

ความยาวเชิงคุณลักษณะสำหรับท่อที่ไม่ใช่ทรงกลม



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

ความยาวเชิงคุณลักษณะสำหรับท่อที่ไม่ใช่ทรงกลม



ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHARACTERISTIC LENGTH FOR NON-CIRCULAR DUCTS



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง ความยาวเชิงคุณลักษณะสำหรับท่อที่ไม่ใช่ทรงกลม
โดย นายสมิทธิ ภัทรประสิทธิ์ผล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)


..... กรรมการ

(ผศ.ดร.ญานีพร พ็ชรวรโชติ)


..... กรรมการ

(ดร.อมตะ อนันต์พิณีวัฒนา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง ความยาวเชิงคุณลักษณะสำหรับท่อที่ไม่ใช่ทรงกลม
โดย นายสมิทธิ์ ภัทรประสิทธิ์ผล เลขประจำตัว 57011307
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าความยาวเชิงคุณลักษณะด้วยเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics) โดยศึกษาผลของค่าความยาวเชิงคุณลักษณะ (Characteristic length) และผลของรูปร่างหน้าตัดของท่อ โดยรูปร่างหน้าตัดของท่อที่ทำการศึกษาได้แก่ หน้าตัดวงกลม หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า และหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า และค่าความยาวเชิงคุณลักษณะที่ศึกษาคือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) รากที่สองของพื้นที่ (\sqrt{A}) และค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกที่ได้จากพื้นที่ที่เท่ากันของท่อ (A_{eq}) การศึกษานี้ได้ทำการจำลองการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนในท่อทรงกระบอก พบว่าผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกันกับผลจากทฤษฎีเป็นอย่างดี จึงได้ทำการจำลองการไหลผ่านท่อหน้าตัดวงกลม หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า และหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าพบว่าการใช้งานเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเทียบกับผลการคำนวณการจัดกระจายมากกว่าการใช้ค่ารากที่สองของพื้นที่เป็นค่าความยาวเชิงคุณลักษณะ ค่ารากที่สองของพื้นที่จึงเหมาะที่จะเป็นค่าความยาวเชิงคุณลักษณะที่ใช้กับท่อที่ไม่ใช่หน้าตัดวงกลมซึ่งสามารถกำจัดความผิดพลาดในการประมาณค่าความดันลดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Characteristic Lengths for Non-Circular Ducts
By	Mr. Smith Pataraprasitpon number 57011307
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2017
Advisor	Asst. Prof. Dr. Santi Wattananusorn

ABSTRACT

The purpose of this project is to study characteristic length using Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. The project utilizes a CFD code of different cross-sectional flow area. The different cross sections in this study consist of circular pipe, square pipe, rectangular pipe, and triangular pipe. There are three types of characteristic length, Hydraulic diameter (D_h), Square root of area (\sqrt{A}), Diameter of equivalent area of circle (A_{eq}). In verification of the model, the results of laminar flow and turbulent flow in circular pipe agree well with the mathematical formula of the flow in-pipe theory. Then, simulations of flow through other cross-sections are investigated and found that the use of the hydraulic diameter yields friction factor greater scatter in computational data as compared with the use of square root of area as a characteristic length scale. The square root of the cross-sectional area is a more appropriate characteristic dimension applicable to noncircular ducts eliminating large errors in estimation of pressure drop.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีจากคำแนะนำและความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ สำหรับคำแนะนำ คำสอน และคำปรึกษา รวมไปถึงแนวทางในการวิเคราะห์แก้ไขปรับปรุงงานวิจัย

ผศ.ดร.ภาณุพร พัทธวรโชติ และ ดร.อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา สำหรับคำแนะนำที่มีประโยชน์อย่างมากในการปรับปรุงโครงงานให้ดียิ่งขึ้น

อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยและเป็นพื้นฐานสำคัญในการประยุกต์ใช้กับงานวิจัย

นายเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ สำหรับคำแนะนำและแนวคิดเกี่ยวกับการใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ และมอบความเป็นมิตรที่ดีตลอดมา

สมิทธิ ภัทรประสิทธิ์ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
คำอธิบายสัญลักษณ์	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การไหลภายในท่อ (Flow in Pipe)	3
2.2 การเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนภายในท่อ (Variation of Shear Stress in a Pipe)	5
2.3 การกระจายตัวของความเร็วในการไหลแบบราบเรียบภายในท่อ (Velocity Distribution for Laminar Flow in a Pipe)	6
2.4 ตัวประกอบแรงเสียดทานของท่อที่อยู่ในรูปของตัวเลขเรโนลด์ (Friction Factor as a Function of Reynolds Number in a Pipe)	8
2.5 ท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่เป็นรูปวงกลม (Noncircular Conduits)	11
2.6 กระแสการไหลที่สอง (Secondary Currents)	11
2.7 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics)	12
2.8 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล	12
2.9 สมการควบคุม (Governing Equation)	13
2.10 ลำดับขั้นการคำนวณหาคำตอบแบบ SIMPLE	16
2.11 กระบวนการวิธีที่สมบูรณ์ SIMPLE	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง	23
3.1 คำอธิบายการทดลอง	23
3.2 ขั้นตอนการทำการทดลอง	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	36
4.1 ผลการทดลอง	36
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	52
5.1 สรุปผลการทดลอง	52
5.2 วิจาร์ณผลการทดลอง	52
5.3 ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก ก	56



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของค่า effective surface roughness ของพื้นผิวชนิดต่างๆ	9
2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของ p'	20
3.1 สรุบบางจำลองที่ใช้ในการทดลอง	24
3.2 การกำหนด Solution Methods	34
3.3 ค่า Under-Relaxation Factors	34
ก.1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม	57
ก.2 เปรียบเทียบค่า Entrance length ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม	59



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทดลองฉีดสีย้อมของ Reynolds (ซ้าย) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด (Δp) และอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q) ของการไหลลักษณะต่างๆ (ขวา)	3
2.2 รูปภาพสำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนภายในท่อ	5
2.3 Moody diagram	10
2.4 กระแสการไหลที่สองในท่อทรงสามเหลี่ยม	11
2.5 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล	13
2.6 ปริมาตรควบคุมสำหรับใช้ในการแปลงรูปของสมการความต่อเนื่อง	19
2.7 ลำดับขั้นตอนการคำนวณวิธี SIMPLE	22
3.1 หน้าต่างก่อนการเข้าโปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 1	26
3.2 โปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 1	26
3.3 แบบจำลองที่ 1 ทรงกระบอกที่มีรัศมี 0.025 หน่วย ยาว 3 หน่วย	27
3.4 แบบจำลองที่ 1 ที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบ	27
3.5 แบบจำลองที่ 1 ที่มีการสร้างกริดบนพื้นผิว	28
3.6 แบบจำลองที่ 1 ที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์	28
3.7 หน้าต่างการบันทึกข้อมูลสำหรับแบบจำลองที่ 1	29
3.8 หน้าต่างก่อนเข้าโปรแกรม Fluent 12.016	30
3.9 โปรแกรม Fluent 12.0.16	30
3.10 หน้าต่างการเลือกไฟล์	30
3.11 แบบจำลองที่จะนำมาคำนวณ โดยโปรแกรม Fluent 12.0.16	31
3.12 หน้าต่างการกำหนดขนาดของแบบจำลอง	31
3.13 หน้าต่างแสดงการเลือกสมการการไหล	32
3.14 แสดงหน้าต่าการกำหนดคุณสมบัติวัสดุ	32
3.15 หน้าต่างแสดงหน้า FLUENT Database Materials	33
3.16 แสดงหน้าต่าการกำหนดชนิดของไหล	33
3.17 แสดงการคำนวณของโปรแกรม Fluent. 12.0.16	35
3.18 หน้าต่างแสดงการคำนวณเสร็จสิ้น	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้ A_{eq}	36
4.2 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้ D_h	37
4.3 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้ \sqrt{A}	37
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 1 A_{eq} Circle1000	38
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 2 A_{eq} Circle10000	38
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 3 A_{eq} Circle100000	38
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 4 A_{eq} Rectangle1000	39
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 5 A_{eq} Rectangle10000	39
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 6 A_{eq} Rectangle100000	39
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 7 A_{eq} Square1000	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 8 A_{eq} Square10000	40
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 9 A_{eq} Square100000	40
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 10 A_{eq} Triangle1000	41
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 11 A_{eq} Triangle10000	41
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 12 A_{eq} Triangle100000	41
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 13 D_h Circle1000	42
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 14 D_h Circle10000	42
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 15 D_h Circle100000	42
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 16 D_h Rectangle1000	43
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 17 D_h Rectangle10000	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา μx ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 18 D_n Rectangle100000	43
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 19 D_n Square1000	44
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 20 D_n Square10000	44
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 21 D_n Square100000	44
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 22 D_n Triangle1000	45
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 23 D_n Triangle10000	45
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 24 D_n Triangle100000	45
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 25 \sqrt{A} Circle1000	46
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 26 \sqrt{A} Circle10000	46
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 27 \sqrt{A} Circle100000	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 28 \sqrt{A} Rectangle1000	47
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 29 \sqrt{A} Rectangle10000	47
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 30 \sqrt{A} Rectangle100000	47
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 31 \sqrt{A} Square1000	48
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 32 \sqrt{A} Square10000	48
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 33 \sqrt{A} Square100000	48
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 34 \sqrt{A} Triangle1000	49
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 35 \sqrt{A} Triangle10000	49
4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 36 \sqrt{A} Triangle100000	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.40 การเปรียบเทียบค่า Entrance length ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้ A_{eq}	50
รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบค่า Entrance length ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้ D_h	50
รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบค่า Entrance length ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้ \sqrt{A}	51



คำอธิบายสัญลักษณ์

∇	Divergence
ρ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
\mathbf{u}	เวกเตอร์ความเร็ว
x, y, z	ทิศทางในแนวแกน x , y และ z ตามลำดับ (เมตร)
u, v, w	ความเร็วในแนวแกน x , y และ z ตามลำดับ (เมตรต่อวินาที)
p, P	ความดัน
τ_{ij}	ความเค้นที่กระทำในทิศทาง j บนผิวหน้าตัดที่มี Normal vector ในทิศทาง i (กิโลกรัมต่อเมตร·วินาที ²)
S_M	แรงภายนอกที่กระทำต่อปริมาตรของของไหล
E	พลังงานจำเพาะของของไหล
T	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
S_E	อัตราการเพิ่มของพลังงานที่กระทำต่อปริมาตรของของไหล
μ	ความหนืดของของไหล (กิโลกรัมต่อเมตร·วินาที ²)
g_i	เวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงในทิศทาง i (เมตรต่อวินาที ²)
F	แรง (นิวตัน)
V	ปริมาตรควบคุมของของไหล
v_x	ความเร็วในทิศทาง x (เมตรต่อวินาที)
v_{avg}	ความเร็วเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)
$ v $	ขนาดของเวกเตอร์ความเร็ว
\bar{v}	ความเร็วของไหลในท่อเปล่า (เมตรต่อวินาที)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

u'_i	ความเร็วเนื่องจากการเกิด Fluctuation ในทิศทาง i (เมตรต่อวินาที)
\bar{u}'_i	ความเร็วเฉลี่ยเนื่องจากการเกิด Fluctuation ในทิศทาง i (เมตรต่อวินาที)
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ (เมตรต่อวินาที)
R_ε	ผลของ Swirl
\emptyset	คุณสมบัติ \emptyset ในปริมาตรควบคุม
P_i	ความดัน ณ ตำแหน่ง i
$A_{i,j}$	พื้นที่ผิวเซลล์ (ด้านตะวันออกหรือตะวันตก) ของปริมาตรควบคุม
$a_{i,j}$	ค่าของสัมประสิทธิ์ ได้มาจากการคำนวณ โดยวิธีการแปลงรูปแบบ Upwind
a_{nb}	ค่าของสัมประสิทธิ์ ได้มาจากการคำนวณ โดยวิธีการแปลงรูปแบบ Upwind
i^*	ค่าตัวแปร i ที่คาดเดาขึ้น
i'	ค่าแก้ไขของตัวแปร i
α_p	Under-relaxation factor ของความดัน
α_i	Under-relaxation factor ของความเร็วในทิศทาง i
v	ปริมาตรควบคุมของของไหล
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์
D_h	เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก
A_{eq}	เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อกลมที่มีพื้นที่เท่ากับรูปที่ต้องการ
\sqrt{A}	จำนวนรากกำลังสองของพื้นที่

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) เป็นกระบวนการเชิงตัวเลขที่ใช้ในการแก้ปัญหาและศึกษาพฤติกรรมเกี่ยวกับการไหลของของไหล การพัฒนาของ โปรแกรมนี้ในปัจจุบัน ความแม่นยำและความรวดเร็วในการคำนวณสถานะที่ซับซ้อน ได้รับการ ปรับปรุงให้ดีขึ้นเรื่อยๆ ในส่วนของค่าความยาวเชิงคุณลักษณะ (Characteristic length) ในการทำงานทางด้านวิศวกรรมต้องพิจารณาคุณสมบัติของการไหลแบบช่วงปรับตัวสมบูรณ์ (Fully developed) ภายในท่อที่ไม่ใช่ทรงกลม (Non-circular Conduits) ให้เหมือนกับของท่อทรงกลม (Circular Conduits) โดยความยาวเชิงคุณลักษณะนี้สามารถหาได้จากหลายวิธีอย่างเช่น $D_h \sqrt{A/A_{eq}}$ แต่โดยทั่วไปในการทำงานทางด้านวิศวกรรมมักจะใช้เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าท่อที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ต่อความยาวรอบรูปเดียวกันจะมีคุณสมบัติการเคลื่อนที่ของของไหล (Bulk flow) เดียวกันโดยไม่ได้นำรูปทรงของท่อมาพิจารณา เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกถูกใช้สำหรับทั้งการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) จากการทดลองของ Kays, William M. และ Michael E. Crawford ได้แสดงให้เห็นว่าสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนแรงเค้นเฉือน (Shear stress) ที่ผนังจะแผ่กระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่รอบรูปภายในท่อเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกจึงเหมาะกับการเป็นความยาวเชิงคุณลักษณะของท่อที่ไม่ใช่ทรงกลมหลายรูปทรง อย่างไรก็ตามสำหรับการไหลแบบราบเรียบแรงเค้นเฉือนที่ผนังไม่ได้แผ่กระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่รอบรูปภายในท่อ^[1] เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกจึงอาจไม่ใช่ความยาวเชิงคุณลักษณะที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น ท่อทรงกลม $f_{Re} = 16$ ในขณะที่ท่อทรงสามเหลี่ยม $f_{Re} = 13.333$ เมื่อนิยาม $Re = \frac{\rho v L}{\mu}$

บางครั้งการใช้งานเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกเป็นความยาวเชิงคุณลักษณะใช้ในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ช่วงเปลี่ยนผ่าน (Transition Reynolds number) ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อความหนืดจะมีความเกี่ยวข้องมากกับเสถียรภาพของการไหลแบบราบเรียบ ความหนืดจะฟื้นฟูการไหลแบบราบเรียบหลังจากถูกรบกวนส่วนแรงเฉื่อยจะเพิ่มการรบกวน การเปลี่ยนผ่านจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วนสามารถแสดงโดยค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ช่วงเปลี่ยนผ่าน สำหรับท่อทรงกลมค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ช่วงเปลี่ยนผ่านมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2000 และเนื่องจากแรงเค้นเฉือนที่ผนังไม่ได้แผ่กระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่รอบรูปภายในท่อที่ไม่ใช่ทรงกลม ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ช่วงเปลี่ยนผ่านจึงอาจไม่เท่ากับ 2000

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาความยาวเชิงคุณลักษณะ 3 ตัว ได้แก่ $D_h \sqrt{A} A_{eq}$ สำหรับท่อ 4 รูปทรงได้แก่ทรงกลม ทรงสี่เหลี่ยม จตุรัส ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (2:1) ทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยใช้วิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor, f) ของความยาวเชิงคุณลักษณะ 3 ตัว เพื่อหาประสิทธิภาพของความยาวเชิงคุณลักษณะทั้ง 3 ตัว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1.2.2 เพื่อศึกษาความยาวเชิงคุณลักษณะทั้ง 3 ตัว ได้แก่ $D_h \sqrt{A} A_{eq}$ ว่าสามารถแสดงลักษณะทางกายภาพของการไหลภายในท่อและสอดคล้องกับผลการจำลอง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากความยาวเชิงคุณลักษณะ 3 ตัว ได้แก่ $D_h \sqrt{A} A_{eq}$

1.3.2 ทหาว่าความยาวเชิงคุณลักษณะตัวไหนดีที่สุดสำหรับท่อ 4 รูปทรงได้แก่ทรงกลม ทรงสี่เหลี่ยมจตุรัส ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (2:1) ทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่คำนวณได้จากทฤษฎีกับที่คำนวณได้จาก FLUENT โดยมีความยาวเชิงคุณลักษณะได้แก่ $D_h \sqrt{A} A_{eq}$

1.4.3 ดูความเบี่ยงเบนของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพื่อใช้พิจารณาในการเลือกความยาวเชิงคุณลักษณะจากทั้ง 3 ตัว ได้แก่ $D_h \sqrt{A} A_{eq}$

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

1.5.2 นำเสนอความยาวเชิงคุณลักษณะที่จะเป็นทางเลือกแทน D_h

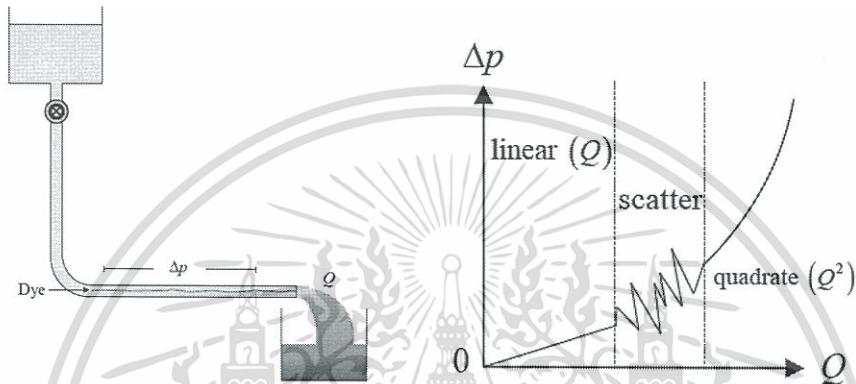
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การไหลภายในท่อ (Flow in Pipe)

ในปี ค.ศ.1883 Osborn Reynolds ชาวไอร์แลนด์ได้ทำการทดลองที่สะพานโลก ดังรูป



รูปที่ 2.1 การทดลองฉีดสีของ Reynolds (ซ้าย) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด (Δp) และอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q) ของการไหลลักษณะต่างๆ (ขวา)^[5]

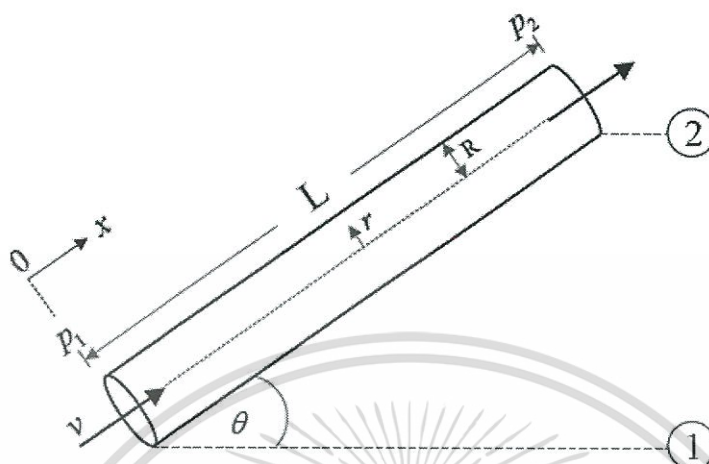
เขายกย่องว่ามันเกิดอะไรขึ้นกันแน่จึงได้ฉีดสียอมเข้าไปในท่อและได้พบว่า

