

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษารูปแบบการไหลภายในของท่อด้วยวิธีการเชิงตัวเลข



T119332



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....119332
วัน,เดือน,ปี.....- 7 S.ศ. 2554

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL STUDY OF INTERNAL FLOW PATTERNS IN A PIPE



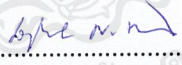
**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2009**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การศึกษารูปแบบการไหลภายในของท่อด้วยวิธีการเชิงตัวเลข
โดย นางสาวกษมาวรรณ เตารัตน์
นางสาววัญทิพย์ เตชะวงค์
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. สันติ วัฒนานูสรณ์
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร


.....ประธานกรรมการ
(ดร. สันติ วัฒนานูสรณ์)


.....กรรมการ
(รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง)


.....กรรมการ
(อ. บุญชัย โชติวิริยวานิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษารูปแบบการไหลภายในของท่อด้วยวิธีการเชิงตัวเลข			
โดย	นางสาวกษมาวรรณ	เตารัตน์	เลขประจำตัว	50010058
	นางสาวขวัญทิพย์	เดชะวงศ์	เลขประจำตัว	50010160
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต			
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี			
ปีการศึกษา	2553			
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. สันติ วัฒนานุกรณ์			

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนด้วยเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics) โดยศึกษาผลของรูปร่างหน้าตัดของท่อและผลของค่าความเป็นรูพรุน (Porosity) ภายในท่อ โดยรูปร่างหน้าตัดของท่อที่ทำการศึกษาได้แก่ หน้าตัดวงกลม หน้าตัดวงกลมแบบเจาะร่อง หน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า และหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากัน และค่าความเป็นรูพรุนภายในท่อที่ศึกษาคือ 0.5 0.8 และ 1 การศึกษานี้ได้ทำการจำลองการไหลแบบราบเรียบในท่อทรงกระบอก พบว่าผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกันกับผลจากทฤษฎีเป็นอย่างดี จึงได้ทำการจำลองการไหลผ่านท่อหน้าตัดวงกลม หน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และท่อหน้าตัดวงกลมแบบเจาะร่อง พบว่าการพัฒนารูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดวงกลมและท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีการพัฒนาการไหลที่ใกล้เคียงกันและการพัฒนาการไหลของทั้งสองหน้าตัดมีการพัฒนาการไหลได้เร็วกว่าในท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า แต่มีการพัฒนาการไหลได้ช้ากว่าในท่อหน้าตัดวงกลมแบบเจาะร่อง โดยเมื่อรูปแบบพัฒนาแล้วพบว่าขนาดของความเร็วในแนวแกนกลางในท่อหน้าตัดวงกลมแบบเจาะร่องมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือในท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าตามลำดับ ในการจำลองการไหลผ่านตัวกลางที่เป็นรูพรุน ท่อทุกแบบให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกันคือ ความดันจะลดลงตามแนวการไหล โดยที่ค่าความดันลดลงเมื่อค่าความเป็นรูพรุนมากขึ้น

Report Title	A numerical study of internal flow patterns in a pipe
By	Miss Kasamawan Taorat Miss Khwanthip Thechawong
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2010
Advisor	Dr. Santi Wattananusorn

Abstract

The purpose of this project is to study internal flow patterns of pipe using Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. The project utilizes a CFD code of different cross-sectional flow area and the effect of porosities. The different cross-sections in this study consist of circular, circular grooving, triangular, and square having the same hydraulic diameter. Also, the through-flow porosity of porous media has been varied from 0.5, 0.8 and 1. In verification of the model, the results of laminar 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 developing of velocity profile in circular pipe is faster than triangular and square ones, but slower than circular grooved. After the profile developed, velocity magnitude in circular grooved is larger than in circular, square and triangular shape, respectively. The results of porous model are shown that the pressure drop decreases when the porosity increases.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีจากคำแนะนำและความช่วยเหลือจากคณาจารย์และ
บุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ สำหรับคำแนะนำ คำสอน และคำปรึกษา รวมไปถึงแนวทางในการ
วิเคราะห์แก้ไขปรับปรุงงานวิจัย

รศ.ดร. ดวงกมล ณ ระนอง และอาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์ สำหรับคำแนะนำที่มี
ประโยชน์อย่างมากในการปรับปรุงโครงงานให้ดียิ่งขึ้น

อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยและ
เป็นพื้นฐานสำคัญในการประยุกต์ใช้กับงานวิจัย

นายนิวัฒน์ ภูเจริญ และนายเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ สำหรับคำแนะนำและแนวคิด
เกี่ยวกับการใช้เทคนิคการคำนวณผลศาสตร์ของไหล

คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ซึ่งให้กำเนิด ให้ความรัก คอยเป็นกำลังใจ ให้การอบรมสั่งสอน และให้การ
สนับสนุนด้านการศึกษาตลอดมา

พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ และ
มอบความเป็นมิตรที่ดีตลอดมา

