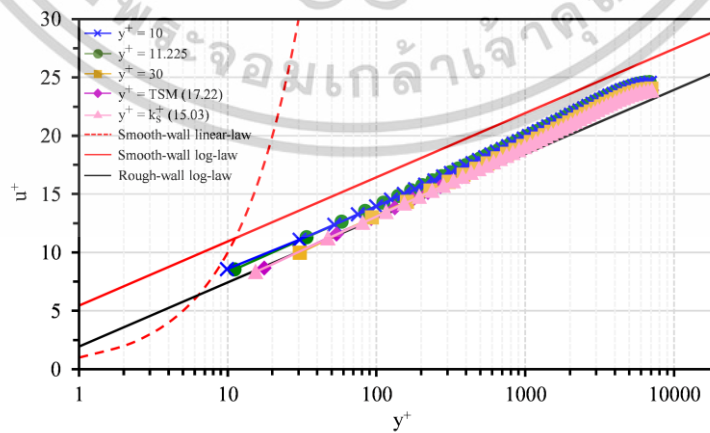
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไรมิติต่างๆ สำหรับเลขเรย์โนลด์ 75,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.00026 m



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไรมิติต่างๆ สำหรับเลขเรย์โนลด์ 100,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.00026 m

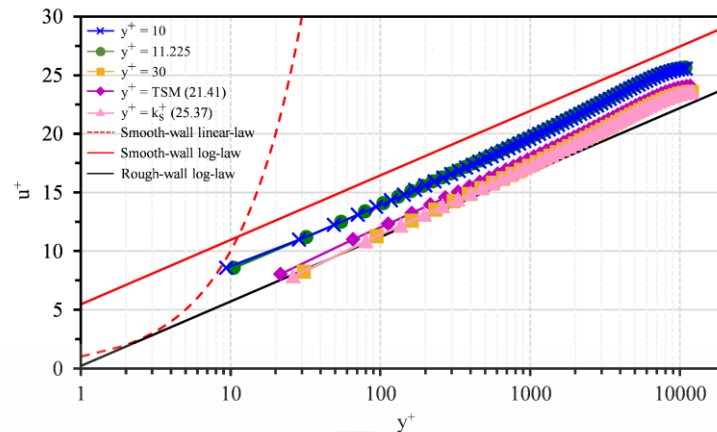


รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไรมิติต่างๆ

สำหรับเลขเรย์โนลด์ 300,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.00026 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

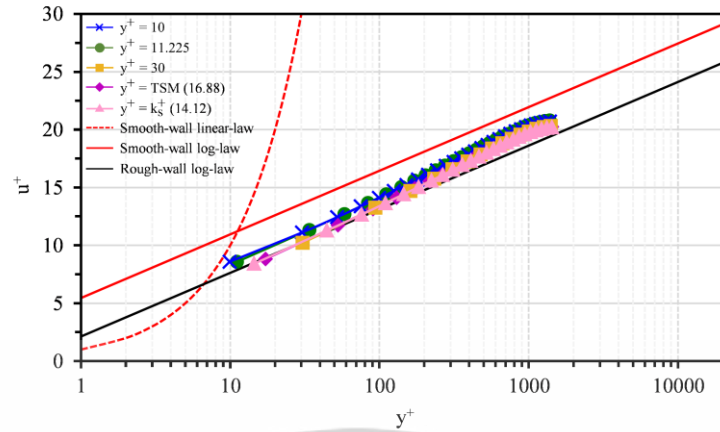


รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไร้มิติต่างๆ สำหรับเลขเรย์โนลด์ 500,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.00026 m

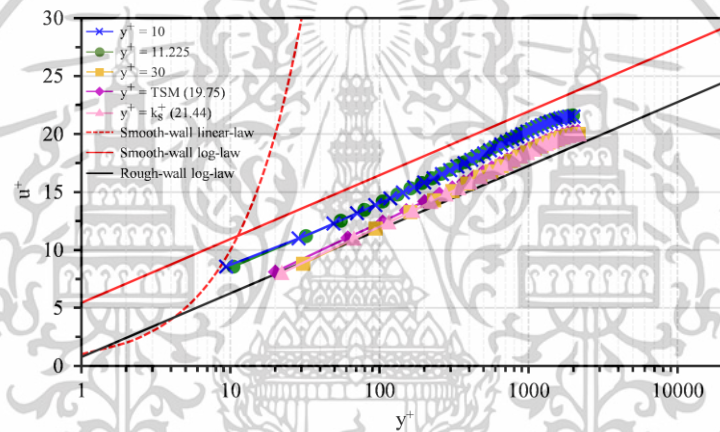
จากการเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังของการไหลภายในท่อที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.11 สำหรับกรณีที่มีความสูงของความขรุขระเท่ากับ 0.00026 m และในรูปที่ 4.12 ถึง 4.16 สำหรับกรณีที่มีความสูงของความขรุขระเท่ากับ 0.0012 m พบว่า ขนาดกริดใกล้ผนังที่คำนวณจากค่า  $y^+ = k_s^+$  สามารถแสดงค่า  $u^+$  ของกริดใกล้ผนังที่สอดคล้องกับค่าจากสมการกฎลอการิทึมได้เป็นอย่างดีในทุกช่วงของเลขเรย์โนลด์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการคำนวณค่าความเค้นเฉือนที่ผนังและความเร็วที่ได้จากโหนดการคำนวณแรกผ่านการใช้ฟังก์ชันของผนัง