	ที่อัตราการไหลต่ำ	ที่อัตราการไหลสูง
ลักษณะ สียอม	สียอมจะเดินทางเป็นตรงเรียบ ตลอดท่อ	สียอมจะกระจายตัวอย่างรวดเร็ว ตลอดท่อ
รูปแบบ การไหล	“การไหลแบบราบเรียบ หรือ Laminar flow”	“การไหลแบบปั่นป่วน หรือ Turbulent flow”

นอกจากนั้นยังมีรอยต่อระหว่างการเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งถูกเรียกว่า ช่วงการไหลแบบทรานซิชัน (Transition region: unstable but not mazed) เขายังได้หาความสัมพันธ์ของรูปแบบการไหลกับกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless group) คือ “Reynolds number – Re”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนภายในท่อ (Variation of Shear Stress in a Pipe)



รูปที่ 2.2 รูปภาพสำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนภายในท่อ

จาก Momentum balance (ในเทอมของ Force balance) ตามแนวแกนของ x คือ

$$\pi r^2 \Delta p = 2\pi r L \tau_{rx}$$

สมการด้านบนกำลังบอกว่า Pressure drop เกิดขึ้นในท่อเพราะมีแรงเสียดทานอันเนื่องมาจากความหนืดของของไหล (Shear force) ซึ่งเป็นแรงที่กระทำต่อพื้นผิวด้านข้างที่สัมผัส (ไม่ใช่พื้นที่หน้าตัดการไหลเหมือนกับกรณีของ Pressure force)

Shear force = Shear stress \times พื้นที่ผิวสัมผัสการไหล

Pressure force = Pressure drop \times พื้นที่หน้าตัดการไหล

ในกรณีที่ท่อไม่อยู่ในแนวระดับ (ความสูงของทางออก 2 \neq ความสูงของทางเข้า 1) เราจะต้องเพิ่มเทอมที่เกี่ยวข้องกับแรงโน้มถ่วงเข้าไปด้วย ดังนี้

$$\pi r^2 \Delta p + \pi r^2 L \rho g \sin \theta = 2\pi r L \tau_{rx}$$

เทอมใหม่นี้ คือ Body force เป็นแรงที่กระทำกับมวลของของไหล

$$\text{Body force} = m \times g = V \rho g e^{\theta}$$

$$= \pi r^2 L \rho g$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าท่อวางอยู่ในแนวระดับ ($\theta = 0$) เทอมใหม่ก็จะหายไป ($\sin 10^\circ = 0$) ดังนั้นทำให้เราสามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$\tau_{rx} = \frac{r}{2L} [\Delta P + \rho g \Delta z]$$

หรือ
$$\tau_{rx} = \frac{r \Delta \Phi}{2L} \quad (2 - 3)$$

เมื่อ
$$\Delta p = p_2 - p_1$$

$$\Delta z = z_2 - z_1$$

$$\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (p_2 + \rho g z_2) - (p_1 + \rho g z_1) : \text{“Potential”}$$

2.3 การกระจายตัวของความเร็วในการไหลแบบราบเรียบภายในท่อ (Velocity Distribution for Laminar Flow in a Pipe)

สำหรับของไหลนิวโตเนียน ที่มีการไหลเป็นแบบราบเรียบ ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนกับ Velocity gradient ที่ระยะรัศมีต่างๆของท่อ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\tau_{rx} = \mu \frac{dv_x}{dr} \quad (2 - 4)$$

τ_{rx} เป็นปริมาณเทนเซอร์ เคลื่อนที่ไปในทิศทาง j แต่ส่งผลในทิศทาง i และ จากหัวข้อที่แล้วพบว่า

$$\tau_{rx} = \frac{r \Delta \Phi}{2L} \quad (2 - 5)$$

ถ้าให้สมการที่ (2 - 4) เท่ากับสมการที่ (2 - 5) จะได้

$$dv_x = \frac{\Delta \Phi}{2\mu L} r dr$$

หรือหากอินทิเกรตสมการข้างต้นจะได้
$$v_x = \frac{\Delta \Phi}{4\mu L} r^2 + C$$

ที่ผนังด้านในของท่อ ความเร็วของของไหลจะเป็นศูนย์ (no - slip condition)

$$r = R \quad \Rightarrow \quad v_x = 0$$

แทนค่าสภาวะขอบเขตแล้วจะได้

$$C = -\frac{R^2 \Delta\phi}{4\mu L}$$

ซึ่งการกระจายตัวของความเร็วแสดงได้ดังนี้

$$v_x = \frac{\Delta\phi}{4\mu L} (r^2 - R^2)$$

$$v_x = -\frac{R^2 \Delta\phi}{4\mu L} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (2-6)$$

$$v_x(r) = v_{max} \left[1 - \frac{r^2}{R^2}\right] \rightarrow \text{มีรูปทรงเป็นพาราโบลา}$$

$$\text{เมื่อ } v_{max} = -\frac{R^2 \Delta\phi}{4\mu L} \rightarrow \text{มีเครื่องหมายเป็น-}$$

จากนิยามของอัตราการไหลเชิงปริมาตร $Q = \bar{v} \cdot A$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ เราได้คำนวณเอาไว้แล้วว่า $\bar{v} = v_{max}/2$

$$\text{ดังนั้น } Q = \frac{\pi R^2 v_{max}}{2}$$

หรือ

$$Q = -\frac{\pi R^4 \Delta\phi}{8\mu L} = -\frac{\pi D^4 \Delta\phi}{128\mu L} \quad (2-7)$$

เรียกสมการนี้ว่า “สมการ Hagen – Poiseuille (Hagen – Poiseuille equation)”

ถ้าท่อวางอยู่ในแนวระดับ ($\theta = 0$) สมการนี้จะลดรูปลงเหลือ

$$Q = -\frac{\pi D^4 \Delta p}{128\mu L} \quad \text{มีค่าเป็น - มีหน่วยเป็น m}^3/\text{s} \quad (2-8)$$

และสมการนี้คือ สมการ Hagen – Poiseuille สำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อที่วางอยู่ในแนวระดับ (1=2)

ทั้งสองเทอมมีเครื่องหมายเป็น-
ดังนั้น จึงมีเครื่องหมายเป็น+

2.4 ตัวประกอบแรงเสียดทานของท่อที่อยู่ในรูปของตัวเลขเรโนลด์ (Friction Factor as a Function of Reynolds Number in a Pipe)

ถ้าเราแทนค่า r ด้วย R ในความสัมพันธ์ของ $\tau_{rx}(r)$ จะได้ค่าความเค้นเฉือนที่ผนังด้านในของท่อ ดังนี้

$$\tau_w = \tau_{rx}|_{r=R}$$

นั่นคือ

$$\tau_w = \frac{R\Delta\phi}{2L}$$

หรือ

$$\Delta\phi = \frac{4L\tau_w}{D}$$

เราสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\Delta\phi = \frac{4 \times L \times \tau_w \times 2 \times \rho \bar{v}^2}{D \times 2 \times \rho \bar{v}^2} = 4 \left(\frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho \bar{v}^2} \right) \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{\rho \bar{v}^2}{2} \right)$$

มีค่าติดลบ เพราะ $\Delta\phi$ ติดลบ [Pa]



Dynamic pressure [Pa]

f (fanning friction factor) คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของท่อ

อาจจะมองในแง่ของอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำตั้งฉากกับผนังด้านในของท่อและแรงที่ของไหลกระทำขนานไปกับ

สุดท้ายจะได้ว่า

$$\Delta\phi = 4f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{\rho \bar{v}^2}{2} \right) \quad (2-9)$$

ย้อนกลับมาดูที่สมการ Hagen - Poiseuille จะพบว่า

$$-\Delta\phi = \frac{128\mu LQ}{\pi D^4} = \frac{32\mu L\bar{v}}{D^2}$$

จัดรูปใหม่

$$-\Delta\phi = \frac{4 \times 8 \times \mu \times L \times \bar{v} \times 2 \times \rho \bar{v}}{D^2 \times 2 \times \rho \bar{v}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\Delta\phi = 4\left(\frac{16\mu}{\rho v D}\right)\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{\rho v^2}{2}\right) \quad (2 - 10)$$

ถ้าสมการ (2 - 9) เท่ากับ สมการ (2 - 10) จะได้

$$f = \frac{16}{\frac{\rho v D}{\mu}} = \frac{16}{Re} \text{ (สำหรับการไหลแบบราบเรียบเท่านั้น)} \quad (2 - 11)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน เรายังไม่สามารถหาค่า f ได้จากทางทฤษฎีล้วนๆ ดังนั้นจึงต้องพึ่งผลจากการทดลองในสภาวะต่างๆ แล้วนำค่ามาสรุปรวมกันไว้ใน “*Moody diagram*” (1944) ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

1. Laminar flow ($Re \leq 2,000$)

- มีกราฟเส้นเดียว คือ $f = \frac{16}{Re}$

2. Transition region ($2,000 < Re \leq 4,000$)

- จะไม่สามารถหาค่า f ที่แน่นอนได้ ดังนั้น ไม่ควรจะออกแบบท่อให้มีการไหลให้อยู่ในช่วงนี้

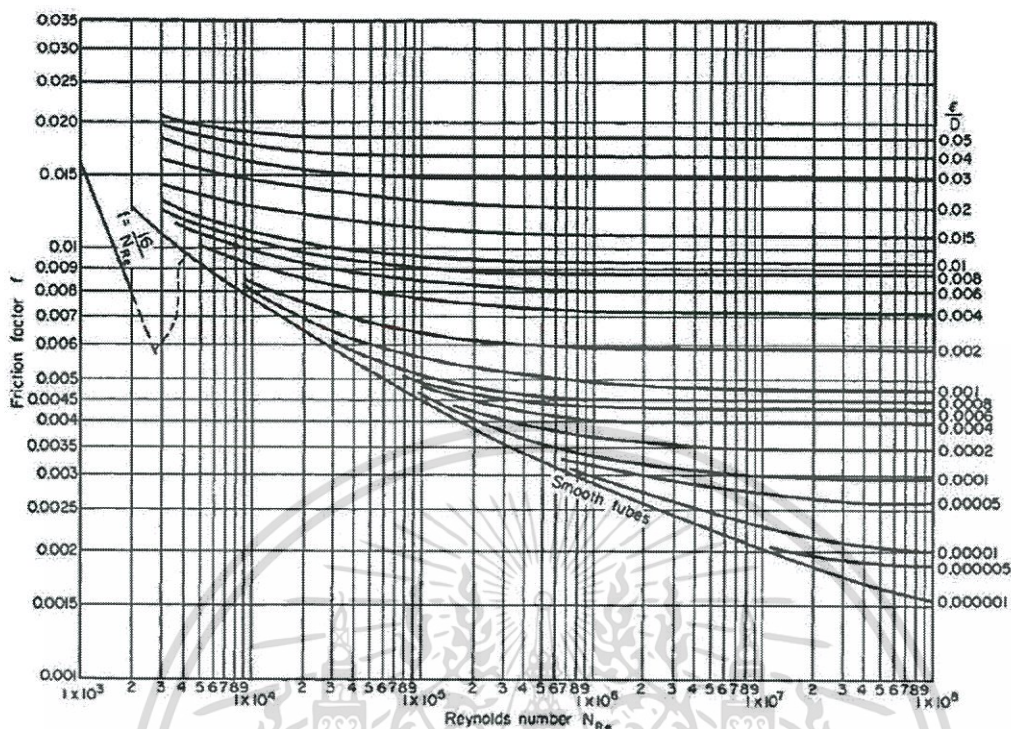
3. Turbulent flow ($Re > 4,000$)

- จะมีกราฟหลายเส้นตามค่า relative roughness (ϵ / D) ซึ่งทำการทดลองโดย Nikuradse โดยเขาวัด Δp ในท่อที่ผนังด้านในทากาวแล้วนำเม็ดทรายที่รู้ค่า ϵ ต่างๆ มาติดเอาไว้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของค่า effective surface roughness ของพื้นผิวชนิดต่างๆ

Surface	ϵ (Effective surface roughness: mm)
Smooth	0
Concrete	0.30 - 3.00
Iron	0.15 - 0.25
Steel	0.046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 Moody diagram

(ที่มา: Darby, R. Chemical Engineering Fluid Mechanics. 2nd edition, New York: Marcel Dekker, 2001)

อย่างไรก็ตาม Churchill (1977) ได้สร้างสูตรที่ใช้ทำนายเส้นกราฟทุกเส้นของ Moody diagram ใน ทุกๆช่วงการไหล จาก laminar flow ถึง turbulent flow (หมายเหตุ เป็นแค่การใช้คณิตศาสตร์ สร้างสมการ ที่ให้ผลตรงกับ Moody diagram ที่มีอยู่แล้ว ไม่ได้อธิบายความหมายทางฟิสิกส์แต่อย่างใด: fitting curves)

$$f = 2 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^2} \right]^{\frac{1}{12}} \tag{2 - 12}$$

เมื่อ $A = \left\{ 2.457 \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + \frac{0.27\varepsilon}{D}} \right] \right\}^{16}$ และ $B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$

จะเห็นว่าที่ Re มีค่าน้อยๆ เทอม $\frac{1}{(A+B)^2}$ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอม $\left(\frac{8}{Re} \right)^{12}$

ดังนั้นถ้าการไหลเป็นแบบราบเรียบ สูตรนี้สามารถลดรูปได้เป็น

$$f = 2 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} \right]^{\frac{1}{12}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $f = \frac{16}{Re}$ (Laminar flow)

ในทางกลับกัน ถ้า Re มีค่ามากๆ การไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน และสูตรนี้จะลดรูปลงเป็น

$$f = \frac{2}{(A+B)^{1/8}} \quad (\text{Turbulent flow})$$

2.5 ท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่เป็นรูปวงกลม (Noncircular Conduits)

ถ้าท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่เป็นวงกลม หรือ ของไหลไหลไม่เต็มหน้าตัด จะทำอย่างไรในเมื่อ Dimensionless group เช่น Re หรือ f ต่างก็มีตัวแปรของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) เป็นองค์ประกอบ คำตอบคือ เราจะใช้ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อชนิดใหม่ที่ เรียกว่า “เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก – Hydraulic diameter” เข้ามาช่วย ซึ่งสามารถแสดงค่าได้ดังนี้

$$D_h = 4 \frac{A}{W_p}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ที่ตัดฉากกับการไหล

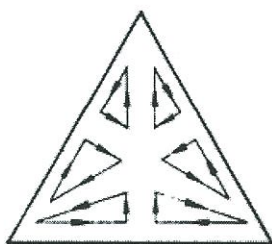
W_p คือ ความยาวของเส้นรอบรูปที่สัมผัสกับของไหล (Wetted perimeter)

โดยเราจะใช้ค่า D_h แทนที่ค่า D ในสมการที่ใช้สำหรับหาค่า Re หรือ f แล้วคำนวณตามปกติ

2.6 กระแสการไหลที่สอง (Secondary Currents)^[2]

ความแตกต่างของแรงดันซึ่งเกิดจากพจน์ของความผันผวนอธิบายถึงจุดกำเนิดของกระแสการไหลที่สองในท่อตรงและท่อที่ไม่ใช่ทรงกลม กระแสการไหลที่สองเกิดเมื่อผลของความไม่สมมาตรของความผันผวนของแรงเค้นเฉือนเกิดขึ้นในการไหล ซึ่งนั่นคือเวลาที่ขอบไม่ใช่ทรงกลม

กระแสการไหลที่สองนี้เคลื่อนจากบริเวณที่แรงเค้นเฉือนสูงไปบริเวณที่แรงเค้นเฉือนต่ำตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระแสการไหลที่สองในท่อตรงสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสการไหลที่สองมีแนวโน้มที่จะทำให้แรงเค้นเฉือนบริเวณขอบมีค่าเท่ากันและกระแสการไหลที่สองเป็นลำดับที่สองแค่นั้นเอง กระแสการไหลที่สองเป็นเหตุผลแค่บางส่วนที่ทำให้รัศมีไฮโดรลิกใช้นิยามของรัศมีไฮโดรลิกตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าแรงเค้นเฉือนบริเวณขอบมีค่าคงที่ ข้อจำกัดของการใช้รัศมีไฮโดรลิกจำเป็นต้องรู้ การเปลี่ยนแปลงในรูปแบบกระแสการไหลที่สองในการไหลมีผลต่อเฮดสูญเสียซึ่งตัดทิ้งไม่ได้

2.7 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics)^[3]

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computation Fluid Dynamics หรือ CFD) คือการวิเคราะห์ ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การถ่ายโอนความร้อนและปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับ ปฏิกิริยาเคมี โดยการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เทคนิคนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรมและวงการการศึกษา ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ เช่น

- อากาศพลศาสตร์ของอากาศยานและยานพาหนะ เช่น แรงยกและแรงต้าน เป็นต้น
- อุทกศาสตร์ของเรือ
- โรงจักรผลิตกำลัง เช่น การผสมและการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การไหลของของไหลทำงาน เป็นต้น
- วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การทำความเย็นบนอุปกรณ์รวมทั้งวงจร ไมโครอิเล็กทรอนิกส์
- วิศวกรรมเคมี เช่น การผสมและการแยกสาร การไหลและการขึ้นรูปพลาสติก เป็นต้น
- สภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของอาคาร ที่เกี่ยวข้องกับแรงลมที่กระทำกับอาคารและการระบายอากาศ
- วิศวกรรมทางทะเล เช่น ภาระของกระแสน้ำทะเลที่มีต่อโครงสร้างใต้ผิวน้ำ เป็นต้น
- วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เช่น การกระจายตัวของมลพิษ เป็นต้น
- วิศวกรรมชีวเวช เช่น การไหลของเลือดในหลอดเลือดแดงและหลอดเลือดดำ เป็นต้น

2.8 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล^[3]

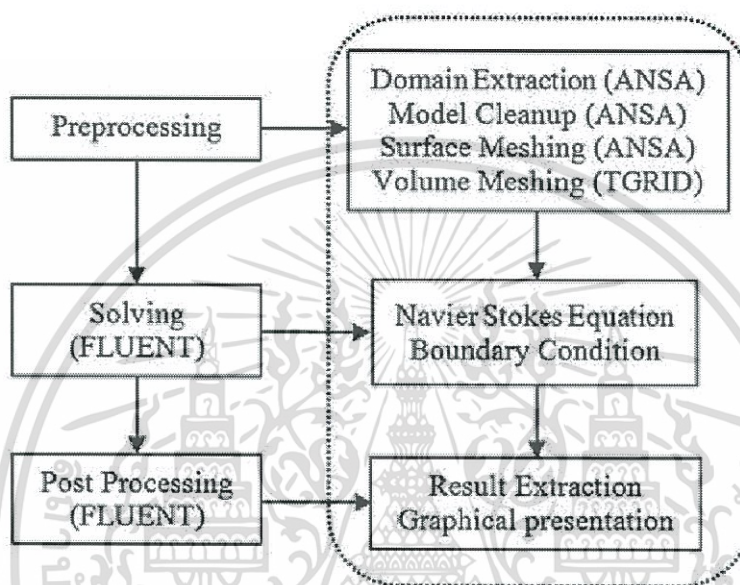
โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลถูกสร้างขึ้นด้วยลำดับขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขที่สามารถแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลได้ โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลจะ ประกอบด้วย