กษมาวรรณ เตารัตน์

ขวัญทิพย์ เตะชะวงศ์

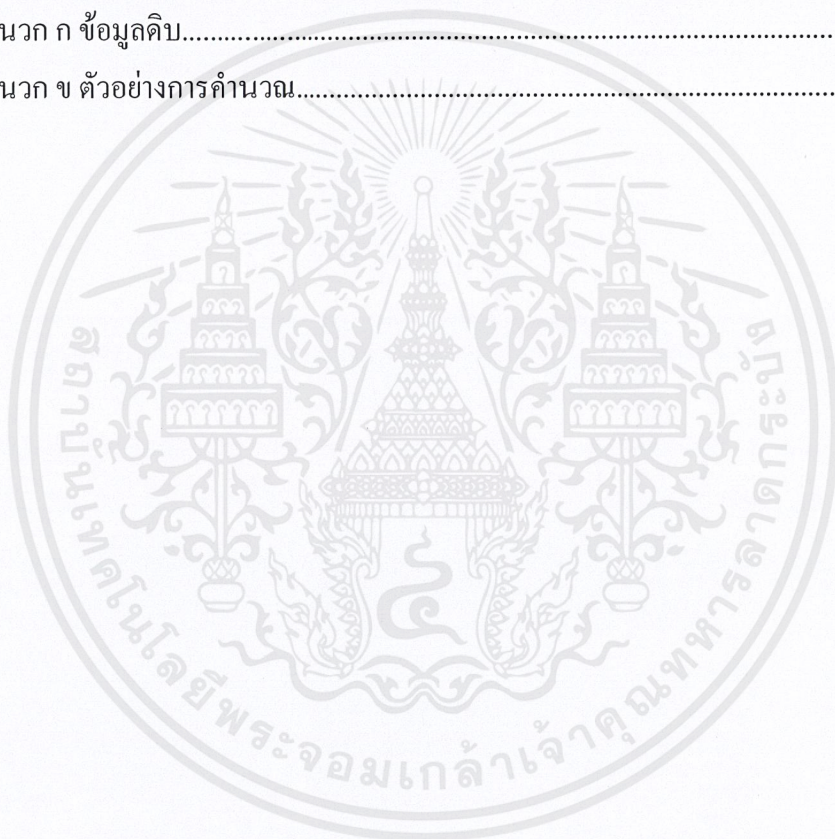
สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	3
2.2 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	3
2.3 สมการควบคุม.....	4
2.4 การไหลเต็มท่อแบบราบเรียบในท่อทรงกระบอกที่มีหน้าตัดคงที่.....	7
2.5 Porous media condition.....	11
2.6 ลำดับขั้นการคำนวณหาคำตอบแบบ SIMPLE.....	13
2.7 กระบวนการวิธีที่สมบูรณ์.....	18
2.8 Heat pipe (ท่อความร้อน).....	20
2.9 Hydraulic diameter.....	26
บทที่ 3 ขั้นตอนทำการทดลอง.....	28
3.1 คำอธิบายการทดลอง.....	28
3.2 ขั้นตอนการทำการทดลอง.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	64
4.1 ผลการทดลอง.....	64
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	69

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	72
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	72
5.2 วิจัยรณัผลการทดลอง.....	73
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ.....	76
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	84



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Methods of condensate return.....	21
3.1 สรุปจำนวนการทดลองทั้งหมด.....	29
3.2 การกำหนด Solution Method.....	39
3.3 ค่า Under-Relaxation Factors.....	39
3.4 การกำหนดจุดที่มุมสามเหลี่ยมด้านเท่า.....	41
3.5 การกำหนด Boundary แต่ละพื้นผิว.....	45
3.6 การกำหนดจุดที่มุมสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	47
3.7 การกำหนด Boundary แต่ละพื้นผิว.....	51
3.8 ข้อมูลสำหรับสร้างส่วนของเส้นรอบวง.....	53
3.9 ข้อมูลสำหรับสร้างเส้นตรง.....	54
3.10 ข้อมูลสำหรับตัดแบ่งส่วนของเส้นรอบวง.....	55
3.11 ข้อมูลสำหรับสร้างเส้นตรงเชื่อมจุด.....	56
4.1 แสดงค่าความดันลดตามแนวการไหล ($-\Delta P/\Delta z$) ของท่อที่ ค่าความเป็นรูพรุนต่างๆ.....	68
ก-1 ความดันภายในท่อหน้าตัดวงกลมที่ค่าความพรุนต่างๆ.....	76
ก-2 ความดันภายในท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ค่าความพรุนต่างๆ.....	77
ก-3 ความดันภายในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความพรุนต่างๆ.....	78
ก-4 ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลภายในแบบจำลองท่อเปล่า หน้าตัดวงกลม ที่ระนาบ $x = 0$ และ $z = 0.075$	79
ก-5 ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลภายในแบบจำลองท่อเปล่า หน้าตัดวงกลม ที่ระนาบ $x = 0$ และ $z = 0.0995$	80
ก-6 ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลภายในแบบจำลองท่อเปล่า หน้าตัดวงกลมเขาระร่อง ที่ระนาบ $x = 0$ และ $z = 0.075$	81
ก-7 ความเร็วตามแนวแกน y ของของไหลภายในแบบจำลองท่อเปล่า หน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ระนาบ $x = 0$ และ $z = 0.075$	82
ก-8 ความเร็วตามแนวแกน y ของของไหลภายในแบบจำลองท่อเปล่า หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ระนาบ $x = 0.0027$ และ $z = 0.075$	83
ข ตัวแปรที่เลือกมาใช้ในการคำนวณค่าความดันลดตามแนวการไหล.....	84

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	4
2.2 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลในท่อกลม.....	7
2.3 การพัฒนาของโปรไฟล์ความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อ.....	7
2.4 ปริมาตรควบคุมสำหรับการใช้ในการแปลงรูปของสมการความต่อเนื่อง.....	16
2.5 ลำดับขั้นตอนการคำนวณวิธี SIMPLE.....	19
2.6 The heat pipe and thermosyphon.....	20
2.7 The main regions of the heat pipe.....	22
2.8 The heat pipe as a thermal flux transformer.....	23
2.9 Heat pipe thermal cycle.....	23
2.10 Metal sintered powder wicks.....	25
2.11 Grooved wicks.....	25
2.12 Metal mesh wicks.....	25
2.13 Fine fiber bundle wicks.....	26
3.1 หน้าต่างก่อนการเข้าโปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 1.....	30
3.2 โปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 1.....	30
3.3 แบบจำลองที่ 1 ทรงกระบอกที่มีรัศมี 2.7 หน่วย ยาว 100 หน่วย.....	31
3.4 แบบจำลองที่ 1 ที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบ.....	31
3.5 แบบจำลองที่ 1 ที่มีการสร้างกริดบนพื้นผิว.....	32
3.6 แบบจำลองที่ 1 ที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์.....	32
3.7 หน้าต่างการบันทึกข้อมูลสำหรับแบบจำลองที่ 1.....	33
3.8 หน้าต่างก่อนเข้าโปรแกรม Fluent 12.0.16.....	34
3.9 โปรแกรม Fluent 12.0.16.....	34
3.10 หน้าต่างการเลือกไฟล์.....	34
3.11 แบบจำลองที่จะนำมาคำนวณโดยโปรแกรม Fluent 12.0.16.....	35
3.12 หน้าต่างการกำหนดขนาดของแบบจำลอง.....	35
3.13 หน้าต่างการตั้งค่าสมการพลังงาน.....	36
3.14 หน้าต่างแสดงการเลือกสมการการไหล.....	36
3.15 แสดงหน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติวัสดุ.....	36
3.16 หน้าต่างแสดงหน้า FLUENT Database Materials.....	37