แม้ว่าในกรณีของเลขเรย์โนลด์ 50,000, 75,000, และ 100,000 สำหรับความสูงของความขรุขระ 0.00026 m ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 จะพบว่า ค่า  $u^+$  ที่ได้จากกริดใกล้ผนังไม่สอดคล้องกับค่าจากสมการกฎลอการิทึม เนื่องจากในกรณีดังกล่าวมีค่า  $y^+$  ต่ำกว่า 11.225 ซึ่งเป็นลิมิตล่างของการใช้งานฟังก์ชันของผนัง อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำโดยรวมของการจำลอง โดยจะสังเกตได้จากค่า  $u^+$  ของกริดที่อยู่ถัดจากบริเวณใกล้ผนัง ที่แม้จะมีค่า  $y^+$  เริ่มต้นต่ำกว่า 11.225 แต่สนามการไหลที่คำนวณได้ยังคงมีแนวโน้มเข้าสู่โปรไฟล์การไหลตามสมการกฎลอการิทึมอย่างต่อเนื่อง หรือก็คือในช่วงที่มีค่า  $y^+$  ต่ำกว่า 300 ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้กริดใกล้ผนังที่คำนวณมาจากกรณีของค่า  $y^+ = k_s^+$  ร่วมกับการใช้ฟังก์ชันของผนังแบบปรับขนาดได้ที่ช่วยปรับแก้ค่า  $y^+$  ในการคำนวณผ่านฟังก์ชันของผนังให้มีค่าเท่ากับ 11.225 โดยอัตโนมัติ เมื่อค่าดังกล่าวอยู่ต่ำกว่าลิมิตล่างของการใช้งาน ส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนที่ผนังและความเร็วที่ได้จากโหนดการคำนวณแรกยังคงมีความน่าเชื่อถือและสอดคล้องกับพฤติกรรมกริดการไหลจริงได้อย่างเหมาะสม

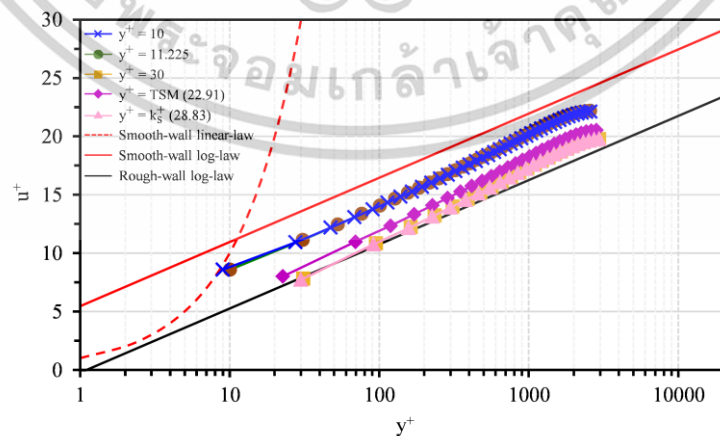
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไร้มิติต่างๆ สำหรับเลขเรย์โนลด์ 50,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.0012 m

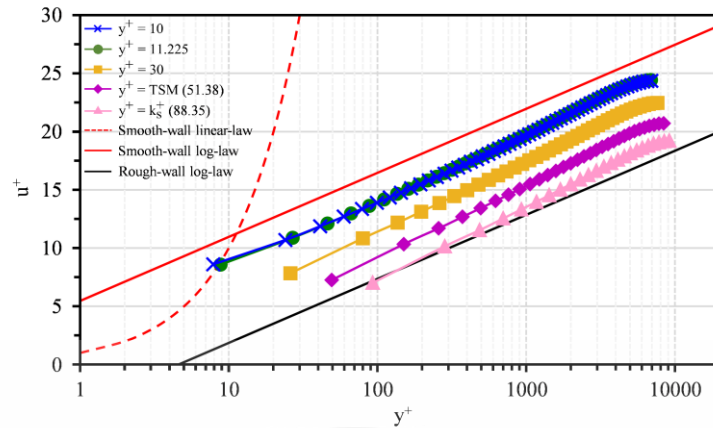


รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไร้มิติต่างๆ สำหรับเลขเรย์โนลด์ 75,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.0012 m