3 ส่วนหลัก ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Pre-processor : ใช้สร้างแบบจำลอง (Solid modeling) และสร้างกริด (Grid generation)
- Solver : ส่วนที่ใช้ในการคำนวณเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหล
- Post processor : ส่วนของการแสดงผลการคำนวณ เช่น กราฟ คอนทัวร์ เวกเตอร์ ฯลฯ

สามารถสรุปการทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

2.9 สมการควบคุม (Governing Equation)^[3]

กฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์โดยทั่วไปมี 3 กฎดังนี้

- กฎการอนุรักษ์มวล (The mass of a fluid is conserved)
- กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law of motion)
- กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (First law of thermodynamics)

จากกฎการอนุรักษ์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนสมการควบคุมได้ดังนี้

สมการอนุรักษ์มวล (Continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2 - 13)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่น (Density)

t คือ เวลา

\mathbf{u} คือ เวกเตอร์ความเร็ว (Velocity vector) ซึ่ง $\mathbf{u} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$

เรียกสมการที่ (2 - 13) ว่า “สมการอนุรักษ์มวลของของไหลที่อัดตัวได้ในสภาวะไม่คงตัว”

ในกรณีของของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) เช่น ของเหลว ซึ่งมีความหนาแน่นคงที่ ทั้งนี้สมการที่ (2 - 13) สามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2 - 14)$$

สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่า “แรงเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม”

ซึ่งสามารถเขียนสมการ โมเมนตัมในสามมิติได้ดังนี้

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\Delta p + \Delta \boldsymbol{\tau} + S_M \quad (2 - 15)$$

โดยที่ p คือ ความดัน (Pressure)

$\boldsymbol{\tau}$ คือ ความเค้นเฉือน (Shear stress)

S_M คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อปริมาตรของของไหล เช่น แรงโน้มถ่วง แรงทางแม่เหล็ก

ฯลฯ

สมการพลังงาน (Energy equation)

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์กล่าวว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไหลเท่ากับอัตราการเพิ่มความร้อนในอนุภาคของไหลรวมกับอัตราของงานที่กระทำต่ออนุภาคของไหล”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งสามารถเขียนสมการพลังงานได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \mu \frac{DE}{Dt} = \nabla \cdot k \nabla T - \nabla \cdot (p\mathbf{u}) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} \\ + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + S_E \end{aligned} \quad (2 - 16)$$

โดยที่ E คือ พลังงานจำเพาะของของไหล (Specific energy)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)

T คือ อุณหภูมิ (Temperature)

S_E คือ อัตราการเพิ่มของพลังงานที่กระทำต่อปริมาตรของของไหล

สมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน

(Navier-Stokes Equations for a Newtonian Fluid)

จากสมการ โมเมนตัม สมการที่ (2 - 15) และจากกฎความหนืดของนิวตัน (Newton's Law of Viscosity)^[4] ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (2 - 17)$$

โดยที่ g คือ ค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational constant)

เรียกสมการที่ (2 - 17) ว่า “สมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับของไหลของนิวตัน”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta p = -\sum_{j=1}^3 C_{2ij} \left(\frac{1}{2} \rho v_j |v|\right) \quad (2 - 18)$$

หรือเมื่อเขียนในเทอมของความดันลดในทิศ x y และ z ได้ตั้งสมการที่ (2 - 19)

$$\begin{aligned} \Delta p &\approx \sum_{j=1}^3 C_{2xj} \Delta n_x \frac{1}{2} \rho v_j |v| \\ \Delta p &\approx \sum_{j=1}^3 C_{2yj} \Delta n_y \frac{1}{2} \rho v_j |v| \\ \Delta p &\approx \sum_{j=1}^3 C_{2zj} \Delta n_z \frac{1}{2} \rho v_j |v| \end{aligned} \quad (2 - 19)$$

โดยที่ Δn_x Δn_y และ Δn_z คือความหนาของตัวกลางในทิศ x y และ z

2.10 ลำดับขั้นการคำนวณหาคำตอบแบบ SIMPLE^[5]

กระบวนการวิธี SIMPLE นั้นมีชื่อเต็มว่า Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation โดยผู้นำเสนอวิธีนี้เป็นคนแรกคือ Patankar^[5] และ Spalding (1972) เป็นวิธีที่ใช้ขั้นตอนการเดาและการแก้ไขค่าในการคำนวณหาค่าความดันในระบบพิกัดแบบกริดที่เชื่อมกันตามที่กล่าวไว้ข้างต้น จะมีการแสดงตัวอย่างให้เห็นโดยการพิจารณาสมการของการไหลแบบคงตัวและราบเรียบ 2 มิติ ในพิกัดคาร์ทีเซียน

กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE นั้น เริ่มต้นจากการเดาค่าสนามความดัน p^* ตลอดทั้งโดเมนการไหล จากนั้นจะทำการหาคำตอบของสมการแปลงรูปโมเมนต์ โดยใช้ความดันที่เดาขึ้น เพื่อให้ได้ ค่าของความเร็ว u^* และ v^* ดังสมการ (2 - 20) และสมการ (2 - 21)

$$a_{i,j} u_{i,j}^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (p_{i-1,j}^* - p_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2 - 20)$$

$$a_{i,j} v_{i,j}^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + (p_{i,j-1}^* - p_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2 - 21)$$

จากนั้น ทำการนิยามค่าแก้ของความดัน p' ขึ้น ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าความดันที่ถูกต้องกับค่าความดันที่เดาขึ้น

$$p = p^* + p' \quad (2 - 22)$$

ในการทำงานเดียวกัน นิยามค่าแก้ไขของความเร็ว u' และ v' ที่เป็นผลต่างระหว่างค่าความเร็วที่ถูกต้องกับความเร็วที่ไคซึ้น u^* และ v^* ดังนี้

$$u = u^* + u' \quad (2 - 23)$$

$$v = v^* + v' \quad (2 - 24)$$

แทนค่าสนามความดัน p ที่ถูกต้องที่ได้จากการแก้ค่าในครั้งแรก ลงในสมการโมเมนตัมทำให้ได้สนามความเร็วที่ถูกต้อง (u และ v) ลบสมการ (2 - 20) และสมการ (2 - 21) จากสมการโมเมนตัมตามลำดับจะได้

$$\begin{aligned} a_{i,j}(u_{i,j} - u_{i,j}^*) &= \sum a_{nb}(u_{nb} - u_{nb}^*) \\ &+ [(p_{i-1,j} - p_{i-1,j}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \end{aligned} \quad (2 - 25)$$

$$\begin{aligned} a_{i,j}(v_{i,j} - v_{i,j}^*) &= \sum a_{nb}(v_{nb} - v_{nb}^*) \\ &+ [(p_{i,j-1} - p_{i,j-1}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \end{aligned} \quad (2 - 26)$$

ใช้สูตรค่าแก้ไขสมการ (2 - 22) ถึงสมการ (2 - 24) ดังนั้นสมการ (2 - 25) ถึงสมการ (2 - 26) อาจจะถูกเขียนใหม่ได้เป็น

$$a_{i,j}u'_{i,j} = \sum a_{nb}u'_{nb} + (p'_{i-1,j} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (2 - 27)$$

$$a_{i,j}v'_{i,j} = \sum a_{nb}v'_{nb} + (p'_{i,j-1} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (2 - 28)$$

จากจุดนี้ค่าแก้ไขของความเร็วจะถูกประมาณค่าอย่างง่ายขึ้นโดยตัดเทอม $\sum a_{nb}u'_{nb}$ $\sum a_{nb}v'_{nb}$ นี้ออกจากสมการ (2 - 27) ถึงสมการ (2 - 28) ซึ่งเป็นหัวใจหลักของกระบวนการวิธีแบบ SIMPLE เมื่อตัดเทอมดังกล่าวออกแล้วจะได้

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2 - 27)$$

$$v'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2 - 28)$$

โดยที่
$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} \text{ และ } d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} \quad (2 - 29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2 - 27) และสมการ (2 - 28) อธิบายการแก้ไขค่าที่จะถูกประยุกต์ใช้กับความเร็วผ่านสมการ (2 - 23) และสมการ (2 - 24)

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2 - 30)$$

$$v_{i,j} = v_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2 - 31)$$

ในการทำงานเดียวกันสำหรับ $u_{i+1,j}$ และ $v_{i,j+1}$ จะได้ว่า

$$u_{i+1,j} = u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j}(p'_{i,j} - p'_{i+1,j}) \quad (2 - 32)$$

$$v_{i,j+1} = v_{i,j+1}^* + d_{i,j+1}(p'_{i,j} - p'_{i,j+1}) \quad (2 - 33)$$

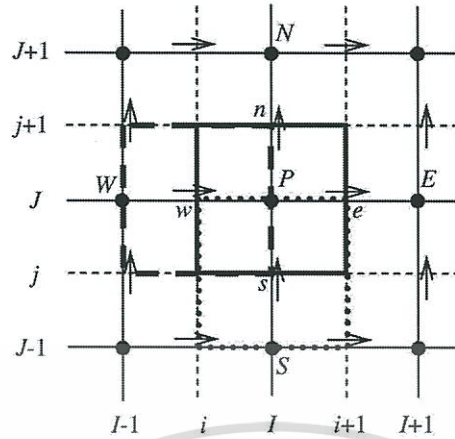
โดยที่

$$d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j}}{a_{i+1,j}} \text{ และ } d_{i,j+1} = \frac{A_{i,j+1}}{a_{i,j+1}} \quad (2 - 34)$$

ถึง ณ ตอนนีพิจารณาเพียงสมการโมเมนตัม ดังนั้นต้องพิจารณาสามความเร็วมีความสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องตามสมการ (2 - 27) ความต่อเนื่องจะถูกแปลงรูปที่ปริมาตรเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

$$[(\rho u A)_{i+1,j} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho u A)_{i,j+1} - (\rho u A)_{i,j}] = 0 \quad (2 - 35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ปริมาตรควบคุมสำหรับการใช้ในการแปลงรูปของสมการความต่อเนื่อง

แทนค่าความเร็วที่แก้ค่าแล้ว ดังที่ใหไว้ใน (2-30) – (2-33) ไปในสมการความต่อเนื่องที่แปลงรูปแล้ว (2-35) จะได้

$$\begin{bmatrix} \rho_{i+1,J} A_{i+1,J} (u_{i+1,J}^* + d_{i+1,J} (p'_{i,J} - p'_{i+1,J})) \\ -\rho_{i,J} A_{i,J} (u_{i,J}^* + d_{i,J} (p'_{i-1,J} - p'_{i,J})) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_{I,j+1} A_{I,j+1} (v_{I,j+1}^* + d_{I,j+1} (p'_{i,J} - p'_{i,j+1})) \\ -\rho_{I,j} A_{I,j} (v_{I,j}^* + d_{I,j} (p'_{i,j-1} - p'_{i,J})) \end{bmatrix} = 0 \quad (2-36)$$

ซึ่งอาจจะถูกเรียบเรียงใหม่เป็น

$$[(\rho dA)_{i+1,J} + (\rho dA)_{i,J} + (\rho dA)_{I,j+1} + (\rho dA)_{I,j}] p'_{i,J} = (\rho dA)_{i+1,J} p'_{i+1,J} + (\rho dA)_{i,J} p'_{i-1,J} + (\rho dA)_{I,j+1} p'_{i,j+1} + (\rho dA)_{I,j} p'_{i,j-1} + [(\rho u^* A)_{i,J} - (\rho u^* A)_{i+1,J} + (\rho v^* A)_{I,j} - (\rho v^* A)_{I,j+1}] \quad (2-37)$$

จัดเรียงสัมประสิทธิ์ของ p' ซึ่งอาจจะเขียนได้ดังนี้

$$a_{i,J} p'_{i,J} = a_{i+1,J} p'_{i+1,J} + a_{i-1,J} p'_{i-1,J} + a_{I,j+1} p'_{i,j+1} + a_{I,j-1} p'_{i,j-1} + b'_{i,J} \quad (2-38)$$

โดยที่ $a_{i,J} = a_{i+1,J} + a_{i-1,J} + a_{I,j+1} + a_{I,j-1}$ และสัมประสิทธิ์เป็นดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับวงวิชาการเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของ p'

$a_{I+1,J}$	$a_{I-1,J}$	$a_{I,J+1}$	$a_{I,J-1}$	$b'_{I,J}$
$(\rho dA)_{i+1,j}$	$(\rho dA)_{i,j}$	$(\rho dA)_{I,j+1}$	$(\rho dA)_{I,j}$	$(\rho u^* A)_{i,j}$ $- (\rho u^* A)_{i+1,j}$ $+ (\rho v^* A)_{I,j}$ $- (\rho v^* A)_{I,j+1}$

สมการ (2 – 38) คือสมการความต่อเนื่องที่แปลงไปเป็นสมการของค่าแก้ความกันเทอม $b'_{I,J}$ บ่งชี้ถึงความไม่สมดุลของมวลเข้าออกจากปริมาตรควบคุม เนื่องจากสนามความเร็ว u^*, v^* ที่ไม่ถูกต้อง โดยการแก้สมการ (2 – 38) สนามของค่าแก้ความดัน p' สามารถหาได้ทุกจุดในโดเมน เมื่อหาค่าได้แล้ว สนามความดันที่ถูกต้องก็จะสามารถหาได้ โดยใช้สมการ (2 – 37) และความเร็วที่ถูกต้องก็จะหาได้จากสมการ (2 – 30) ถึงสมการ (2 – 33) การละลายเทอม $\sum a_{nb} u'_{nb}$ จะไม่มีผลกระทบต่อคำตอบสุดท้ายเพราะว่าค่าแก้ความดันและค่าแก้ความเร็วจะเป็นศูนย์เมื่อคำตอบสุดท้ายถูกต้อง นั่นคือ $p^* = p$ และ $u^* = u$

สมการของค่าแก้ความดันอาจจะไม่วิ่งเข้าหาคำตอบได้ถ้าไม่มีการใช้ Under-relaxation ระหว่างกระบวนการทำซ้ำ ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \quad (2 - 39)$$

ที่ซึ่ง α_p คือ Under-relaxation factor ของความดัน ถ้าเลือกค่านี้น้อยกว่า 1 สนามความดันที่เดาค่าจะถูกแก้ไขโดย p' อย่างไรก็ตามค่าแก้ไขที่คำนวณได้ อาจจะใหญ่มากในกรณีที่การเดาค่าเริ่มต้นค่อนข้างห่างจากคำตอบสุดท้ายมาก ซึ่งจะทำให้การคำนวณไม่เสถียรได้ ดังนั้นการให้ค่า $C = 0$ ย่อมหมายถึงการไม่ปรับปรุงค่าเลย ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการเช่นกัน การใช้ค่าระหว่าง 0 กับ 1 จึงทำให้ได้ใช้บางส่วนของค่าแก้ในการปรับปรุงค่าความดัน โดยต้องไม่น้อยเกินไปจนทำให้การลู่ออกซ้ำ และต้องไม่มากเกินไปจนเกิดความไม่เสถียรขึ้น

สามารถใช้หลักการ Under-relaxation กับความเร็วที่คำนวณได้เช่นกัน ดังนี้

$$u^{new} = \alpha_u u + (1 - \alpha_u) u^{n-1} \quad (2 - 40)$$

$$v^{new} = \alpha_v v + (1 - \alpha_v) v^{n-1} \quad (2 - 41)$$

โดยที่ α_u และ α_v คือ Under-relaxation factor ของความเร็ว u และ v ตามลำดับ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดย u และ v คือความเร็วที่ถูกต้องที่ปราศจากการ relaxation ค่า u^{n-1} และ v^{n-1} คือความเร็วที่ได้จากการทำซ้ำครั้งก่อน ทำการแทนค่าตามสมการที่ได้นี้ เข้าไปในสมการแปลงรูปของโมเมนตัมในทิศความเร็ว u และ v และจัดรูปใหม่จะได้ดังนี้

$$\frac{a_{i,j}}{\alpha_u} u_{i,j} = \sum a_{nb} u_{nb} + (p_{i-1,j} - p_{i,j}) A_{i,j} + b_{i,j} + \left[(1 - \alpha_u) \frac{a_{i,j}}{\alpha_u} \right] u_{i,j}^{(n-1)} \quad (2-41)$$

$$\frac{a_{i,j}}{\alpha_v} v_{i,j} = \sum a_{nb} v_{nb} + (p_{i,j-1} - p_{i,j}) A_{i,j} + b_{i,j} + \left[(1 - \alpha_v) \frac{a_{i,j}}{\alpha_v} \right] v_{i,j}^{(n-1)} \quad (2-42)$$

สมการค่าแก้ของความดันก็จะถูกปรับเปลี่ยนไปด้วย กล่าวคือสัมประสิทธิ์ d ในสมการความ ต่อเนื่องที่แสดงในรูปของค่าแก้ของความดันจะกลายเป็น

$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j} \alpha_u}{a_{i,j}}, d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j} \alpha_u}{a_{i+1,j}}, d_{i,j} = \frac{A_{i,j} \alpha_v}{a_{i,j}} \quad (2-43)$$

และ

$$d_{i,j+1} = \frac{A_{i,j+1} \alpha_v}{a_{i,j+1}} \quad (2-44)$$

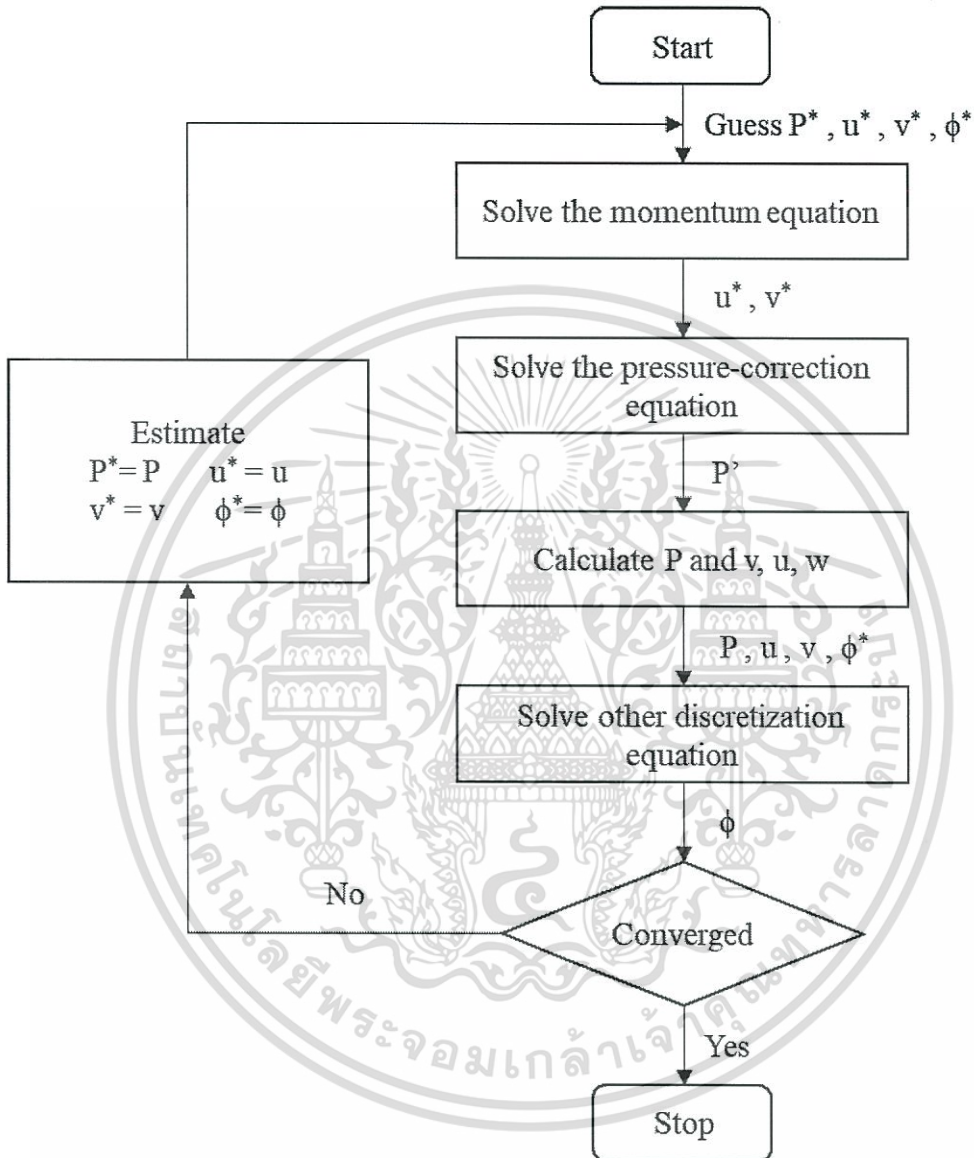
เป็นที่น่าสังเกตว่าสัมประสิทธิ์ $\alpha_{i,j}$, $\alpha_{i+1,j}$, $\alpha_{i,j}$ และ $\alpha_{i,j+1}$ ของสมการค่าแก้ความดันคือสัมประสิทธิ์ที่กึ่งกลางของสมการแปลงรูปของความเร็ว โดยมีจุด P คือ (i, j) (i+1, j) (i, j) และ (i,j+1) นั้นเอง