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 แสดงหน้าต่างการกำหนดชนิดของไหล.....	37
3.18 การกำหนดความเร็วและอุณหภูมิขาเข้าของไอน้ำ.....	38
3.19 แสดงการกำหนดความดันและอุณหภูมิไอน้ำขาออก.....	38
3.20 แสดงการกำหนด Boundary Condition ของผนังท่อ.....	38
3.21 แสดงการกำหนด Operating Condition.....	39
3.22 แสดงการคำนวณของโปรแกรม Fluent.12.0.16.....	40
3.23 หน้าต่างแสดงการคำนวณเสร็จสิ้น.....	40
3.24 หน้าต่างก่อนการเข้าโปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 2.....	41
3.25 โปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 2.....	41
3.26 แสดงจุดที่มุมของสามเหลี่ยมด้านเท่า.....	42
3.27 แสดงรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า.....	42
3.28 แสดงเส้นสำหรับใช้สร้างปริมาตร.....	43
3.29 แสดงท่อทรงกระบอกหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า.....	43
3.30 แบบจำลองที่ 2 ที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบอย่างสมบูรณ์.....	44
3.31 แบบจำลองที่ 2 ที่มีการสร้างกริดบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์.....	44
3.32 แบบจำลองที่ 2 ที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์.....	45
3.33 หน้าต่างการบันทึกข้อมูลสำหรับแบบจำลองที่ 2.....	46
3.34 หน้าต่างก่อนการเข้าโปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 3.....	46
3.35 โปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 3.....	47
3.36 จุดที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	47
3.37 รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	48
3.38 ท่อทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	49
3.39 แบบจำลองที่ 3 ที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบอย่างสมบูรณ์.....	49
3.40 แบบจำลองที่ 3 ที่มีการสร้างกริดบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์.....	50
3.41 แบบจำลองที่ 3 ที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์.....	50
3.42 หน้าต่างการบันทึกข้อมูลสำหรับแบบจำลองที่ 3.....	51
3.43 หน้าต่างก่อนการเข้าโปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 4.....	52
3.44 โปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 4.....	52
3.45 ส่วนของเส้นรอบวงที่รัศมีเท่ากับ 2.4 และ 2.7.....	54

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.46 เส้นตรงที่สร้างจากจุดต่างๆ.....	55
3.47 ส่วนของเส้นรอบวงที่ลบส่วนที่ไม่ต้องการออกแล้ว.....	56
3.48 เส้นตรงที่สร้างเชื่อมจุดต่างๆ.....	57
3.49 พื้นผิวที่สร้างจากเส้นที่เชื่อมต่อกัน.....	57
3.50 แบบจำลองที่ 4 ที่มีพื้นผิวรูปวงกลมอย่างสมบูรณ์.....	58
3.51 แบบจำลองที่ 4 ที่เป็นปริมาตรทรงกระบอกอย่างสมบูรณ์.....	58
3.52 แบบจำลองที่ 4 ที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบ.....	60
3.53 แบบจำลองที่ 4 ที่มีการสร้างกริดบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์.....	61
3.54 แบบจำลองที่ 4 ที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์.....	61
3.55 หน้าต่างการบันทึกข้อมูลสำหรับแบบจำลองที่ 4.....	62
3.56 แสดงหน้าต่างการกำหนดชนิดของไหลสำหรับการไหลผ่านรูพรุน.....	63
4.1 โปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile) ของการไหลใน แบบจำลองท่อเปล่าหน้าตัดวงกลม ความยาว 0.1 m รัศมี 0.0027 m ตัดที่ระนาบ $x = 0$ และ $z = 0.0995$	64
4.2 คอนทัวร์ของความเร็วที่ระนาบ $x = 0$ โดยที่ [a] [b] [c] และ [d] คือ ท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม และ ท่อหน้าตัดวงกลมแบบเซาะร่อง ตามลำดับ.....	65
4.3 คอนทัวร์ของความเร็วที่ระนาบ $z = 0.075$ โดยที่ [a] [b] [c] และ [d] คือ ท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม และ ท่อหน้าตัดวงกลมแบบเซาะร่อง ตามลำดับ.....	65
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตามแนวการไหล (velocity) กับระยะตามแนวสมมาตรของท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม และท่อหน้าตัดวงกลมแบบเซาะร่อง บนระนาบ $z = 0.075$ m.....	66
4.5 คอนทัวร์ของความดันที่ระนาบ $x = 0$ ของท่อหน้าตัดวงกลม โดยที่ [a] [b]และ[c] คือ ผลการทำนายที่ค่า Porosity เท่ากับ 1 0.8 และ 0.5 ตามลำดับ.....	67
4.6 คอนทัวร์ของความดันที่ระนาบ $x = 0$ ของท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม โดยที่[a] [b]และ[c] คือ ผลการทำนายที่ค่า Porosity เท่ากับ 1 0.8 และ 0.5 ตามลำดับ.....	67

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 คอนทัวร์ของความดันที่ระนาบ $x = 0$ ของท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม โดยที่ [a] [b]และ[c] คือ ผลการทำนายที่ค่า Porosity เท่ากับ 1 0.8 และ 0.5 ตามลำดับ.....	68
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันลดตามแนวการไหล กับค่าความเป็นรูพรุน.....	69
4.9 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบ $z = 0.075$ m ในท่อหน้าตัดวงกลม[a] และในท่อหน้าตัดวงกลมแบบเซาะร่อง [b].....	71



คำอธิบายสัญลักษณ์

∇	Divergence
ρ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
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 (กิโลกรัมต่อ เมตร·วินาที ²)
S_M	แรงภายนอกที่กระทำต่อปริมาตรของของไหล
E	พลังงานจำเพาะของของไหล
T	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตร·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)
S_i	source term ในสมการโมเมนตัมในทิศ i สำหรับการไหลผ่านตัวกลางที่เป็นรูพรุน
$ v $	ขนาดของเวกเตอร์ความเร็ว
α	ค่าความสามารถในการส่งผ่านของวัสดุที่เป็นรูพรุน (Permeability) (ตารางเมตร)
\bar{v}	ความเร็วของไหลในท่อเปล่า (เมตรต่อวินาที)
u'_i	ความเร็วเนื่องจากการเกิด fluctuation ในทิศทาง i (เมตรต่อวินาที)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