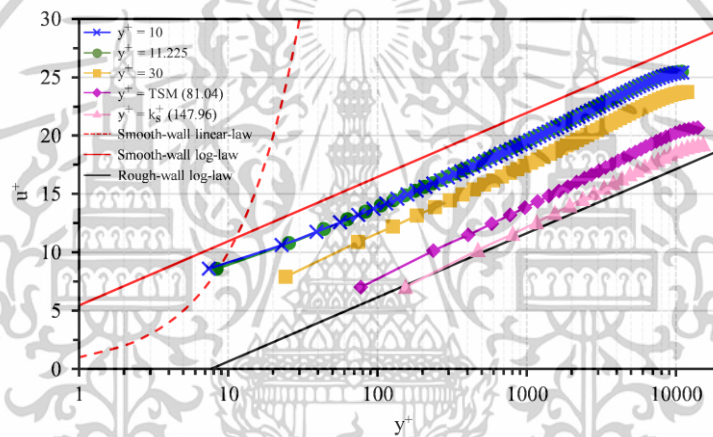


รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังไร้มิติต่างๆ สำหรับเลขเรย์โนลด์ 100,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.0012 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังรัศมีมิติต่างๆ สำหรับเลขเรย์โนลด์ 300,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.0012 m



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วใกล้ผนังที่ระยะทางจากผนังรัศมีมิติต่างๆ สำหรับเลขเรย์โนลด์ 500,000 ภายในท่อที่มีความสูงของความขรุขระ 0.0012 m

เมื่อพิจารณาขนาดกริดใกล้ผนังที่คำนวณจากค่า  $y^+$  รูปแบบต่างๆ นอกเหนือจากกรณีของ  $y^+ = k_s^+$  สำหรับความสูงของความขรุขระเท่ากับ 0.00026 m จะพบว่า แม้ค่า  $y^+$  ส่วนใหญ่จะสามารถให้ค่า  $u^+$  ของกริดใกล้ผนังที่สอดคล้องกับค่าจากสมการกฎลอการิทึมได้เป็นอย่างดีในช่วงต้นของเลขเรย์โนลด์ที่ศึกษา แต่เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นถึง 300,000 และ 500,000 ผลการจำลองจะเริ่มแสดงความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนในกรณีของค่า  $y^+ = 10$ ,  $y^+ = 11.225$ , และ  $y^+ = TSM$  นอกจากนี้ สำหรับกรณีของความสูงของความขรุขระเท่ากับ 0.0012 m จะพบว่าค่า  $y^+ = 30$  และ  $y^+ = TSM$  สามารถให้ผลลัพธ์ของค่า  $u^+$  ที่แม่นยำเฉพาะในช่วงที่เลขเรย์โนลด์ไม่เกิน 100,000 และ 50,000 ตามลำดับ ขณะที่ค่า  $y^+ = 10$  และ  $y^+ = 11.225$  ยังคงแสดงความคลาดเคลื่อนอย่างชัดเจนในทุกช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแนวโน้มของผลการวิเคราะห์ข้างต้น แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันกับการวิเคราะห์ในหัวข้อก่อนหน้านี้ที่ทำการประเมินผ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายพเนียง โดยจะชี้ให้เห็นว่า ค่าความแม่นยำของผลการจำลองจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อโหมดการคำนวณของกริดใกล้เคียงมีระยะที่ต่ำกว่าหรือไม่ครอบคลุมความสูงของความขรุขระอย่างเหมาะสม ทั้งนี้ เป็นผลมาจากข้อจำกัดของการคำนวณผ่านฟังก์ชันของผนังภายในโปรแกรมการจำลอง ซึ่งจะทำให้อิทธิพลของความขรุขระมีค่าลดลงตามตำแหน่งที่โหมดสามารถรับรู้ได้จริง แม้ว่าค่าความสูงของความขรุขระที่กำหนดไว้จะมีมากกว่าก็ตาม

ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมาจึงสามารถบอกได้ว่าวิธีการกำหนดขนาดกริดใกล้เคียงผ่านการใช้ค่า  $y^+ = k_s^+$  เป็นแนวทางที่เหมาะสมและให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่สุดสำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อที่มีพื้นผิวขรุขระแบบอินเฟกชันแนล



## บทที่ 5

# สรุปและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานศึกษานี้ ได้ดำเนินการจำลองการไหลของอากาศภายในท่อสองมิติแบบสมมาตรตามแนวแกนด้วยวิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อประเมินค่า  $y^+$  ที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดขนาดกริดใกล้ผนังในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนบนพื้นผิวขรุขระแบบอินเฟกชันแนล โดยทำการเปรียบเทียบผลการจำลองจากการเลือกใช้ค่า  $y^+$  ที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ ภายใต้สภาวะของเลขเรย์โนลด์ต่างๆ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การกำหนดขนาดของกริดใกล้ผนังโดยให้ตำแหน่งของโหนดการคำนวณสอดคล้องกับระดับความสูงของความขรุขระ จะส่งผลให้การคำนวณสนามความเร็วเฉื่อยและคุณสมบัติการไหลต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นของการคำนวณผ่านสมการควบคุมการไหลและฟังก์ชันผนังที่ถูกฝังในกริด มีความถูกต้องและแม่นยำสูงที่สุดในทางตรงกันข้าม หากตำแหน่งของโหนดอยู่ห่างจากระดับความสูงของความขรุขระมากเกินไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับกรณีที่อยู่ต่ำกว่าความสูงของความขรุขระที่ใช้ในการศึกษา จะทำให้ผลลัพธ์จากการจำลองเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ได้จากสมการเชิงประจักษ์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากโปรแกรมจะทำการลดอิทธิพลของความขรุขระลงตามระดับของโหนดการคำนวณที่ตรวจจับได้จริง