การเลือกค่า α มีผลต่อต้นทุนของการจัดการ ค่า α มากเกินไปทำให้นำไปสู่การแกว่งหรืออาการแกว่งออกของคำตอบ ถ้าค่า α น้อยเกินไปจะเป็นสาเหตุให้การลู่เข้าหาคำตอบเป็นไปอย่างช้าๆ ค่า α ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับกริดและจำเป็นต้องพิจารณาเป็นกรณีแต่ละกรณี

2.11 กระบวนการวิธีที่สมบูรณ์ SIMPLE ^[5]

กระบวนการวิธี SIMPLE นั้น ให้คำตอบในการหาค่าความดันและความเร็วโดยกระบวนการวิธีทำซ้ำ ดังนั้นหากมีประมาณสเกลลาร์อื่นใดที่ผูกติดอยู่กับสมการโมเมนตัม ก็จำเป็นต้องทำการ

คำนวณเป็นลำดับและวนกลับมาทำการคำนวณซ้ำอีก จนกระทั่งคำตอบทั้งหมดคู่เข้า ซึ่งทำให้ได้ Flow chart ไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลำดับขั้นตอนการคำนวณวิธี SIMPLE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

3.1 คำอธิบายการทดลอง

จากการทดลองของ Reynolds พบว่าการไหลในท่อจะมีลักษณะการไหลขึ้นอยู่กับกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า Reynolds number, Re โดยที่การไหลที่ Re ต่ำๆ ลักษณะของการไหลจะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกรวมการไหลแบบนี้ว่า Laminar flow เมื่อ Re มีค่าสูงมากขึ้น (ในการไหลปกติ ผนังมีความเรียบน้อยเมื่อ $Re > 2,000$ การไหลจะเปลี่ยน) ลักษณะการไหลจะเปลี่ยนไป กล่าวคือลักษณะของการไหลมีลักษณะยุ่งเหยิง ซึ่งเรียกรวมการไหลในช่วงนี้ว่า Turbulent flow

สำหรับการไหลภายในท่อตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการไหลคือลักษณะของท่อ ซึ่งลักษณะของท่อที่ทำการศึกษาในครั้งนี้คือท่อน้ำตัดวงกลม ท่อน้ำตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า ท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (1:2) ในการศึกษาได้แบ่งเป็น 3 ตอน

ตอนที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากโปรแกรมกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี สำหรับการไหลในท่อน้ำตัดวงกลม

ตอนที่ 2 สร้างแบบจำลองท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันแต่ลักษณะหน้าตัดต่างกันประกอบด้วย ท่อน้ำตัดวงกลม ท่อน้ำตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า ท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า(1:2) ที่มีค่าความยาวเชิงคุณลักษณะต่างๆ ได้แก่ D_h \sqrt{A} A_{eq} แล้วทำนายผลแบบจำลองที่ค่า Re 1,000 10,000 และ 100,000 ด้วยโปรแกรมที่สภาวะเดียวกัน

3.2 ขั้นตอนการทำงานทดลอง

ตารางที่ 3.1 สรุบบางแบบจำลองที่ใช้ในการจำลอง

แบบจำลองที่	หน้าตัด	Reynold number	ความเร็ว (m/s)	L_c
1	Circle	1000	0.0200	A_{eq}
2	Circle	10000	0.2000	A_{eq}
3	Circle	100000	2.0000	A_{eq}
4	Rectangle	1000	0.0400	A_{eq}
5	Rectangle	10000	0.4000	A_{eq}
6	Rectangle	100000	4.0000	A_{eq}
7	Square	1000	0.0200	A_{eq}
8	Square	10000	0.2000	A_{eq}
9	Square	100000	2.0000	A_{eq}
10	Triangle	1000	0.0200	A_{eq}
11	Triangle	10000	0.2000	A_{eq}
12	Triangle	100000	2.0000	A_{eq}
13	Circle	1000	0.0200	D_h
14	Circle	10000	0.2000	D_h
15	Circle	100000	2.0000	D_h
16	Rectangle	1000	0.0240	D_h
17	Rectangle	10000	0.2400	D_h
18	Rectangle	100000	2.4000	D_h
19	Square	1000	0.0226	D_h
20	Square	10000	0.2260	D_h
21	Square	100000	2.2600	D_h
22	Triangle	1000	0.0257	D_h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) สรุบบนแบบจำลองที่ใช้ในการจำลอง

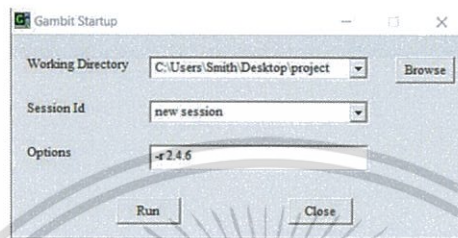
แบบจำลองที่	หน้าตัด	Reynold number	ความเร็ว (m/s)	L_c
23	Triangle	10000	0.2570	D_h
24	Triangle	100000	2.5700	D_h
25	Circle	1000	0.0226	\sqrt{A}
26	Circle	10000	0.2260	\sqrt{A}
27	Circle	100000	2.2600	\sqrt{A}
28	Rectangle	1000	0.0226	\sqrt{A}
29	Rectangle	10000	0.2260	\sqrt{A}
30	Rectangle	100000	2.2600	\sqrt{A}
31	Square	1000	0.0226	\sqrt{A}
32	Square	10000	0.2260	\sqrt{A}
33	Square	100000	2.2600	\sqrt{A}
34	Triangle	1000	0.0226	\sqrt{A}
35	Triangle	10000	0.2260	\sqrt{A}
36	Triangle	100000	2.2600	\sqrt{A}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 1 การสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองที่ 1 ท่อน้ำตัดวงกลม

1. เลือก start/All Programs/Fluent Inc Products/Gambit 2.4.6/Gambit 2.4.6 จะเห็นหน้าต่าง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หน้าต่างก่อนการเข้าโปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 1

2. เลือก Working Directory และ Session Id ตามที่ต้องการ แล้วเลือก Run จะเห็นหน้าต่าง

ดังรูปที่ 3.2

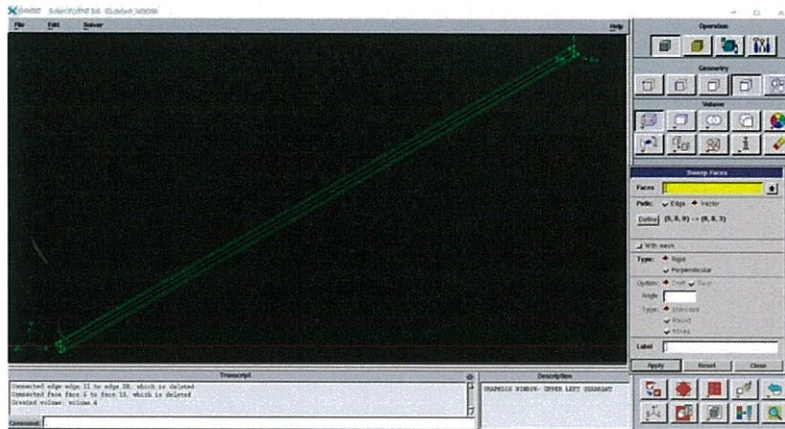


รูปที่ 3.2 โปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 1

3. สร้างปริมาตรทรงกระบอกที่มีรัศมี 0.025 หน่วย ยาว 3 หน่วย โดยเลือก Operation/ Geometry Volume/ Create Real Cylinder กำหนด Height เท่ากับ 3 กำหนด Radius 1 และ Radius 2 เท่ากับ 0.025 กำหนด Axis Location เป็น Positive Z แล้วเลือก Apply

สร้างเส้นตรงลงบนพื้นผิวของทรงกระบอก โดยเลือก Operation/Geometry/Edge/Create Straight Edge กำหนด Vertices เป็น vertex.1 และ vertex.2 แล้วเลือก Apply แสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

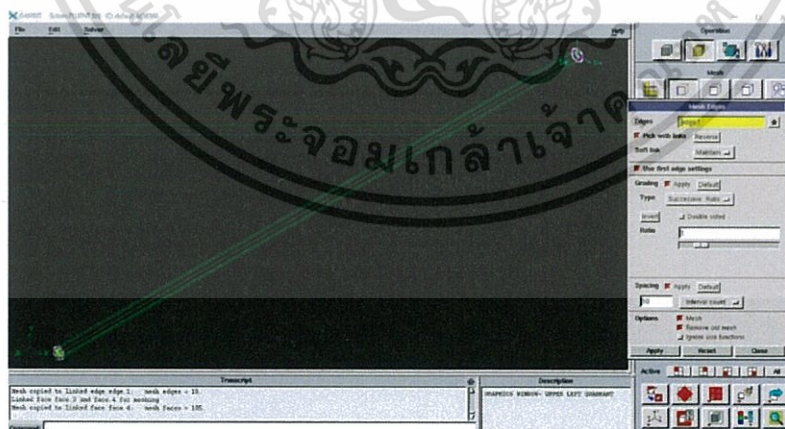


รูปที่ 3.3 แบบจำลองที่ 1 ทรงกระบอกที่มีรัศมี 0.025 หน่วย ยาว 3 หน่วย

ส่วนที่ 2 การสร้างกริด (Grid Generation or Mesh Generation)

1. การสร้างกริดบนเส้นขอบ

เลือก Operation/Mesh/Edge/Mesh Edges เลือกเส้นขอบ edge.1 กำหนดชนิดเป็น Successive Ratio กำหนด Ratio เป็น 1 กำหนด Spacing เป็น Interval count เท่ากับ 10 แล้วเลือก Apply แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบจำลองที่ 1 ที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสร้างกริดบนพื้นผิว

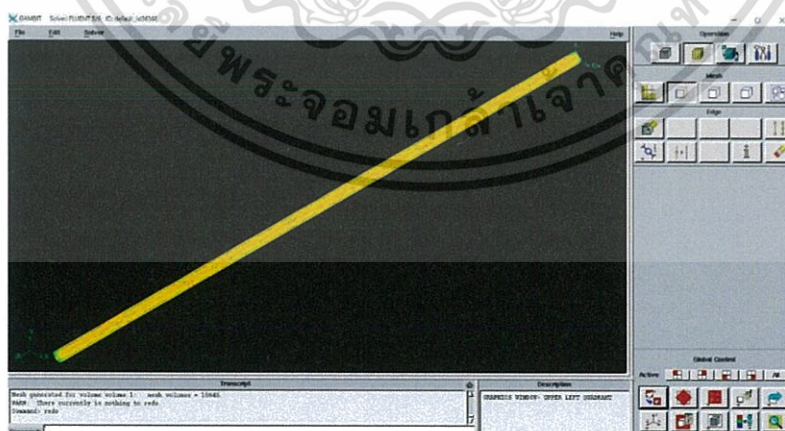
เลือก Operation/Mesh/Face/Mesh Faces เลือก Faces คือ face.1 กำหนด Elements เป็น Quad และ Type เป็น Pave กำหนด Spacing เป็น Interval size เท่ากับ 0.25 แล้วเลือก Apply แสดงดัง รูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบจำลองที่ 1 ที่มีการสร้างกริดบนพื้นผิว

3. การสร้างกริดในปริมาตร

เลือก Operation/Mesh/Volume/Mesh Volumes เลือก Volumes คือ volume.1 กำหนด Elements เป็น Hex/Wedge และ Type เป็น Cooper แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการสร้าง กริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบจำลองที่ 1 ที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การกำหนด Boundary และ Continuum

4.1 เลือก Operation/Zones/Specify Boundary Types เลือกพื้นผิว face.1 กำหนด Name เป็น Inlet พร้อมกำหนด Type เป็น VELOCITY INLET แล้วเลือก Apply

4.2 เลือกพื้นผิว face.3 กำหนด Name เป็น Outlet พร้อมกำหนด Type เป็น PRESSURE OUTLET แล้วเลือก Apply

4.3 เลือกพื้นผิว face.2 กำหนด Name เป็น Wall พร้อมกำหนด Type เป็น WALL แล้วเลือก Apply

4.4 เลือก Zones/Specify Continuum Types เลือกปริมาตร volume.1 กำหนด Name เป็น Fluid พร้อมกำหนด Type เป็น FLUID แล้วเลือก Apply

5. การบันทึกข้อมูล

เลือก File/Save As จะเห็นหน้าต่างดังรูปที่ 3.7



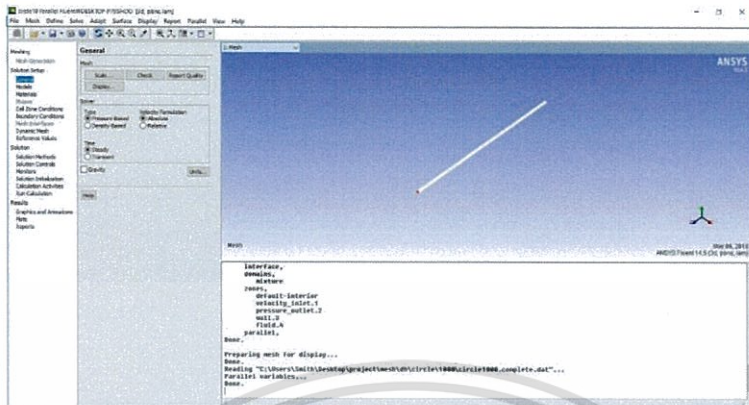
รูปที่ 3.7 หน้าต่างการบันทึกข้อมูลสำหรับแบบจำลองที่ 1

พิมพ์ ID ตามต้องการ แล้วเลือก Accept

6. การบันทึก Mesh เพื่อส่งไปคำนวณในโปรแกรม Fluent 12.0.16

เลือก File/Export/Mesh ตรวจสอบ File Name ว่าถูกต้องหรือไม่ ถ้าถูกต้องแล้วเลือก Accept

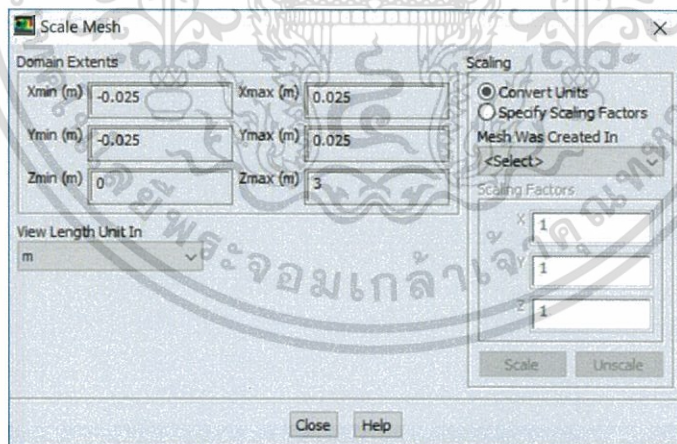
4. เลือกไฟล์ (.msh) ที่บันทึกเอาไว้แล้วเลือก OK โปรแกรมจะแสดงแบบจำลองที่เลือกดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แบบจำลองที่จะนำมาคำนวณ โดยโปรแกรม Fluent 12.0.16

5. เลือก General/Mesh/Check โปรแกรมจะทำการตรวจสอบแบบจำลองที่เลือก

6. เลือก General/Mesh/Scale กำหนดขนาดแบบจำลอง เนื่องจากโปรแกรม Gambit 2.4.6 ไม่มีหน่วยตั้งนั้นก่อนทำการคำนวณต้องกำหนดหน่วยของแบบจำลองก่อน ด้วยการเลือก Mesh Was Created In เป็น m แล้วเลือก Scale โปรแกรมจะคำนวณขนาดของแบบจำลอง แสดงดังรูป 3.12 แล้วเลือก Close



รูปที่ 3.12 หน้าต่างการกำหนดขนาดของแบบจำลอง

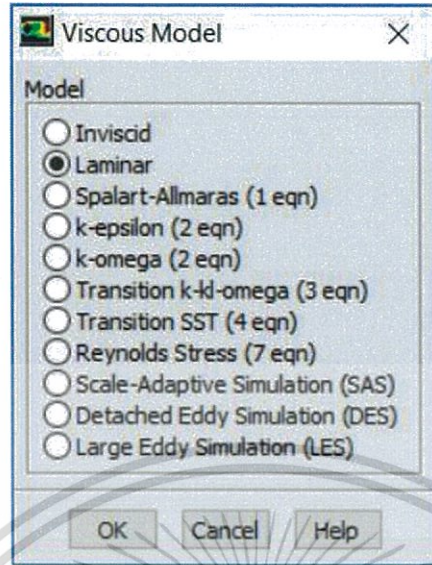
7. เลือก General Mesh เลือก Gravity กำหนด Gravity แกน y เท่ากับ -9.8 m/s^2

8. ตั้งค่าสมการที่ใช้ในการจำลอง

8.1 เลือก Models/Viscous-laminar โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ หลังจากนั้นเลือก

Laminar แล้วเลือก OK

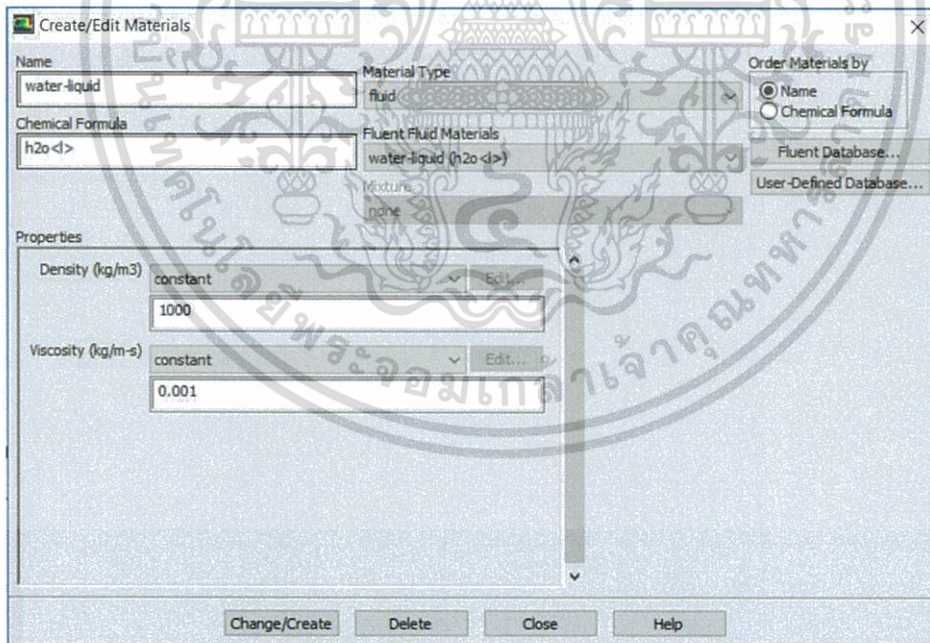
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 หน้าต่างแสดงการเลือกสมการการไหล

9. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุโดยเลือก Materials/Create/Edit โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่

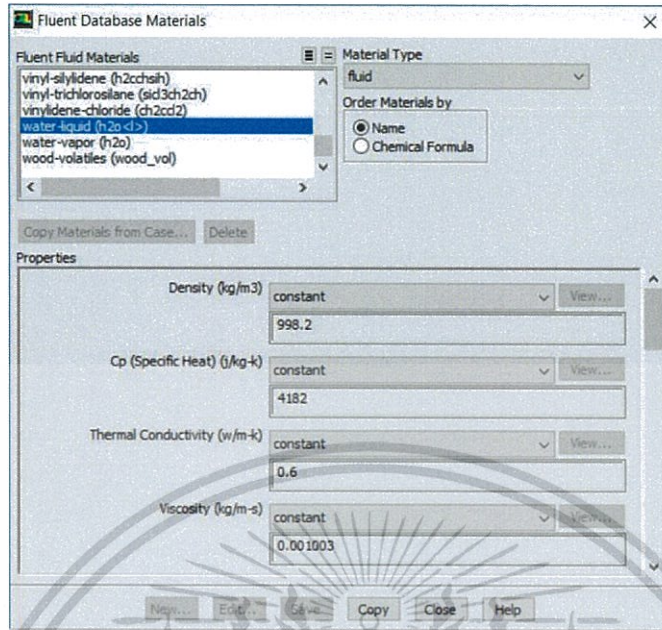
3.14



รูปที่ 3.14 แสดงหน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

เลือก FLUENT Database โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.15

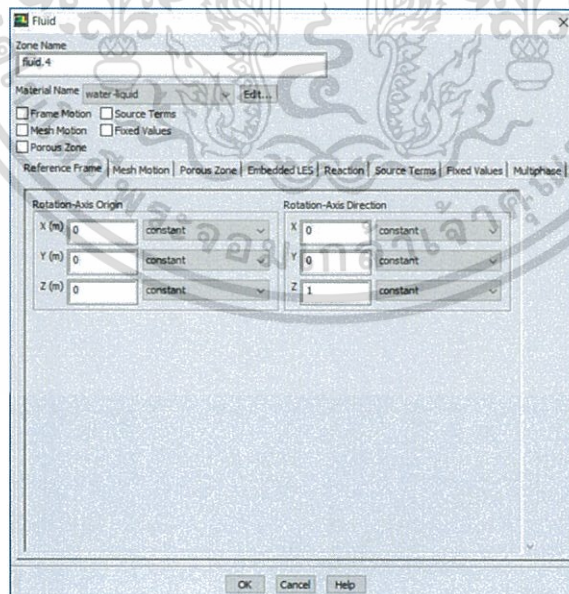
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 หน้าต่างแสดงหน้า FLUENT Database Materials

ให้เลือก FLUENT Fluid Materials เป็น water-vapor (h2o) แล้วเลือก Copy แล้วเลือก Close

10. กำหนดชนิดของไหล เลือก Cell Zone Conditions โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.16 ให้เปลี่ยน Material name เป็น water-vapor แล้วเลือก OK



รูปที่ 3.16 แสดงหน้าต่างการกำหนดชนิดของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. การกำหนด Solution Methods

เลือก Solution Method แล้วกำหนดวิธีการคำนวณหาค่าตอบตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การกำหนด Solution Methods

Pressure-Velocity Coupling	Scheme	SIMPLE
Spatial Discretization	Gradient	Least Squares Cell Based
	Pressure	Standard
	Momentum	Second Order Upwind
	Energy	Second Order Upwind

12. กำหนด Solution Controls

เลือก Solution Controls แล้วกำหนด Under-Relaxation Factors ตามตารางที่ 3.3

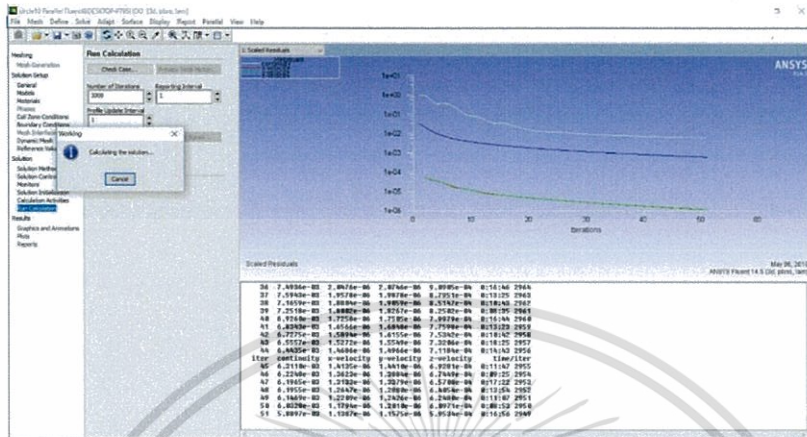
ตารางที่ 3.3 ค่า Under-Relaxation Factors

Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.7
Energy	1

13. เลือก Solution Initialization กำหนด Compute from ให้เป็น Inlet แล้วเลือก Initialize

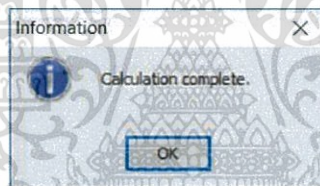
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. เลือก Run Calculation กำหนดค่า Number of Iterations เท่ากับ 3,000 แล้วเลือก Calculate โปรแกรมก็จะเริ่มทำการคำนวณ แสดงการคำนวณของโปรแกรกดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงการคำนวณของโปรแกรม Fluent, 12.0.16

เมื่อการคำนวณเสร็จสิ้น โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 หน้าต่างแสดงการคำนวณเสร็จสิ้น

15. เลือก File/Write/case & Data พิมพ์ชื่อตามที่ต้องการแล้วเลือก OK

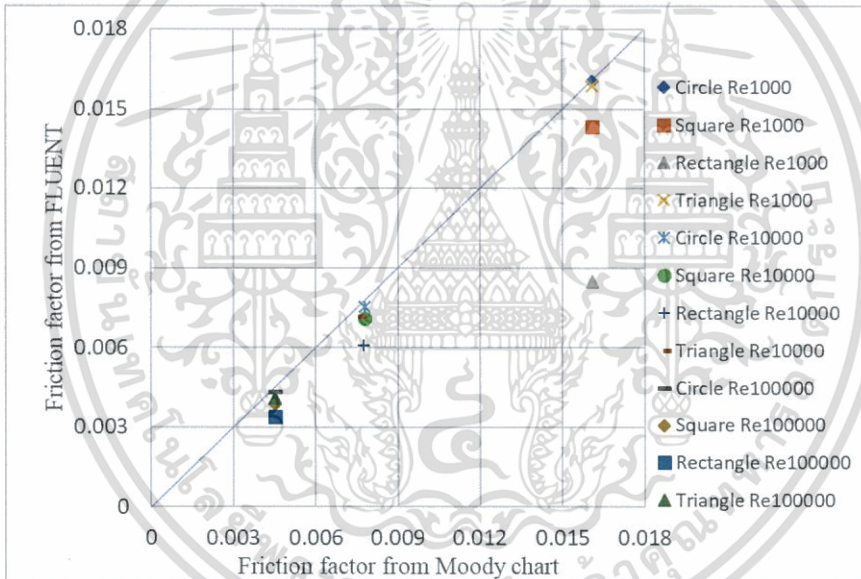
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

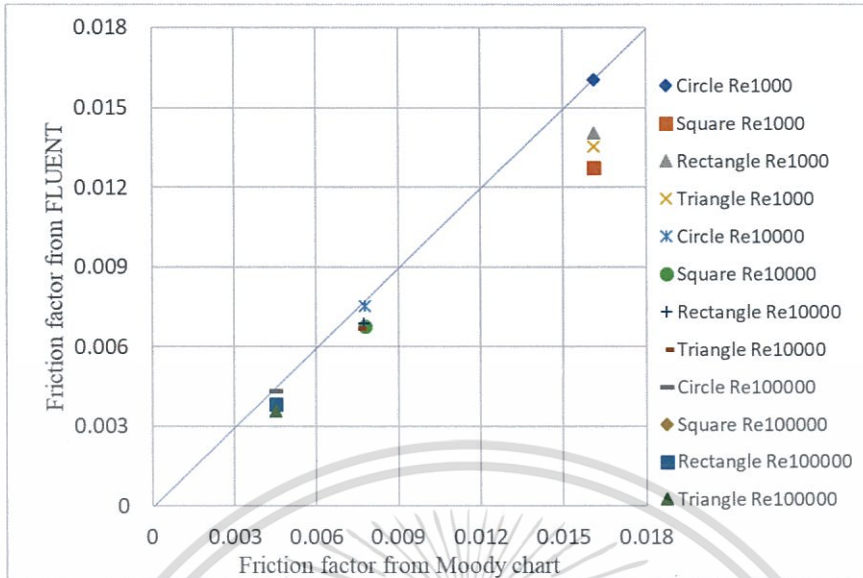
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดลอง

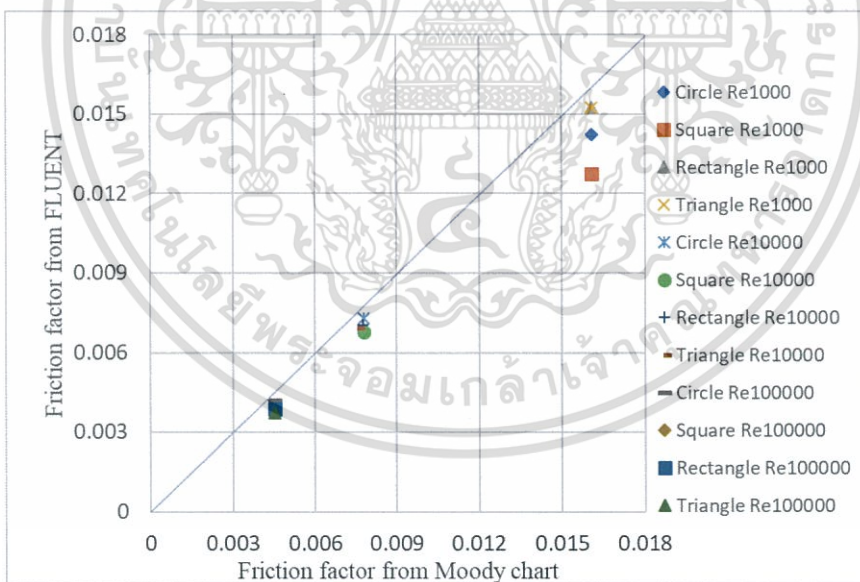
จากการศึกษารูปแบบการไหลภายในท่อที่จำลองด้วยเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล โดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้แบบจำลองทั้ง 36 แบบ ซึ่งเป็นผลจากการใช้ค่าความยาวเชิงคุณลักษณะต่างๆ ได้แก่ D_h \sqrt{A} A_{eq} ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบแสดงได้ดังในรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้ A_{eq}



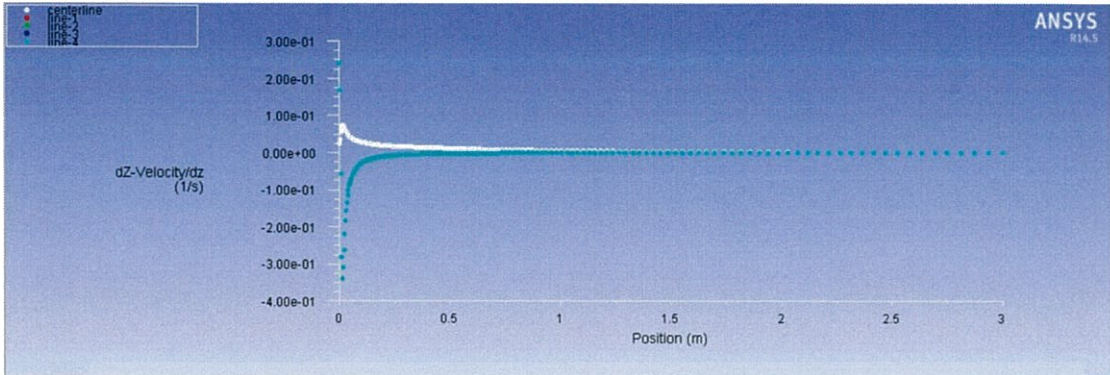
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้ D_h



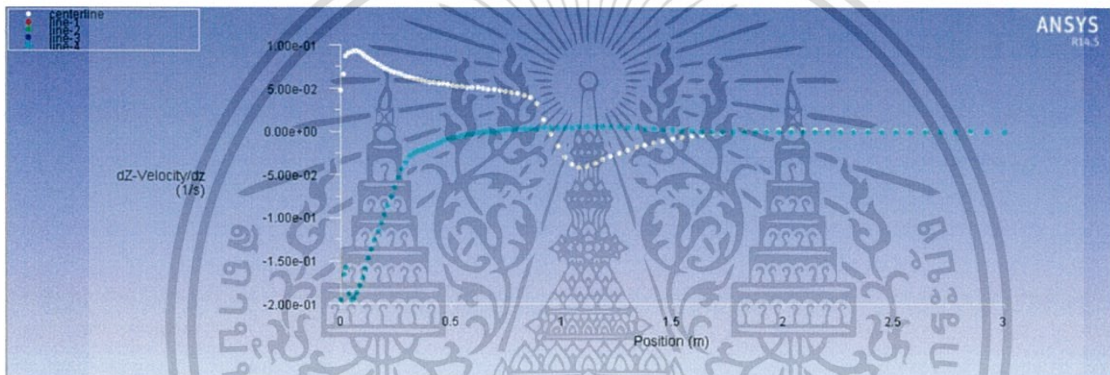
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้ \sqrt{A}

นอกจากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมยังได้เปรียบเทียบ Entrance length ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมแสดงได้ดังในรูป

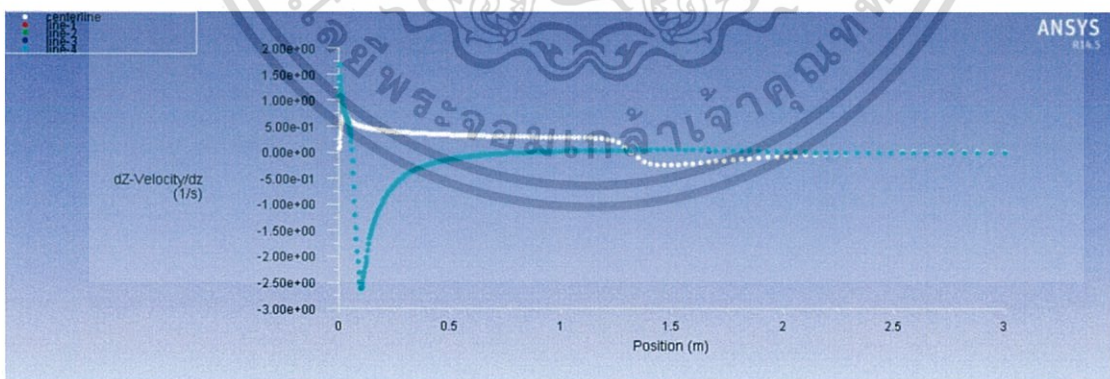
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 1 A_{eq} Circle1000

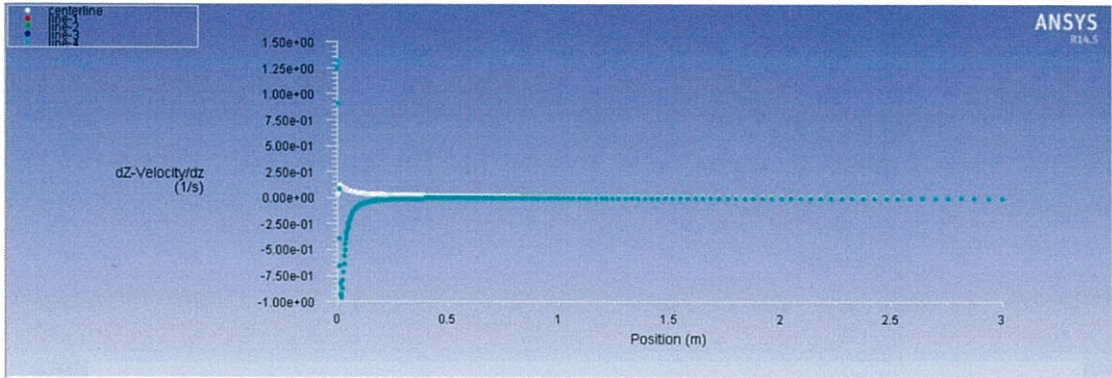


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 2 A_{eq} Circle10000

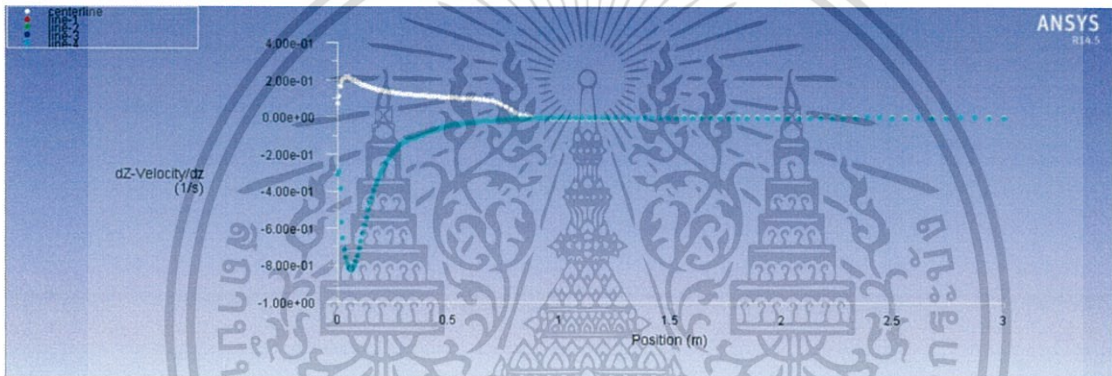


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 3 A_{eq} Circle100000

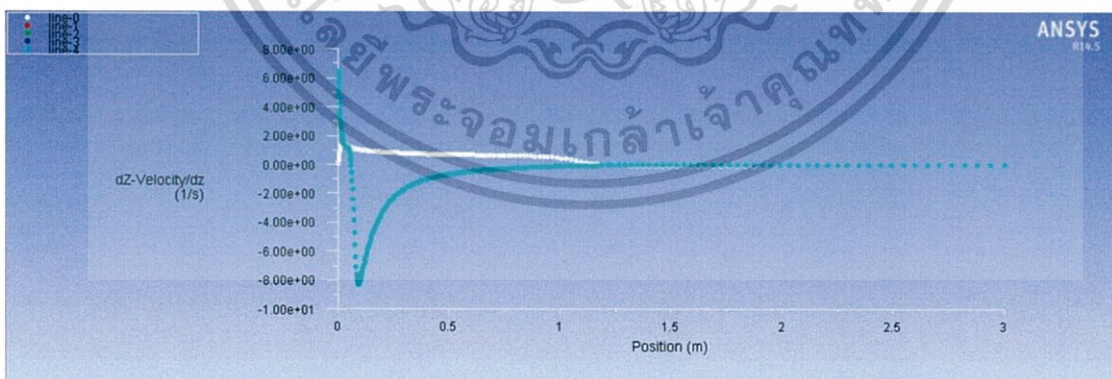
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับความชันของความเร็วนในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 4 A_{eq} Rectangle1000