\bar{u}'_i	ความเร็วเฉลี่ยเนื่องจากการเกิด fluctuation ในทิศทาง i (เมตรต่อวินาที)
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ (เมตรต่อวินาที)
R_c	ผลของ swirl
ϕ	คุณสมบัติ ϕ 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	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (เมตร)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) เป็นกระบวนการเชิงตัวเลขที่ใช้ในการแก้ปัญหาและศึกษาพฤติกรรมเกี่ยวกับการไหลของของไหล การพัฒนาของโปรแกรมนี้ในปัจจุบัน ความแม่นยำและความรวดเร็วในการคำนวณสถานะที่ซับซ้อนได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นเรื่อยๆ ในส่วนของท่อความร้อน (Heat pipe) นั้น เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำความร้อนได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องกลหรือพลังงานจากภายนอกในการทำงาน งานวิจัยนี้จึงนำเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลมาใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณและศึกษารูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อน โดยพิจารณารูปร่างของพื้นที่หน้าตัดและความเป็นรูพรุนของไส้ (Wick) ภายในท่อที่มีผลต่อการไหล เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษากลไกภายในท่อความร้อนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษารูปแบบความเร็วของการไหลภายในของท่อที่จำลองด้วยเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลโดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของรูปร่างพื้นที่หน้าตัดของท่อที่มีต่อรูปแบบความเร็วของของไหลภายในท่อ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของความเป็นรูพรุนภายในท่อที่มีต่อค่าความดันตก

1.3 ขอบเขตของโครงการ

งานวิจัยนี้ศึกษาบางส่วนของบริเวณอะเดียเบติกของท่อความร้อน ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่มีการถ่ายโอนความร้อน ของไหลภายในท่อคือไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 373.15 เคลวิน กำหนดให้เป็นการไหลแบบราบเรียบที่มีเลขเรย์โนลต์เท่ากับ 1000

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถใช้โปรแกรม Gambit 2.4.6 และ Fluent.12.0.16 ในการสร้างแบบจำลองและคำนวณผลได้

1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

1.5.3 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานและประโยชน์ของท่อความร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) [1]

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computation Fluid Dynamics หรือ CFD) คือการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การถ่ายโอนความร้อนและปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี โดยการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เทคนิคนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งและใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรมและวงการการศึกษา ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ เช่น

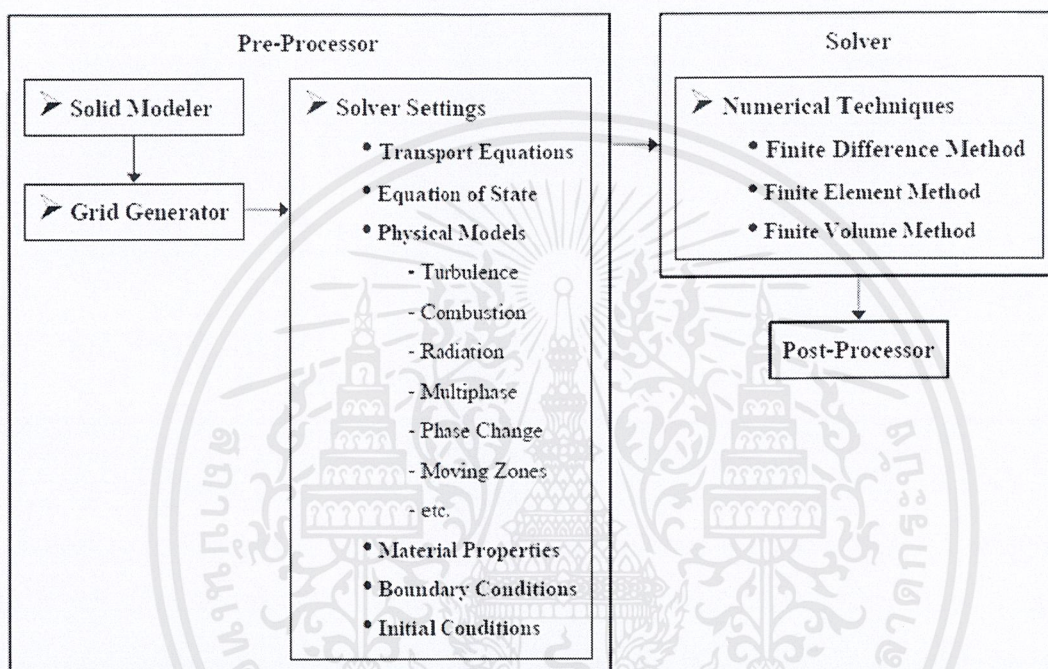
- อากาศพลศาสตร์ของอากาศยานและยานพาหนะ เช่น แรงยกและแรงต้าน เป็นต้น
- อุทกศาสตร์ของเรือ
- โรงจักรผลิตกำลัง เช่น การผสมและการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การไหลของของไหลทำงาน เป็นต้น
- วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การทำความเย็นบนอุปกรณ์รวมทั้งวงจรไมโครอิเล็กทรอนิกส์
- วิศวกรรมเคมี เช่น การผสมและการแยกสาร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

2.2 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล [1]

โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลถูกสร้างขึ้นด้วยลำดับขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขที่สามารถแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลได้ โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่

- Pre-processor : เป็นส่วนที่ใช้สร้างแบบจำลอง (Solid modeling) และสร้างกริด (Grid generation)
- Solver : เป็นส่วนที่ใช้ในการคำนวณเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหล
- Post-processor : เป็นส่วนของการแสดงผลการคำนวณ เช่น กราฟ คอนทัวร์ เวกเตอร์ ฯลฯ

สามารถสรุปการทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

2.3 สมการควบคุม (Governing Equation) [1]

กฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์โดยทั่วไปมี 3 กฎดังนี้

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

จากกฎการอนุรักษ์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนสมการควบคุมได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการอนุรักษ์มวล (Continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.1)$$

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 (2.1) ว่า “สมการอนุรักษ์มวลของของไหลที่อัดตัวได้ในสภาวะไม่คงตัว”

ในกรณีของของไหลอัดตัวไม่ได้ (incompressible fluid) เช่น ของเหลว ซึ่งมีความหนาแน่นคงที่ ดังนั้นสมการที่ (2.1) สามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.2)$$

สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่า “แรงเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม”

ซึ่งสามารถเขียนสมการ โมเมนตัมในสามมิติได้ดังนี้

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\Delta p + \Delta \boldsymbol{\tau} + S_M \quad (2.3)$$

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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งสามารถเขียนสมการพลังงานได้ดังนี้