จากการวิเคราะห์ดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า การกำหนดขนาดกริดใกล้ผนังจากค่าความสูงของความขรุขระโดยตรงหรือกรณีของค่า  $y^+ = k_+^*$  เป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจำลองการไหลภายในท่อที่มีพื้นผิวขรุขระแบบอินเฟกชันแนล ซึ่งสามารถให้ผลการจำลองที่มีความแม่นยำสูงที่สุดในทุกช่วงของเลขเรย์โนลด์ ทั้งในแง่ของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแป้นนิ่งและโปรไฟล์ความเร็วในบริเวณใกล้ผนัง อีกทั้งยังสะท้อนถึงความสอดคล้องของผลลัพธ์กับสมการเชิงประจักษ์ และสามารถอธิบายพฤติกรรมของการไหลบนพื้นผิวขรุขระได้อย่างถูกต้องและน่าเชื่อถือ ขณะที่กรณีของค่า  $y^+$  อื่นๆ จะแสดงผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนออกไปจากสมการเชิงประจักษ์ในบางช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่ศึกษา จึงไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นแนวทางในการกำหนดขนาดกริดใกล้ผนังสำหรับกรณีการไหลบนพื้นผิวที่มีความขรุขระ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การประยุกต์ใช้วิธีการกำหนดขนาดกริดใกล้เคียงที่นำเสนอกับงานศึกษาอื่นๆ ควรดำเนินการร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีการใช้งานฟังก์ชันของผนังเท่านั้น เนื่องจากวิธีการดังกล่าว ได้รับการออกแบบมาให้เหมาะสมกับการคำนวณผ่านกลไกของฟังก์ชันของผนังโดยเฉพาะ
2. เพื่อให้วิธีการกำหนดขนาดกริดใกล้เคียงที่นำเสนอสามารถรักษาประสิทธิภาพในการจำลองไว้ได้อย่างเหมาะสมในช่วงที่เลขเรย์โนลด์มีค่าต่ำ ( $Re < 10000$ ) ควรเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่สามารถจำลองโครงสร้างของการไหลได้อย่างละเอียดอย่างแบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds Stress Model (RSM) ซึ่งมีความเหมาะสมมากกว่า
3. เพื่อให้วิธีการกำหนดขนาดกริดใกล้เคียงที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้ได้กับลักษณะของความขรุขระแบบโมนोटอนิก ซึ่งเป็นรูปแบบของความขรุขระที่พบได้จริงในวัสดุทางวิศวกรรม แนะนำให้มีการศึกษาการปรับค่าคงที่ความขรุขระ (Roughness Constant,  $C_s$ ) ในโปรแกรมการจำลองเพิ่มเติม เนื่องจากค่าดังกล่าวจะช่วยในการปรับอิทธิพลของความขรุขระในการจำลองให้สามารถสอดคล้องกับลักษณะของพื้นผิวที่หลากหลายได้มากยิ่งขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] ANSYS Inc., ANSYS FLUENT Theory Guide, Release 14.0. Canonsburg: PA: ANSYS Inc., Nov. 2011.
- [2] E. Bumrunghaichaichan, “Computational fluid dynamics simulations of pump-around jet mixing tanks,” Ph.D. dissertation, Dept. Chem. Eng., King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2019.
- [3] จารุวัตร เจริญสุข, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการประยุกต์ในงานวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2563.
- [4] Yunus A. Çengel and John M. Cimbala, FLUID MECHANICS FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, 1st ed. New York: NY: McGraw-Hill, 2006.
- [5] T. Cebeci and P. Bradshaw, Momentum Transfer in Boundary Layers. Washington: Hemisphere Publishing Corp., 1977.
- [6] P. Tongpun, E. Bumrunghaichaichan, and S. Wattananusorn, “Investigation of entrance length in circular and noncircular conduits by computational fluid dynamics simulation,” Songklanakarin J. Sci. Technol., vol. 36, no. 4, pp. 471–475, Jul.–Aug. 2014.
- [7] J. McGovern, “Technical note: Friction factor diagrams for pipe flow,” Technological University Dublin, Oct. 3, 2011. [Online]. Available: <https://arrow.tudublin.ie/engschmecart/28>
- [8] J. Nikuradse, “Laws of flow in rough pipes,” NACA Tech. Memo. 1292, Nov. 1950. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930093957>
- [9] J. Laufer, The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow, NACA Report 1174, National Advisory Committee for Aeronautics, 1954.
- [10] J.-S. Wang and J. P. Tullis, “Turbulent flow in the entry region of a rough pipe,” J. Fluids Eng., vol. 96, no. 1, pp. 62–68, Mar. 1974.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] S. M. Salim and S. C. Cheah, “Wall  $y^+$  strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows,” in Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS), vol. 2, Hong Kong, pp. 2165–2170, Mar. 2009.
- [12] S. M. Salim, M. Ariff, and S. C. Cheah, “Wall  $y^+$  approach for dealing with turbulent flows over a wall mounted cube,” Progress in Computational Fluid Dynamics., vol. 10, no. 5/6, pp. 341–351, 2010.
- [13] S. Vijiapurapu and J. Cui, “Performance of turbulence models for flows through rough pipes,” Appl. Math. Model., vol. 34, no. 5, pp. 1458–1466, 2010.
- [14] M. Ahsan, “Numerical analysis of friction factor for a fully developed turbulent flow using  $k-\epsilon$  turbulence model with enhanced wall treatment,” Beni-Suef Univ. J. Basic Appl. Sci., vol. 3, no. 3, pp. 269–277, 2014.
- [15] B. Temsiriphan, “Near-wall grid size estimation for computational fluid dynamics simulation of turbulent flow in straight rough pipe,” M.Eng. thesis, Dept. Chem. Eng., King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2021.
- [16] E. Bumrunthaichaichan, “How can the appropriate near-wall grid size for gas cyclone CFD simulation be estimated?” Powder Technol., vol. 396, pp. 327–344, 2022.
- [17] E. Bumrunthaichaichan, “A note of caution on numerical scheme selection: Evidence from cyclone separator CFD simulations with appropriate near-wall grid sizes,” Powder Technol., vol. 427, Art. no. 118713, 2023.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายไกรวิชญ์ บุญเสมอ
วัน เดือน ปีเกิด	1 มีนาคม 2544 ที่ชลบุรี
ที่อยู่	155/2 หมู่ 2 ซอยตะเคียนเตี้ย 20 ตำบลตะเคียนเตี้ย อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี 20150 โทร.083-130-2629
ประวัติการศึกษา	2562 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบางละมุง 2566 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี (เกียรตินิยม อันดับ 2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2565	นักศึกษาฝึกงาน บริษัท Nippon Paint (Thailand) ตำแหน่ง Laboratory support จังหวัดชลบุรี เป็นระยะเวลา 2 เดือน
พ.ศ.2568	การประชุมวิชาการการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ ประจำปี พ.ศ. 2568 (OR-NET 2025)” เรื่อง อิทธิพลของขนาดกริดใกล้ผนังสำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการไหลปั่นป่วนในท่อพื้นผิวขรุขระ จัดโดยสมาคมการสร้างแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์แห่งประเทศไทย ณ ศูนย์การค้าไอคอนสยาม กรุงเทพฯ วันที่ 26 – 28 มีนาคม 2658

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้