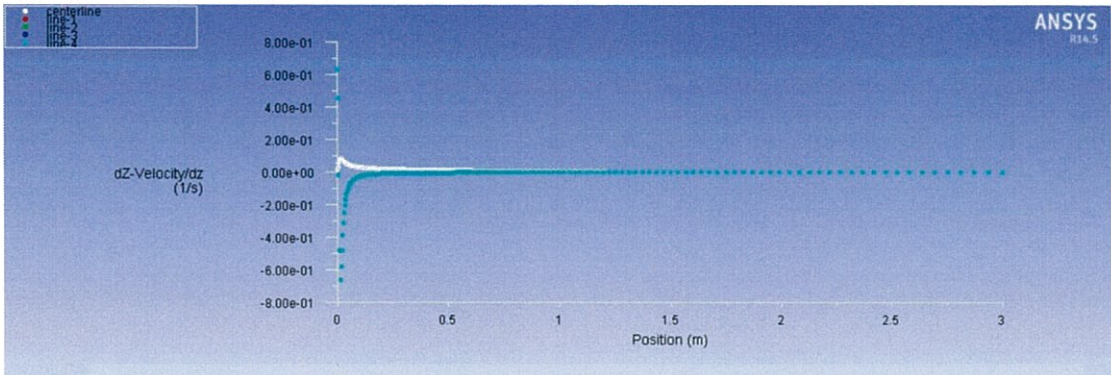


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับความชันของความเร็วนในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 5 A_{eq} Rectangle10000

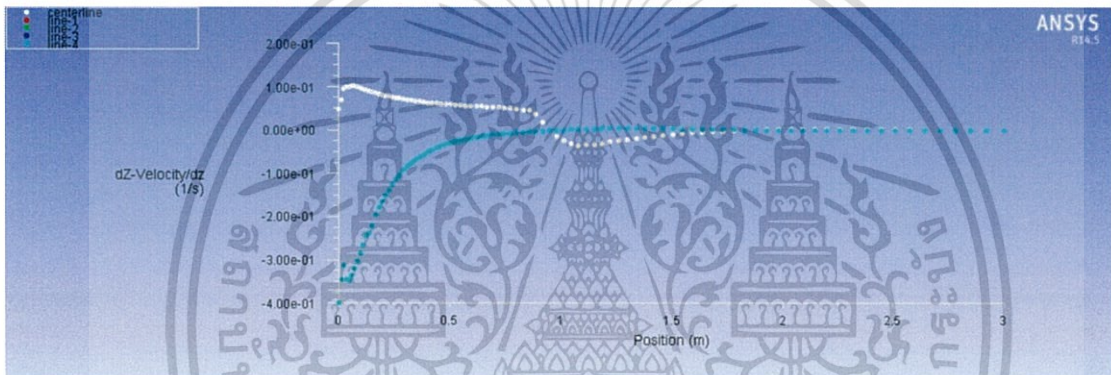


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับความชันของความเร็วนในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 6 A_{eq} Rectangle100000

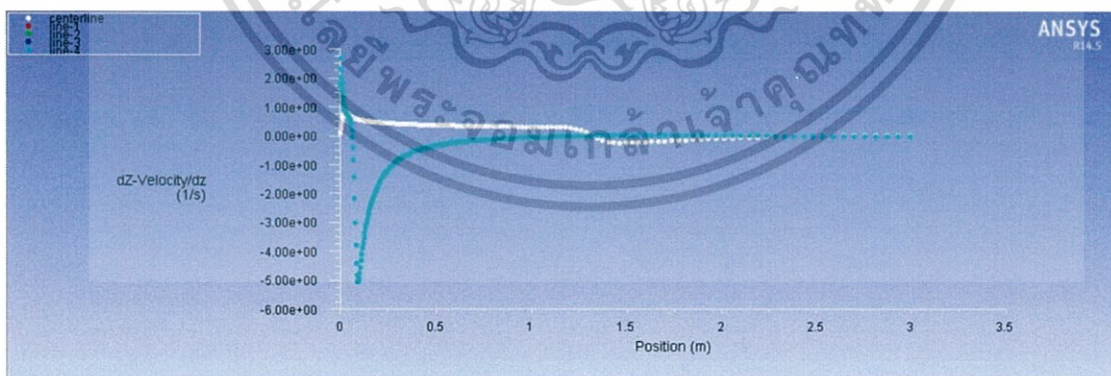
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับความยาวที่อนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 7 A_{eq} Square1000

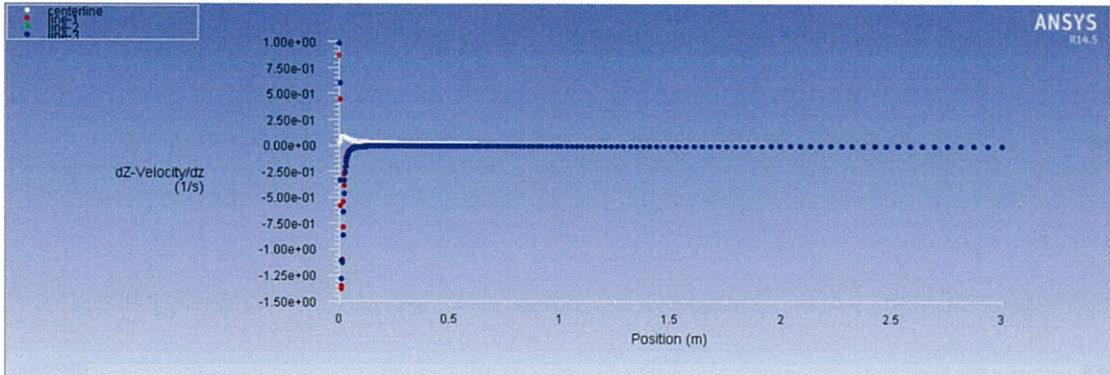


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับความยาวที่อนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 8 A_{eq} Square10000

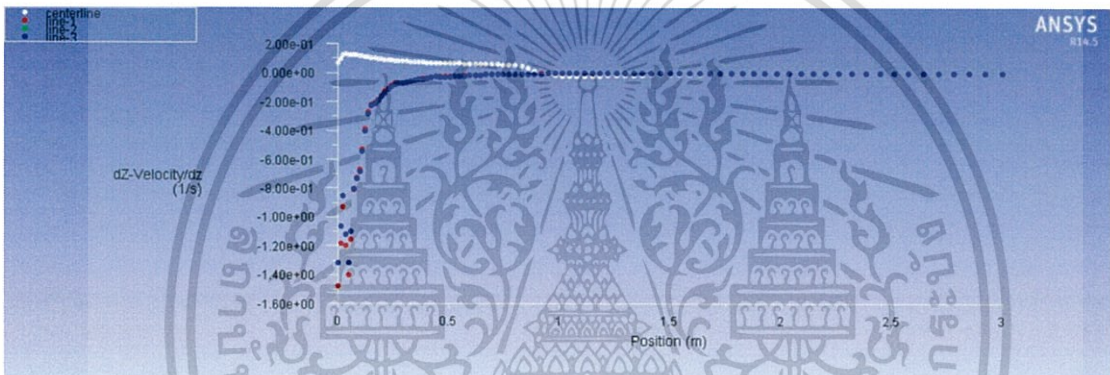


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับความยาวที่อนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 9 A_{eq} Square100000

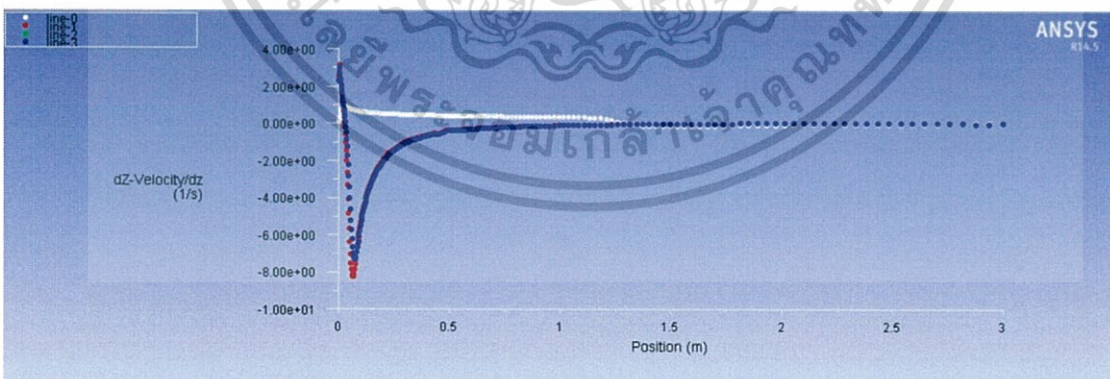
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ก่อบอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 10 A_{eq} Triangle1000

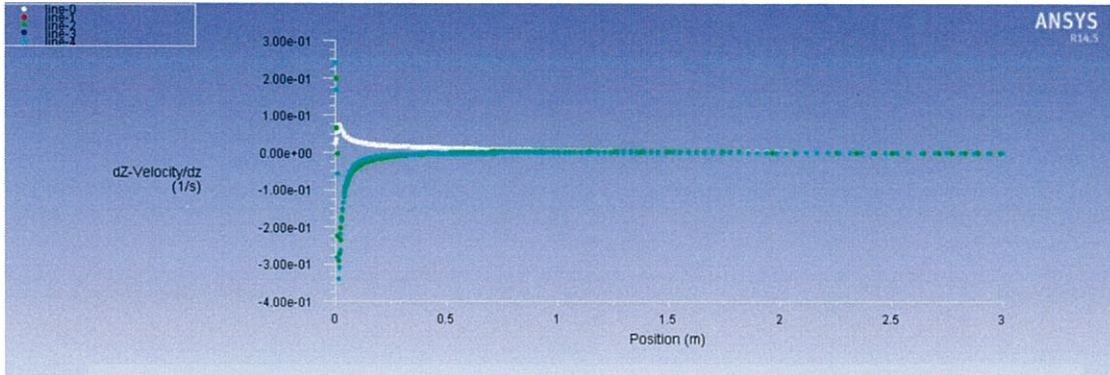


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ก่อบอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 11 A_{eq} Triangle10000

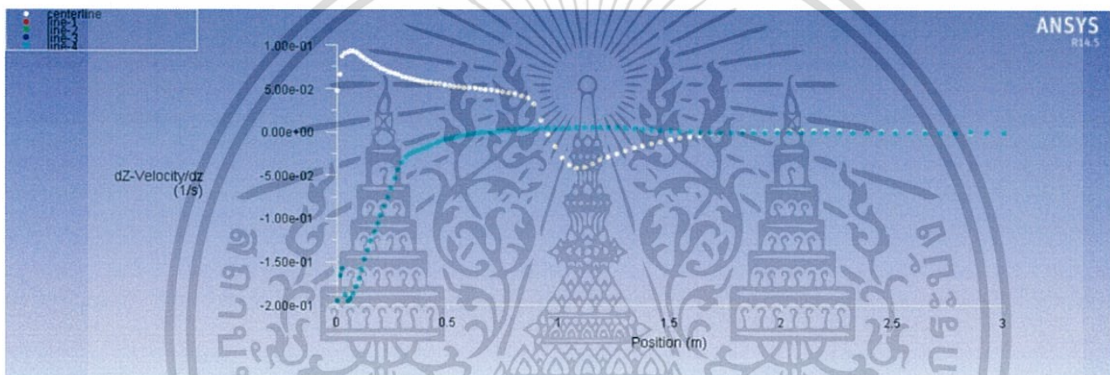


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ก่อบอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 12 A_{eq} Triangle100000

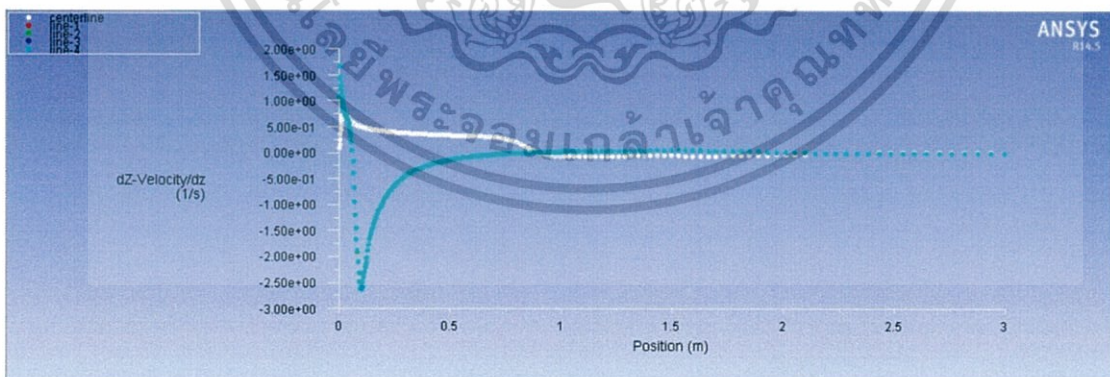
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 13 D_h Circle1000

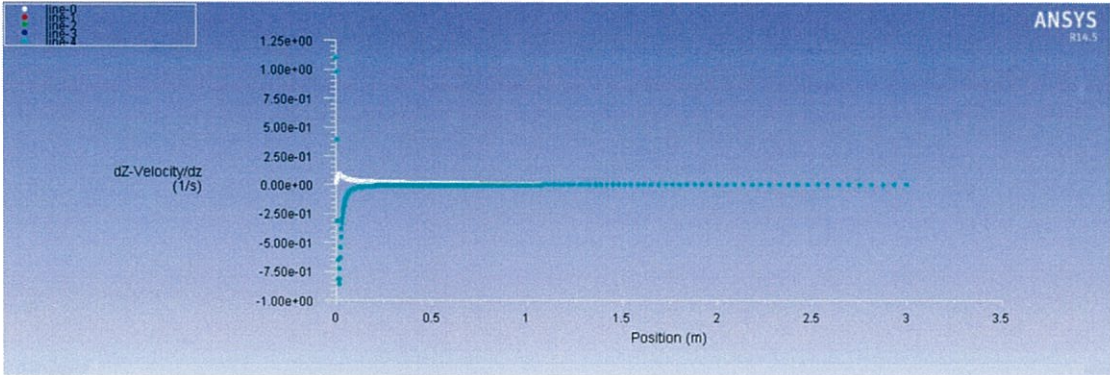


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 14 D_h Circle10000

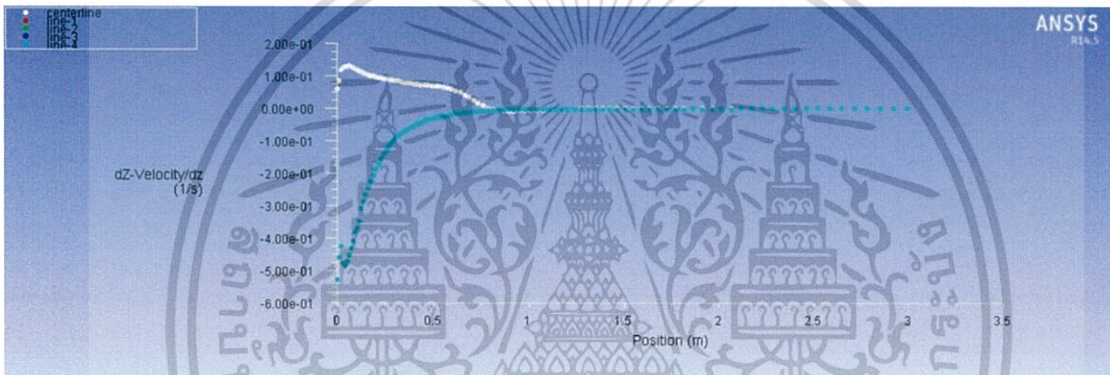


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 15 D_h Circle100000

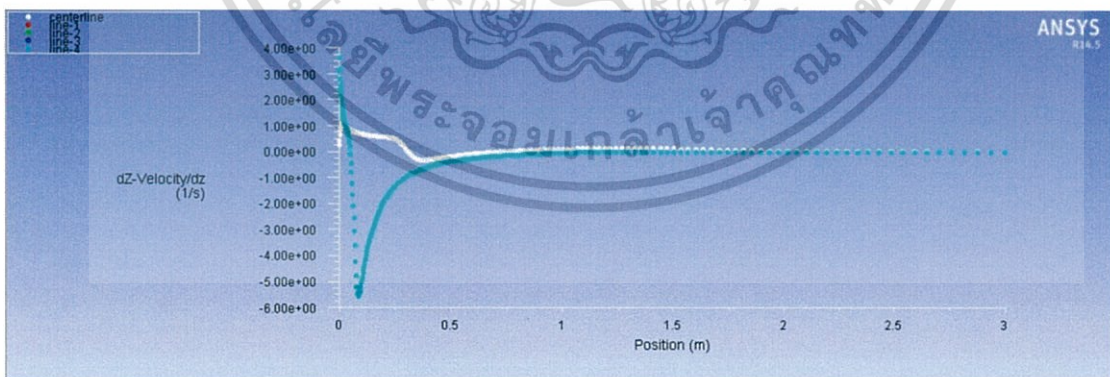
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 16 D_h Rectangle1000