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \nabla \cdot (k\nabla T) - \nabla \cdot (p\mathbf{u}) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + S_E \quad (2.4)$$

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)

จากสมการโมเมนตัม สมการที่ (2.3) และจากกฎความหนืดของนิวตัน (Newton's Law of Viscosity) [2] ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\tau = \mu \nabla u \quad (2.5)$$

โดยที่ μ คือ ความหนืดของของไหล (viscosity)

ซึ่งสมการที่ (2.5) เป็นกฎความหนืดของนิวตันที่เขียนอยู่ในเทอมของความเค้นเฉือน (shear stress)

เมื่อแทนค่าความเค้นเฉือนจากสมการที่ (2.5) ลงในสมการที่ (2.3) และแทนค่าแรงภายนอกที่กระทำต่อปริมาตรของของไหล (S_M) ด้วยแรงโน้มถ่วงจะได้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (2.6)$$

โดยที่ g คือ ค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational constant)

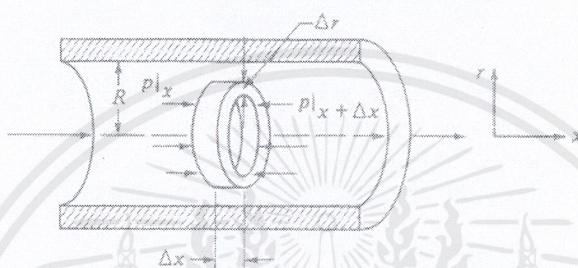
เรียกสมการที่ (2.6) ว่า “สมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับของไหลของนิวตัน”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

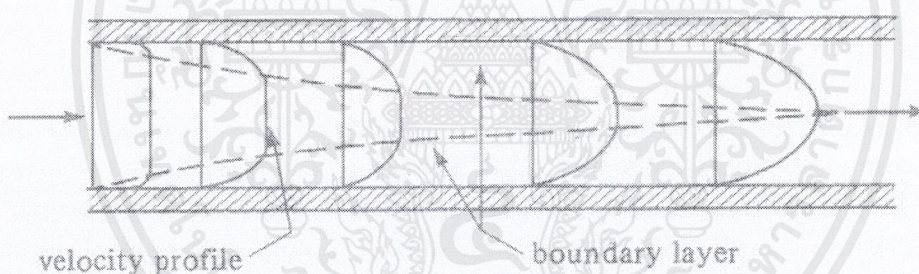
2.4 การไหลเต็มท่อแบบราบเรียบในท่อทรงกระบอกที่มีหน้าตัดคงที่ [2]

(Fully developed laminar flow in a circular conduit of constant cross section)

วิศวกรมักจะเผชิญกับการไหลของของไหลภายในท่อกลมหรือท่อ(Pipe) ในที่นี้จะพิจารณาสถานะการไหลราบเรียบแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible laminar flow) ในรูปที่ 2.2 เป็นส่วนหนึ่งของท่อกลม ที่มีการไหลราบเรียบเต็มท่อ ซึ่งก็คือไม่ได้รับอิทธิพลจากผลกระทบทางเข้า และแสดงสถานะการไหลคงที่ (Steady-flow) การไหลแบบเต็มท่อ (Fully developed flow) จะถูกกำหนดให้รูปแบบความเร็ว (Velocity profile) ไม่ต่างกันตามแนวแกนของการไหล



รูปที่ 2.2 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลในท่อกลม [2]



รูปที่ 2.3 การพัฒนาของ โปรไฟล์ความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อ [2]

ในที่นี้จะพิจารณาปริมาตรควบคุมทรงกระบอกของการไหลที่มีรัศมีภายในเท่ากับ r ความหนาเท่ากับ Δr และความยาว Δx จากการประยุกต์กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) สำหรับปริมาตรควบคุมนี้ จะพิจารณาผลของเทอมแรงและ โมเมนตัมสำหรับทิศทางตามแกน x เริ่มจากการแสดงปริมาตรควบคุมสำหรับโมเมนต์เชิงเส้นในทิศทางตามแกน x

$$\sum F_x = \iint_{s.s.} \rho v_x (v \cdot n) dA + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{c.v.} \rho v_x V \quad (2.7)$$

และพิจารณาแต่ละเทอม เพื่อนำไปใช้กับปริมาตรควบคุมแสดงดังนี้

$$\sum F_x = P(2\pi r \Delta r)|_x - P(2\pi r \Delta r)|_{x+\Delta x} + \tau_{rx}(2\pi r \Delta x)|_{r+\Delta r} - \tau_{rx}(2\pi r \Delta x)|_r \quad (2.8)$$

$$\iint_{c.v.} v_x \rho (v \cdot n) dA = (\rho v_x)(2\pi r \Delta r v_x)|_{x+\Delta x} - (\rho v_x)(2\pi r \Delta r v_x)|_x \quad (2.9)$$

และ

$$\frac{d}{dt} \iiint_{c.v.} v_x \rho dV = 0 \quad (2.10)$$

ในการไหลแบบคงตัว ฟลักซ์ของโมเมนตัมเนื่องจากการพา (The convective momentum flux) คือ

$$(\rho v_x)(2\pi r \Delta r v_x)|_{x+\Delta x} - (\rho v_x)(2\pi r \Delta r v_x)|_x \quad (2.11)$$

ซึ่งจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจากการไหลแบบเต็มท่อ ทุกเทอมไม่ขึ้นกับทิศทางตามแกน x แทนที่เทอมที่เหลือลงในสมการ (2.7) ได้

$$- [P(2\pi r \Delta r)|_{x+\Delta x} - P(2\pi r \Delta r)|_x] + \tau_{rx}(2\pi r \Delta x)|_{r+\Delta r} - \tau_{rx}(2\pi r \Delta x)|_r = 0 \quad (2.12)$$

จากการกำจัดเทอมและจัดเรียงสมการ สามารถลดรูปสมการได้ดังนี้

$$-r \frac{p|_{x+\Delta x} - p|_x}{\Delta x} + \frac{(r\tau_{rx})|_{r+\Delta r} - (r\tau_{rx})|_r}{\Delta r} = 0 \quad (2.13)$$