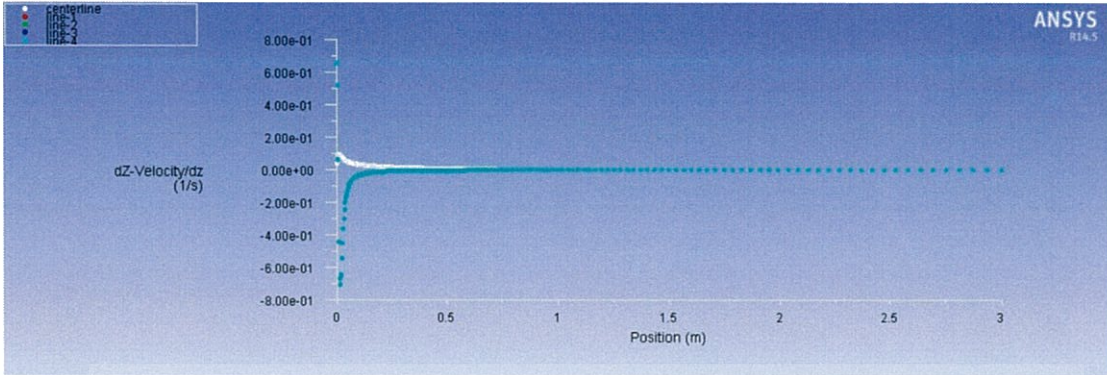


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 17 D_h Rectangle10000

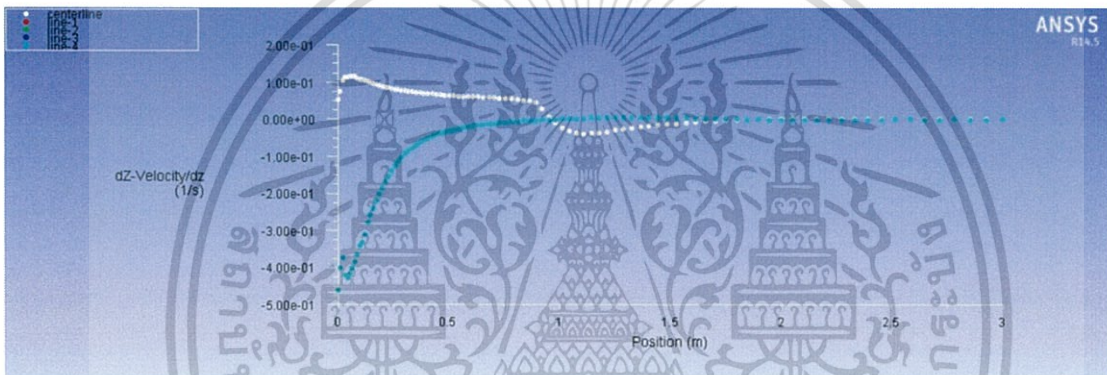


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 18 D_h Rectangle100000

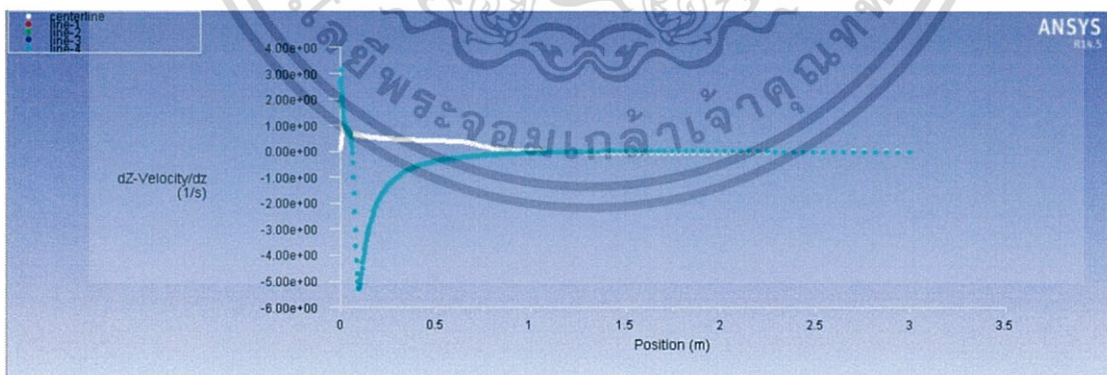
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 19 D_h Square1000

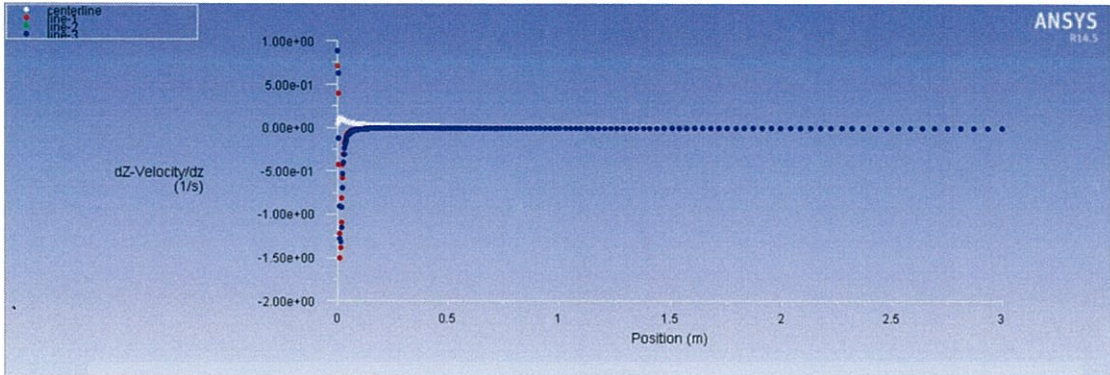


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 20 D_h Square10000

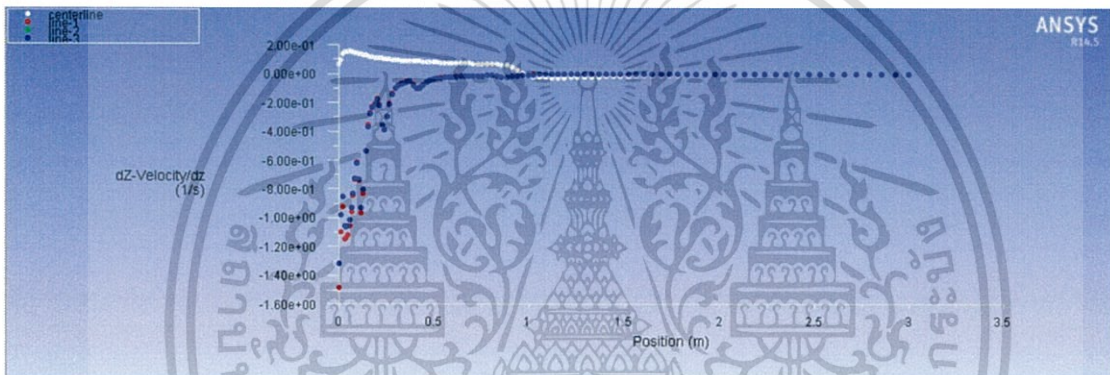


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 21 D_h Square100000

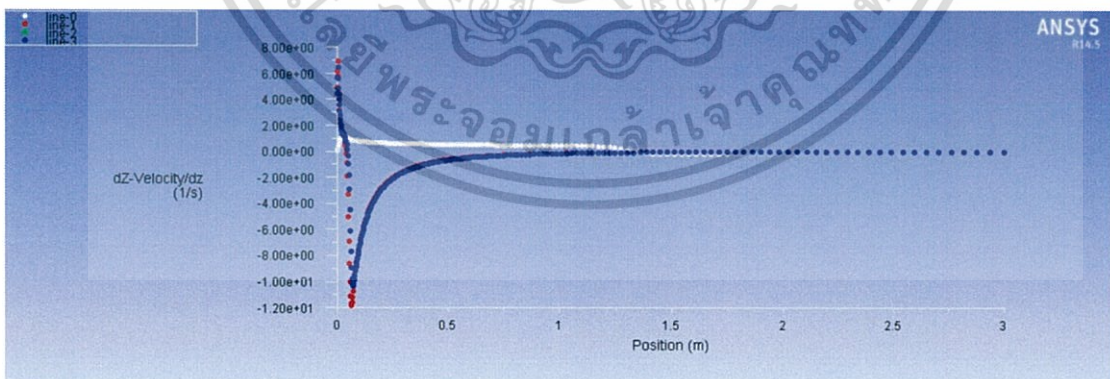
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ก่อบอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 22 D_h Triangle1000

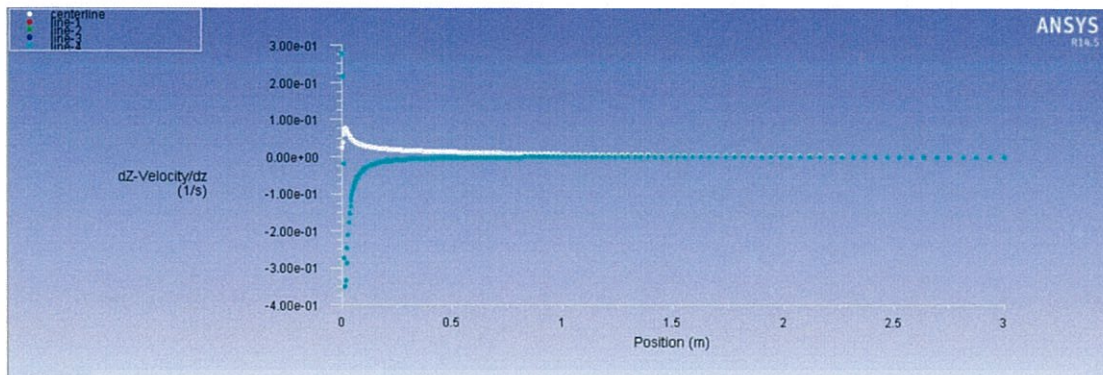


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ก่อบอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 23 D_h Triangle10000

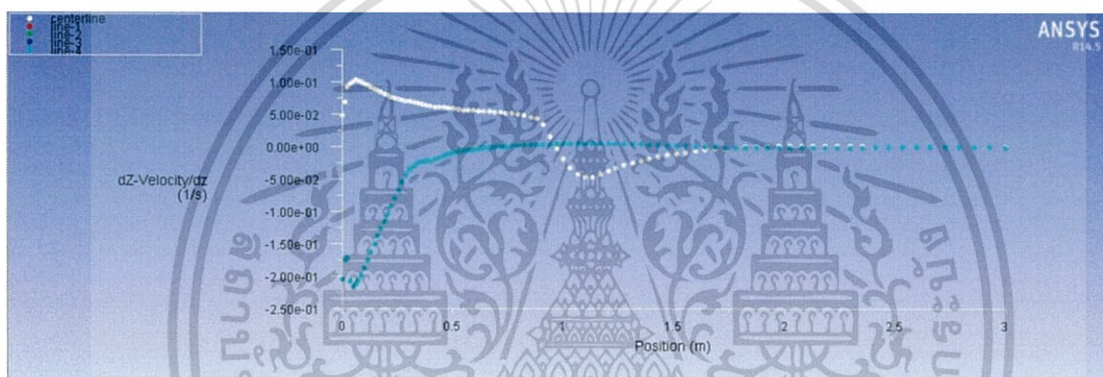


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ก่อบอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 24 D_h Triangle100000

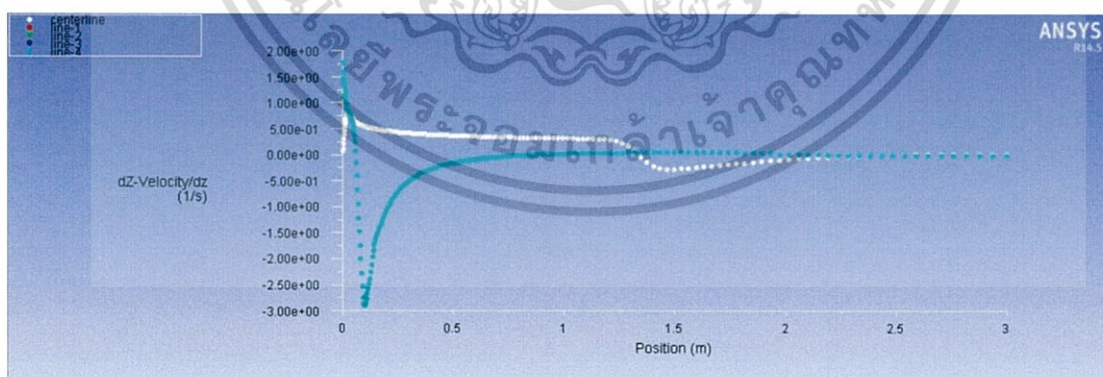
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ก่อกวนพื้นที่ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ $25 \sqrt{A}$ Circle1000

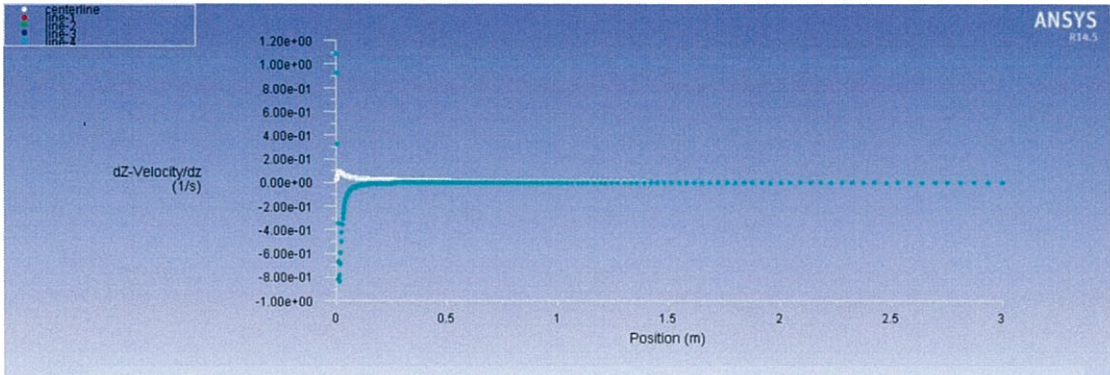


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ก่อกวนพื้นที่ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ $26 \sqrt{A}$ Circle10000

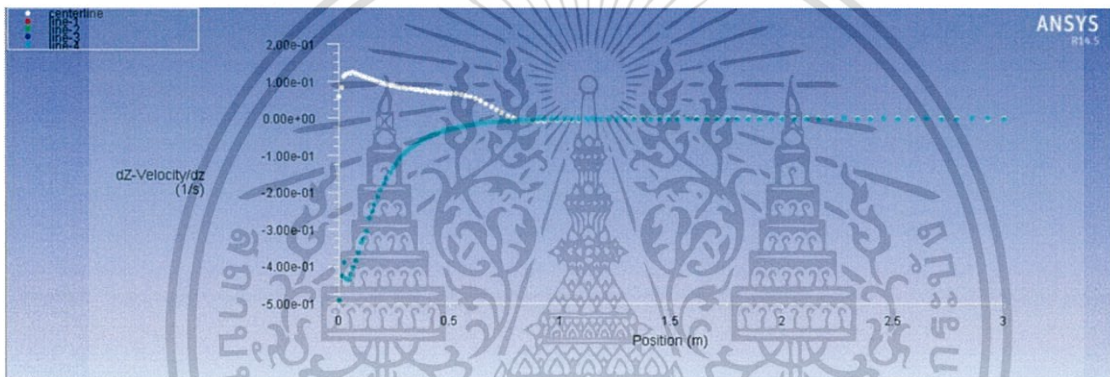


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ก่อกวนพื้นที่ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ $27 \sqrt{A}$ Circle100000

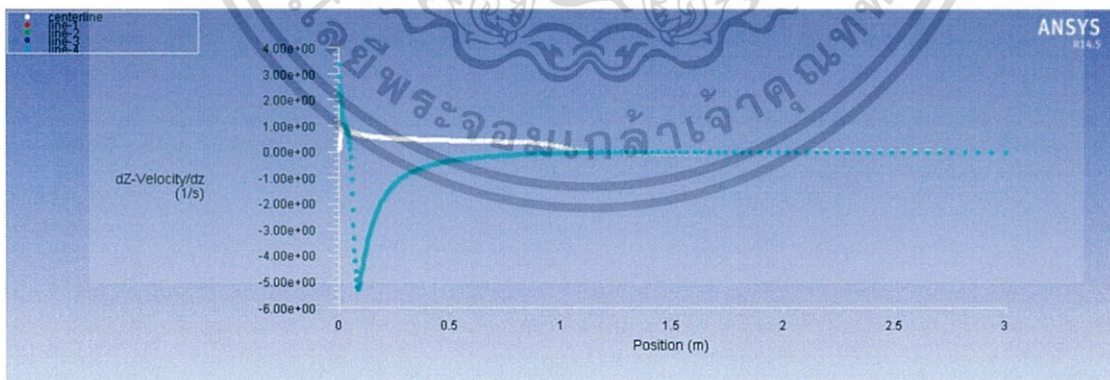
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ก่อบนพื้นที่ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ $28 \sqrt{A}$ Rectangle1000

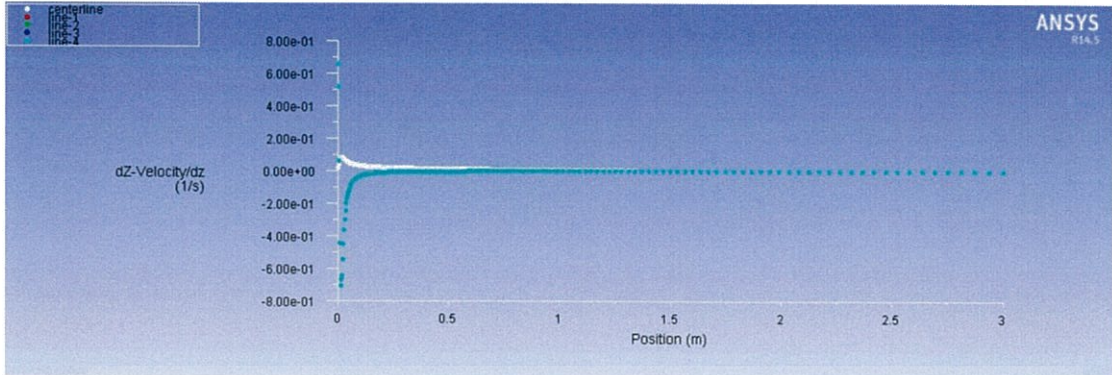


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ก่อบนพื้นที่ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ $29 \sqrt{A}$ Rectangle10000

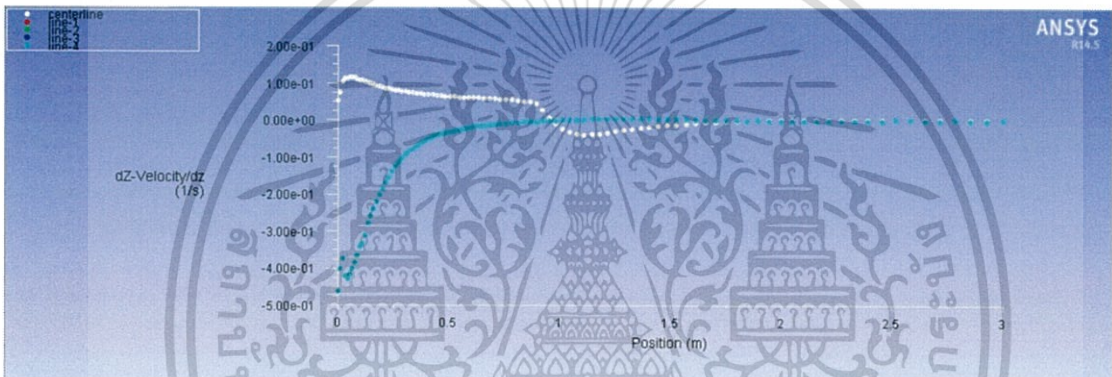


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ก่อบนพื้นที่ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ $30 \sqrt{A}$ Rectangle100000

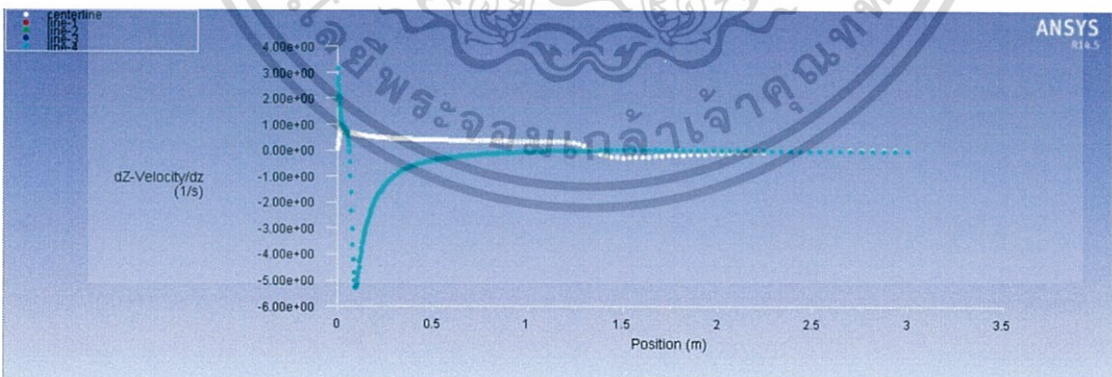
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ถักกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 31 \sqrt{A} Square1000

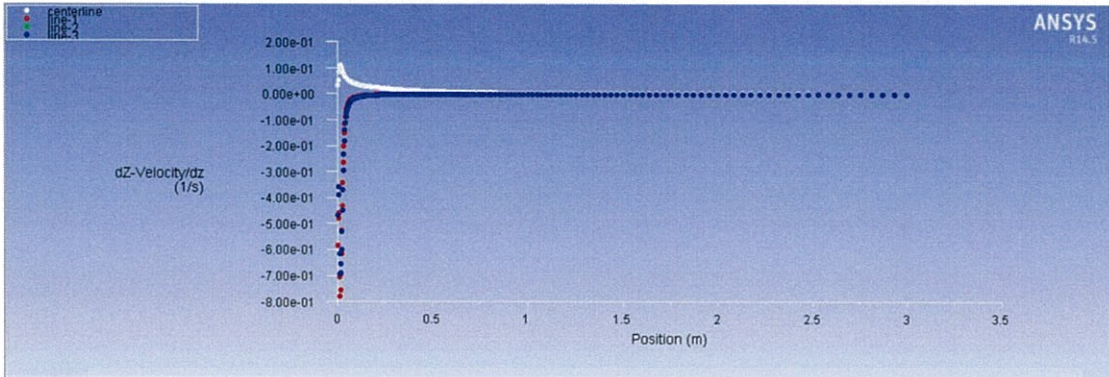


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ถักกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 32 \sqrt{A} Square10000

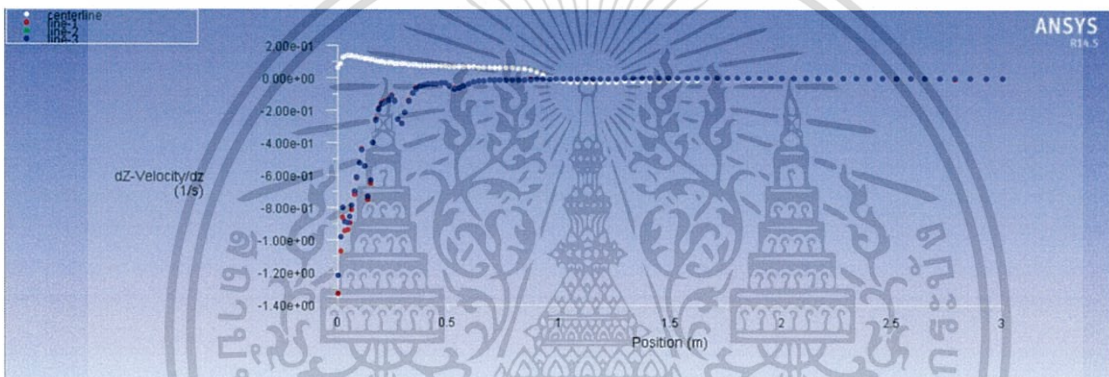


รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ถักกับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ 33 \sqrt{A} Square100000

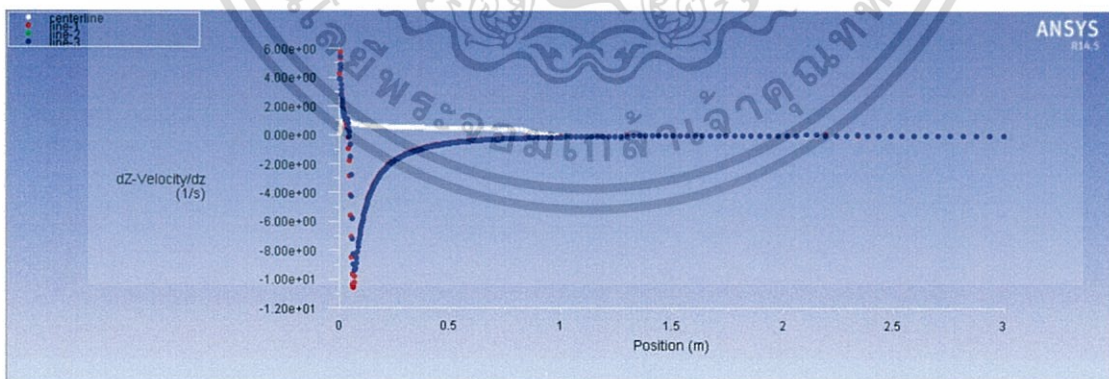
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่อยู่กับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ $34 \sqrt{A}$ Triangle1000

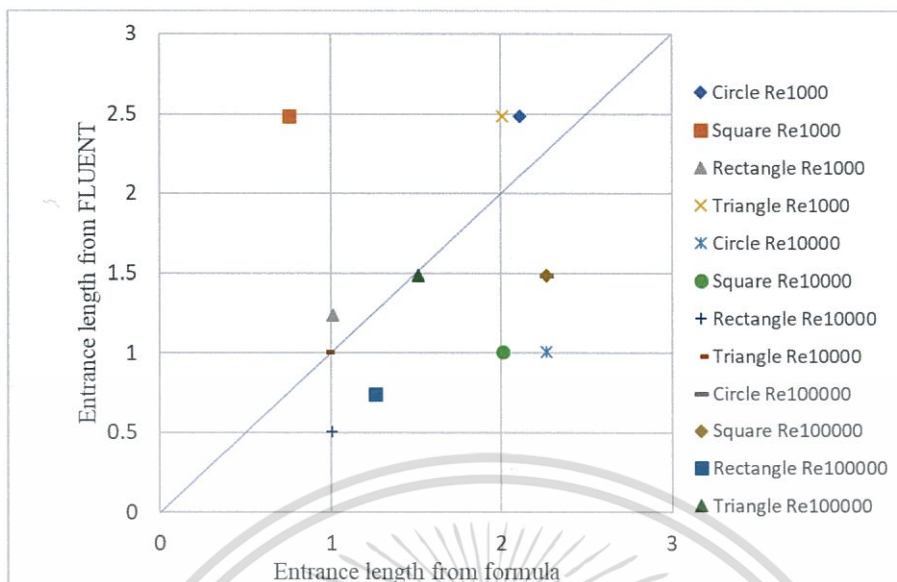


รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่อยู่กับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ $35 \sqrt{A}$ Triangle10000



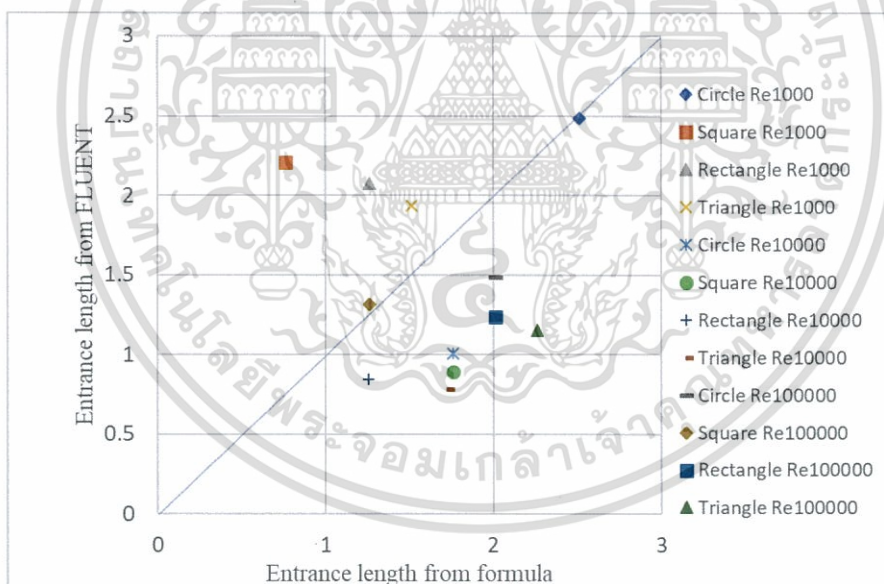
รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่อยู่กับอนุพันธ์ของความเร็วในแนวแกน Z ของแบบจำลองที่ $36 \sqrt{A}$ Triangle100000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 การเปรียบเทียบค่า Entrance length ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับ

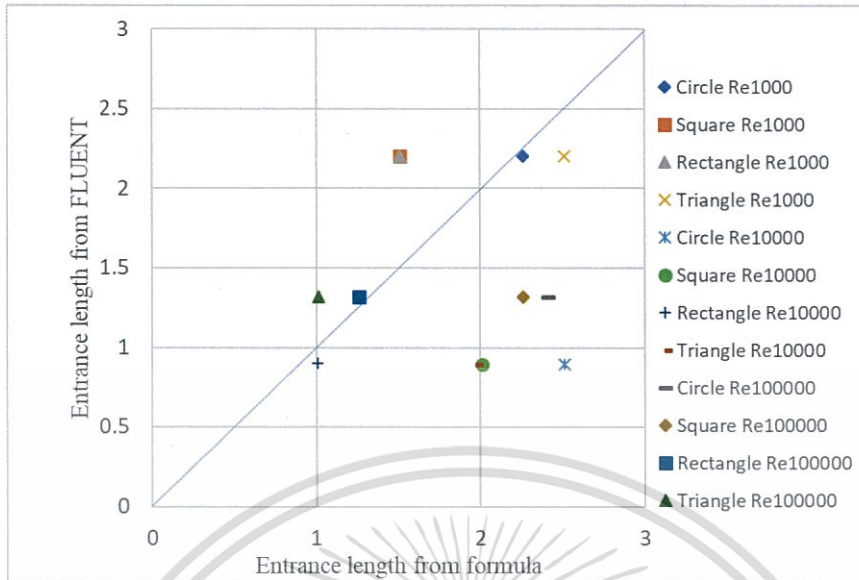
ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้ A_{eq}



รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบค่า Entrance length ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับ

ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้ D_h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบค่า Entrance length ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมโดยใช้ \sqrt{A}

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.1 ที่ $Re = 10,000$ และ $100,000$ ข้อมูลมีการเกาะกลุ่มกันแต่ที่ $Re = 1,000$ สำหรับท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีการเบี่ยงเบน จากรูปที่ 4.2 ที่ $Re = 10,000$ และ $100,000$ ข้อมูลมีการเกาะกลุ่มกันแต่ที่ $Re = 1,000$ สำหรับท่อที่หน้าตัดไม่ใช่วงกลม ข้อมูลมีการเบี่ยงเบน จากรูปที่ 4.3 ที่ $Re = 1,000$ $10,000$ และ $100,000$ ข้อมูลมีการเกาะกลุ่มกัน

จากรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 สังเกตได้ว่ารูปที่ 4.3 ที่ $Re = 1,000$ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่ารูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ในส่วนของ Entrance length ค่า Entrance length ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทำนายของรูปที่ 4.41 และรูปที่ 4.42 ค่าใกล้เคียงกันและมากกว่ารูปที่ 4.40

เนื่องจากตอนทำการจำลองทำการ validate เฉพาะค่าของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่า Entrance length จึงมีความเบี่ยงเบนไปจากความเป็นจริงมาก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษารูปแบบของการไหลภายในของท่อโดยการสร้างแบบจำลองและคำนวณด้วยเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าทางทฤษฎีนั้นมีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล สามารถทำนายรูปแบบของการไหลภายในของท่อของของไหลได้

จากการจำลองเพื่อศึกษาความยาวเชิงคุณลักษณะทั้ง 3 ตัวได้แก่ D_h , \sqrt{A} , A_{eq} ว่าสามารถแสดงลักษณะทางกายภาพของการไหลภายในท่อและสอดคล้องกับผลการจำลอง โดยรูปทรงที่จำลองได้แก่ ท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจตุรัสและท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (1:2) ที่มีค่าความยาวเชิงคุณลักษณะต่างๆได้แก่ D_h , \sqrt{A} , A_{eq} แล้วทำนายผลแบบจำลองที่ค่า Re 1,000, 10,000 และ 100,000 ด้วยโปรแกรมที่สภาวะเดียวกัน พบว่า \sqrt{A} ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทำนายมีความใกล้เคียงกันมากกว่าการใช้ D_h และ A_{eq} เป็นค่าความยาวเชิงคุณลักษณะ นอกจากนี้ความสอดคล้องของค่า Entrance length ของ D_h และ \sqrt{A} จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทำนายยังมากกว่าของ A_{eq} จึงสรุปได้ว่า \sqrt{A} เหมาะที่จะเป็นค่าความยาวเชิงคุณลักษณะมากที่สุดสำหรับท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจตุรัสและท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

5.2 วิจัยารณผลการทดลอง

5.2.1 เนื่องจากในการทำนายผล ได้ให้คุณสมบัติต่างๆของน้ำมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่ง ทำให้ค่าที่ได้จากการทำนายอาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงได้

5.2.2 เนื่องจากการสร้างกริดที่ไม่สมมาตร อาจทำให้ผลการจำลองที่ได้ไม่มีความสมมาตรกัน ซึ่งทำให้สรุปได้ยากกว่าเป็นผลของปรากฏการณ์ หรือผลของกริดที่ไม่สมมาตรกัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรสร้างแบบจำลองให้มีความยาวมากเพียงพอที่จะทำให้เห็นช่วงที่ความเร็วอยู่ในภาวะพัฒนาเต็มรูปแบบอย่างชัดเจน เพื่อความแม่นยำในการนำผลของการทำนายมาวิเคราะห์

5.3.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มสำหรับต่อหน้าตัดชนิดอื่นๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาการไหลของของไหลภายในท่อ

5.3.3 ควรสร้างกริดที่มีความสมมาตรกัน เพื่อจะได้วิเคราะห์ผลของการจำลองได้แม่นยำยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม


1. Kays, William M. and Michael E. Crawford. Convective Heat and Mass Transfer(Second Edition). New York:McGraw-Hill Book Company, 1980.
2. Le Mehaute. An introduction to hydrodynamics and water waves. New York: Springer Science+Business Media, 1976.
3. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (1995). An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Pearson, England.
4. James R.Welty, Charles E.Wicks and Robert E. Wilson, Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer, Third edition, 1983
5. จารุวัตร เจริญสุข.2552 .เอกสารประกอบการสอนรายวิชา Computational Fluid Dynamics.กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
ตารางเปรียบเทียบค่าได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จาก
การทำนายด้วยโปรแกรม

แบบจำลองที่	หน้าตัด	Reynold number	L_c	f จากทฤษฎี	f จากการจำลอง
1	Circle	1000	A_{eq}	0.016025	0.01612509
2	Circle	10000	A_{eq}	0.0077	0.007609235
3	Circle	100000	A_{eq}	0.00445	0.004408754
4	Rectangle	1000	A_{eq}	0.016025	0.008553354
5	Rectangle	10000	A_{eq}	0.0077	0.006110103
6	Rectangle	100000	A_{eq}	0.00445	0.00347328
7	Square	1000	A_{eq}	0.016025	0.014417355
8	Square	10000	A_{eq}	0.0077	0.007167625
9	Square	100000	A_{eq}	0.00445	0.003930659
10	Triangle	1000	A_{eq}	0.016025	0.01593697
11	Triangle	10000	A_{eq}	0.0077	0.00724842
12	Triangle	100000	A_{eq}	0.00445	0.004160569
13	Circle	1000	D_h	0.016025	0.016125095
14	Circle	10000	D_h	0.0077	0.007609235
15	Circle	100000	D_h	0.00445	0.004408754
16	Rectangle	1000	D_h	0.016025	0.014095052
17	Rectangle	10000	D_h	0.0077	0.006931142
18	Rectangle	100000	D_h	0.00445	0.003912167
19	Square	1000	D_h	0.016025	0.012816755
20	Square	10000	D_h	0.0077	0.006846715
21	Square	100000	D_h	0.00445	0.003820948
22	Triangle	1000	D_h	0.016025	0.013607679

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.1 (ต่อ) เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม

แบบจำลองที่	หน้าตัด	Reynold number	L_c	f จากทฤษฎี	f จากการจำลอง
23	Triangle	10000	D_h	0.0077	0.006787406
24	Triangle	100000	D_h	0.00445	0.003654496
25	Circle	1000	\sqrt{A}	0.016025	0.014324031
26	Circle	10000	\sqrt{A}	0.0077	0.007354108
27	Circle	100000	\sqrt{A}	0.00445	0.004286365
28	Rectangle	1000	\sqrt{A}	0.016025	0.014947815
29	Rectangle	10000	\sqrt{A}	0.0077	0.007090673
30	Rectangle	100000	\sqrt{A}	0.00445	0.003965213
31	Square	1000	\sqrt{A}	0.016025	0.012816752
32	Square	10000	\sqrt{A}	0.0077	0.006846715
33	Square	100000	\sqrt{A}	0.00445	0.003820948
34	Triangle	1000	\sqrt{A}	0.016025	0.015341017
35	Triangle	10000	\sqrt{A}	0.0077	0.007014888
36	Triangle	100000	\sqrt{A}	0.00445	0.003785956

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.2 เปรียบเทียบค่า Entrance length ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการ
ทำนายด้วยโปรแกรม

แบบจำลองที่	หน้าตัด	Reynold number	L_c	L_h จากทฤษฎี	L_h จากการจำลอง
1	Circle	1000	A_{eq}	2.5	2.1
2	Circle	10000	A_{eq}	1.021149543	2.25
3	Circle	100000	A_{eq}	1.498842552	2.25
4	Rectangle	1000	A_{eq}	1.25	1
5	Rectangle	10000	A_{eq}	0.510574772	1
6	Rectangle	100000	A_{eq}	0.749421276	1.25
7	Square	1000	A_{eq}	2.5	0.75
8	Square	10000	A_{eq}	1.021149543	2
9	Square	100000	A_{eq}	1.498842552	2.25
10	Triangle	1000	A_{eq}	2.5	2
11	Triangle	10000	A_{eq}	1.021149543	1
12	Triangle	100000	A_{eq}	1.498842552	1.5
13	Circle	1000	D_h	2.5	2.5
14	Circle	10000	D_h	1.021149543	1.75
15	Circle	100000	D_h	1.498842552	2
16	Rectangle	1000	D_h	2.086668	1.25
17	Rectangle	10000	D_h	0.851752233	1.25
18	Rectangle	100000	D_h	1.250201304	2
19	Square	1000	D_h	2.2176137	0.75
20	Square	10000	D_h	0.90491634	1.75
21	Square	100000	D_h	1.328235541	1.25
22	Triangle	1000	D_h	1.94447485	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.2 (ต่อ) เปรียบเทียบค่า Entrance length ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จาก
การทำนายด้วยโปรแกรม

แบบจำลองที่	หน้าตัด	Reynold number	L_c	L_h จากทฤษฎี	L_h จากการจำลอง
23	Triangle	10000	D_h	0.79441859	1.75
24	Triangle	100000	D_h	1.166047025	2.25
25	Circle	1000	\sqrt{A}	2.2176137	2.25
26	Circle	10000	\sqrt{A}	0.90491634	2.5
27	Circle	100000	\sqrt{A}	1.328235541	2.4
28	Rectangle	1000	\sqrt{A}	2.2176137	1.5
29	Rectangle	10000	\sqrt{A}	0.90491634	1
30	Rectangle	100000	\sqrt{A}	1.328235541	1.25
31	Square	1000	\sqrt{A}	2.2176137	1.5
32	Square	10000	\sqrt{A}	0.90491634	2
33	Square	100000	\sqrt{A}	1.328235541	2.25
34	Triangle	1000	\sqrt{A}	2.2176137	2.5
35	Triangle	10000	\sqrt{A}	0.90491634	2
36	Triangle	100000	\sqrt{A}	1.328235541	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้