พิจารณาขีดจำกัดของปริมาตรควบคุม โดยให้ Δx และ Δr มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะได้

$$-r \frac{dP}{dx} + \frac{d}{dr} (r\tau_{rx}) = 0 \quad (2.14)$$

ซึ่งความดันและแรงเฉือนเป็นฟังก์ชันของ x และ r ตามลำดับ ดังนั้นรูปแบบอนุพันธ์นี้เป็นผลรวมของอนุพันธ์ย่อย ในบริเวณที่มีการไหลแบบเต็มท่อ ความดันต่อระยะการทางไหลจะคงที่ ตัวแปรในสมการ (2.14) อาจจะแยกและอินทิเกรตได้ดังนี้

$$\tau_{rx} = \left(\frac{dP}{dx} \right) \frac{r}{2} + \frac{C_1}{r} \quad (2.15)$$

ค่าคงที่จากการอินทิเกรต C_1 อาจจะพิจารณาได้จากการทราบค่า T_x ที่รัศมีต่างๆ สำหรับตรงกลางท่อ รัศมีเท่ากับศูนย์ ค่า C_1 เป็นค่าคงที่ จะทำให้ได้ค่า T_{rx} ไม่จำกัด ดังนั้นสมบัติทางกายภาพนี้เป็นไป
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ได้ และจะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อค่า C_1 เท่ากับศูนย์ ดังนั้นค่าการกระจายแรงเฉือนสำหรับเงื่อนไข และเรขาคณิตที่กำหนดคือ

$$\tau_{rx} = \left(\frac{dP}{dx} \right) \frac{r}{2} \quad (2.16)$$

จะสังเกตว่าค่าแรงเฉือนจะเท่ากับศูนย์ที่ รัศมีเท่ากับศูนย์ และจะมีค่ามากที่สุดที่รัศมีเท่ากับ R ซึ่งเป็นบริเวณพื้นผิวภายในของท่อ

ข้อมูลเพิ่มเติมที่จะพิจารณาคือที่ความสัมพันธ์ของความหนืด โดยสมมติให้เป็นการไหลของของไหลที่ความหนืดคงที่ และเป็นการไหลแบบราบเรียบ

$$\tau_{rx} = \mu \frac{dv_x}{dr} \quad (2.17)$$

แทนค่าความสัมพันธ์นี้ลงในสมการ (2.16)

$$\mu \frac{dv_x}{dr} = \left(\frac{dP}{dx} \right) \frac{r}{2} \quad (2.18)$$

จากการอินทิเกรตจะได้

$$v_x = \left(\frac{dP}{dx} \right) \frac{r^2}{4\mu} + C_2 \quad (2.19)$$

ค่าคงที่ที่สอง C_2 พิจารณาได้จากสภาวะขอบเขต ความเร็วจะเท่ากับศูนย์ที่ผิวของผนังท่อ (ผนังท่อไม่มีการเคลื่อนที่) $r=R$ ดังนั้น

$$C_2 = - \left(\frac{dP}{dx} \right) \frac{R^2}{4\mu} \quad (2.20)$$

และการกระจายความเร็วจะกลายเป็น

$$v_x = - \left(\frac{dP}{dx} \right) \frac{1}{4\mu} (R^2 - r^2) \quad (2.21)$$

หรือ

$$v_x = - \left(\frac{dP}{dx} \right) \frac{R^2}{4\mu} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.21) และ (2.22) บ่งบอกถึงรูปแบบความเร็วเป็นแบบพาราโบลา (Parabolic) และความเร็วสูงสุดเกิดที่ตรงกลางท่อกลม ที่ $r=0$ ดังนั้น

$$v_{\max} = -\left(\frac{dP}{dx}\right) \frac{R^2}{4\mu} \quad (2.23)$$

และสมการ (2.22) อาจเขียนได้ดังนี้

$$v_x = v_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.24) สามารถเขียนรูปแบบความเร็วได้จากความสัมพันธ์ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดท่อ

$$v_{\text{avg}} = \frac{v_{\max}}{2} = -\left(\frac{dP}{dx}\right) \frac{R^2}{8\mu} \quad (2.25)$$

สมการที่ (2.25) สามารถจัดรูปใหม่เพื่อแสดงค่าความดันต่อระยะทางในเทอมของความเร็วเฉลี่ยได้ดังนี้

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{8\mu v_{\text{avg}}}{R^2} = \frac{32\mu v_{\text{avg}}}{D^2} \quad (2.26)$$

สมการ (2.26) เรียกว่า สมการ Hagen-Poiseuille เพื่อเป็นเกียรติแก่บุคคลคิดค้นสองคน สมการนี้สามารถคิดรวมตลอดทั้งความยาวท่อ เพื่อหาค่าความดันลด (Pressure drop) ได้

สถานะที่ใช้สำหรับการคำนวณจากสมการต้องเป็นไปตามข้อตกลงดังนี้

1. ของไหล (a) เป็นเป็นนิวโตเนียน (Newtonian fluid)
2. การไหลต้องเป็นแบบ
 - (a) ราบเรียบ
 - (b) สภาวะคงที่
 - (c) ไหลเต็มท่อ
 - (d) อัดตัวไม่ได้

2.5 Porous media condition [3]

แบบจำลองของตัวกลางที่เป็นรูพรุนสามารถใช้ได้กับทั้งการไหลแบบเฟสเดียวและการไหลแบบผสม รวมถึงการไหลผ่านเบด (Pack bed) กระดาษกรอง แผ่นรูพรุนและตัวกลางกระจายการไหล

สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลผ่านตัวกลางที่เป็นรูพรุน

ตัวกลางที่เป็นรูพรุนได้จำลองโดยการเพิ่มเทอมของโมเมนตัมไปในสมการมาตรฐานของการไหล โดยสมการที่เพิ่มเข้าไปประกอบด้วยสองส่วนคือ เทอมของความหนืดที่หายไป (เทอมแรกทางขวามือของสมการที่ 2.27) และเทอมของความเฉื่อยที่หายไป (เทอมที่สองทางขวามือของสมการที่ 2.27)

$$S_i = -\left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (2.27)$$

โดยที่ S_i คือเทอมของสมการโมเมนตัมในทิศ i (x , y หรือ z) $|v|$ คือ ขนาดของความเร็ว และ D กับ C คือเมตริกซ์ แหล่งของเทอมโมเมนตัมนี้จะส่งผลกับเกรเดียนต์ของความดัน ทำให้เกิดความดันลดที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วของของไหลในแต่ละเซลล์
กรณีของตัวกลางที่เป็นรูพรุนแบบสม่ำเสมอ (Simple homogeneous porous media)

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (2.28)$$

โดยที่ α คือ ค่า Permeability และ C_2 คือค่าความต้านทานเริ่มต้น นิยาม D และ C เป็นเมตริกซ์เส้นทแยงมุมที่มี $1/\alpha$ และ C_2 อยู่ในแนวเส้นทแยงมุม (ค่าอื่นๆในเมตริกซ์เป็นศูนย์)

ในโปรแกรม ANSYS FLUENT จะจำลองเทอมของโมเมนตัมนี้ในรูปยกกำลังของความเร็ว

$$S_i = -C_0 |v|^{C_1} = -C_0 |v|^{(C_1-1)} v_i \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ C_0 และ C_1 คือค่าคงที่ที่ผู้ใช้งานจะป้อนให้กับโปรแกรม

ในการจำลองเทอมโมเมนต์ในรูปยกกำลังนี้ ความดันลดที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบขึ้นกับทิศทาง และค่า C_0 เป็นหน่วย SI

Darcy's law in porous media

การไหลแบบราบเรียบผ่านตัวกลางที่เป็นรูพรุน ความดันลดที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วและค่าคงที่ C_2 สามารถคิดว่ามีค่าเป็นศูนย์ได้ ไม่คิดความเร่งในการพาและการแพร่ ได้ว่าแบบจำลองการไหลผ่านตัวกลางที่เป็นรูพรุน จะลดรูปเป็น Darcy's law

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} \vec{v} \quad (2.30)$$

ความดันลดที่โปรแกรม ANSYS FLUENT คำนวณในแต่ละทิศทาง (x , y และ z) ในขอบเขตที่เป็นรูพรุนคือ

$$\begin{aligned} \Delta p_x &= \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{xj}} v_j \Delta n_x \\ \Delta p_y &= \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{yj}} v_j \Delta n_y \\ \Delta p_z &= \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{zj}} v_j \Delta n_z \end{aligned} \quad (2.31)$$

โดยที่ $1/\alpha_{ij}$ เป็นส่วนประกอบในเมทริกซ์ D ในสมการ (2.27) v_j คือความเร็วในทิศ x , y และ z ส่วน Δn_x , Δn_y และ Δn_z คือความหนาของตัวกลางในทิศ x , y และ z

การสูญเสียความเฉื่อยในตัวกลางที่เป็นรูพรุน

เมื่อมีการไหลด้วยความเร็วที่มาก ค่าคงที่ C_2 ในสมการ (2.27) จะใช้เป็นค่าแก้ไขสำหรับการสูญเสียความเฉื่อยในตัวกลางที่เป็นรูพรุน ค่าคงที่นี้จะมองเป็นสัมประสิทธิ์ความสูญเสียต่อความยาวตามทิศทางไหล ดังนั้น ความดันลดจะถูกนิยามให้เป็นฟังก์ชันของ Dynamic head

หากเป็นการจำลองแผ่นรูพรุนหรือ Tube bank จะสามารถตัดเทอมของ Permeability และใช้แค่เทอมของการสูญเสียความเฉื่อยเพียงอย่างเดียวได้ ผลที่ได้คือ รูปแบบอย่างง่ายของสมการตัวกลางที่เป็นรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta p = -\sum_{j=1}^3 C_{2ij} \left(\frac{1}{2} \rho v_j |v| \right) \quad (2.32)$$

หรือเมื่อเขียนในเทอมของความดันลในทิศ x , y และ z ได้ดังสมการที่ 2.33

$$\begin{aligned} \Delta p &\approx \sum_{j=1}^3 C_{2xj} \Delta n_x \frac{1}{2} \rho v_j |v| \\ \Delta p &\approx \sum_{j=1}^3 C_{2yj} \Delta n_y \frac{1}{2} \rho v_j |v| \\ \Delta p &\approx \sum_{j=1}^3 C_{2zj} \Delta n_z \frac{1}{2} \rho v_j |v| \end{aligned} \quad (2.33)$$

โดยที่ Δn_x , Δn_y และ Δn_z คือความหนาของตัวกลางในทิศ x , y และ z

2.6 ลำดับขั้นการคำนวณหาคำตอบแบบ SIMPLE [4]

กระบวนการวิธี SIMPLE นั้นมีชื่อเต็มว่า Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation โดยผู้เสนอวิธีนี้เป็นคนแรกคือ Patankar [5] และ Spalding (1972) เป็นวิธีที่ใช้ขั้นตอนการเดาและการแก้ไขค่าในการคำนวณหาค่าความดันในระบบพิกัดแบบกริดที่เหลื่อมกันตามที่กล่าวไว้ข้างต้น จะมีการแสดงตัวอย่างให้เห็นโดยการพิจารณาสมการของการไหลแบบคงตัว และราบเรียบ 2 มิติ ในพิกัดคาร์ทีเซียน

กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE นั้น เริ่มต้นจากการเดาค่าสนามความดัน p^* ตลอดทั้งโดเมนการไหล จากนั้นจะทำการหาคำตอบของสมการแปลงรูปโมเมนตัม โดยใช้ความดันที่เดาขึ้น เพื่อให้ได้ค่าของความเร็ว u^* และ v^* ดังสมการ (2.34) และสมการ (2.35)

$$a_{i,j} u_{i,j}^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (p_{i-1,j}^* - p_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.34)$$

$$a_{i,j} v_{i,j}^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + (p_{i,j-1}^* - p_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.35)$$

จากนั้น ทำการนิยามค่าแก้ของความดัน p' ขึ้น ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าความดันที่ถูกต้องกับค่าความดันที่เดาขึ้น

$$p = p^* + p' \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน นิยามค่าแก้ไขของความเร็ว u' และ v' ที่เป็นผลต่างระหว่างค่าความเร็วที่ถูกต้องกับความเร็วที่เดาขึ้น u^* และ v^* ดังนี้

$$u = u^* + u' \quad (2.37)$$

$$v = v^* + v' \quad (2.38)$$

แทนค่าสนามความดัน p ที่ถูกต้องที่ได้จากการแก้ค่าในครั้งแรก ลงในสมการโมเมนตัม ทำให้ได้สนามความเร็วที่ถูกต้อง (u และ v) ลบสมการ (2.34) และสมการ (2.35) จากสมการโมเมนตัมตามลำดับจะได้

$$a_{i,j}(u_{i,j} - u_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(u_{nb} - u_{nb}^*) + [(p'_{i-1,j} - p_{i-1,j}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \quad (2.39)$$

$$a_{i,j}(v_{i,j} - v_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(v_{nb} - v_{nb}^*) + [(p_{i,j-1} - p_{i,j-1}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \quad (2.40)$$

ใช้สูตรค่าแก้ไขสมการ (2.36) ถึงสมการ (2.38) ดังนั้นสมการ (2.39) ถึงสมการ (2.40) อาจจะถูกเขียนใหม่ได้เป็น

$$a_{i,j}u'_{i,j} = \sum a_{nb}u'_{nb} + (p'_{i-1,j} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (2.41)$$

$$a_{i,j}v'_{i,j} = \sum a_{nb}v'_{nb} + (p'_{i,j-1} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (2.42)$$

จากจุดนี้ค่าแก้ไขของความเร็ว จะถูกประมาณค่าอย่างง่ายขึ้น โดยตัดเทอม $\sum a_{nb}u'_{nb}$ $\sum a_{nb}v'_{nb}$ นี้ออกจากสมการ (2.41) ถึงสมการ (2.42) ซึ่งเป็นหัวใจหลักของกระบวนการวิธีแบบ SIMPLE เมื่อตัดเทอมดังกล่าวออกแล้วจะได้

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2.43)$$

$$v'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2.44)$$

โดยที่
$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} \text{ และ } d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2.43) และสมการ (2.44) อธิบายการแก้ไขค่าที่จะถูกประยุกต์ใช้กับความเร็วจนผ่านสมการ (2.37) และสมการ (2.38)

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2.46)$$

$$v_{i,j} = v_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2.47)$$

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

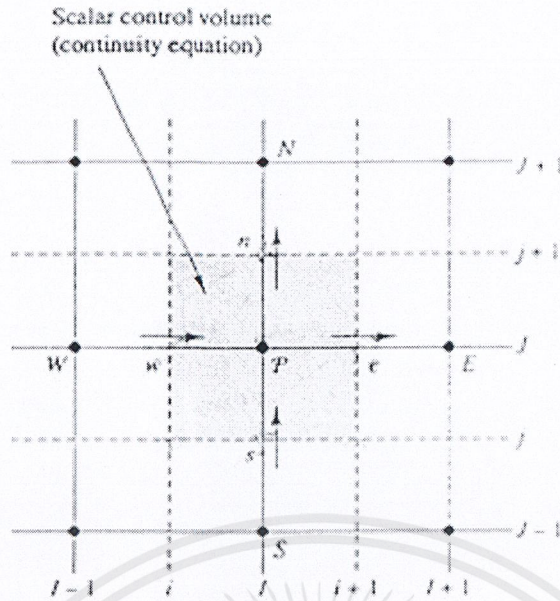
$$u_{i+1,j} = u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j} (p'_{i,j} - p'_{i+1,j}) \quad (2.48)$$

$$v_{i,j+1} = v_{i,j+1}^* + d_{i,j+1} (p'_{i,j} - p'_{i,j+1}) \quad (2.49)$$

โดยที่
$$d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j}}{a_{i+1,j}} \text{ และ } d_{i,j+1} = \frac{A_{i,j+1}}{a_{i,j+1}} \quad (2.50)$$

ถึง ณ ตอนนี้นำพิจารณาเพียงสมการโมเมนตัม ดังนั้นต้องพิจารณาสนามความเร็วมีความสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องตามสมการ (2.41) ความต่อเนื่องจะถูกแปลงรูปที่ปริมาตรสเกลาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

$$[(\rho u A)_{i+1,j} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho u A)_{i,j+1} - (\rho u A)_{i,j}] = 0 \quad (2.51)$$



รูปที่ 2.4 ปริมาตรควบคุมสำหรับการใช้ในการแปลงรูปของสมการความต่อเนื่อง แทนค่าความเร็วที่แก้ค่าแล้ว ดังที่ให้ไว้ใน (2.46 – 2.49) ไปในสมการความต่อเนื่องที่แปลงรูปแล้ว (2.51) จะได้

$$\begin{aligned} & \left[\rho_{i+1,j} A_{i+1,j} (u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j} (p'_{i,j} - p'_{i+1,j})) \right. \\ & \left. - \rho_{i,j} A_{i,j} (u_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i-1,j} - p'_{i,j})) \right] \\ & + \left[\rho_{i,j+1} A_{i,j+1} (v_{i,j+1}^* + d_{i,j+1} (p'_{i,j} - p'_{i,j+1})) \right. \\ & \left. - \rho_{i,j} A_{i,j} (v_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i,j-1} - p'_{i,j})) \right] = 0 \end{aligned} \quad (2.52)$$

ซึ่งอาจจะถูกเรียบเรียงใหม่เป็น

$$\begin{aligned} & [(\rho dA)_{i+1,j} + (\rho dA)_{i,j} + (\rho dA)_{i,j+1} + (\rho dA)_{i,j}] p'_{i,j} \\ & = (\rho dA)_{i+1,j} p'_{i+1,j} + (\rho dA)_{i,j} p'_{i-1,j} + (\rho dA)_{i,j+1} p'_{i,j+1} \\ & \quad + (\rho dA)_{i,j} p'_{i,j-1} \\ & \quad + [(\rho u^* A)_{i,j} - (\rho u^* A)_{i+1,j} + (\rho v^* A)_{i,j} - (\rho v^* A)_{i,j+1}] \end{aligned} \quad (2.53)$$

จัดเรียงสัมประสิทธิ์ของ p' ซึ่งอาจจะเขียนได้ดังนี้

$$a_{i,j} p'_{i,j} = a_{i+1,j} p'_{i+1,j} + a_{i-1,j} p'_{i-1,j} + a_{i,j+1} p'_{i,j+1} + a_{i,j-1} p'_{i,j-1} + b'_{i,j} \quad (2.54)$$

โดยที่ $a_{i,j} = a_{i+1,j} + a_{i-1,j} + a_{i,j+1} + a_{i,j-1}$ และสัมประสิทธิ์เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

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

สมการ (2.54) คือสมการความต่อเนื่องที่แปลงไปเป็นสมการของค่าแก้ความดันเทอม $b'_{i,j}$ บ่งชี้ถึงความไม่สมดุลของมวลเข้าออกจากปริมาตรควบคุม เนื่องจากสนามความเร็ว u^* , v^* ที่ไม่ถูกต้อง โดยการแก้สมการ (2.54) สนามของค่าแก้ความดัน p' สามารถหาได้ทุกจุดในโดเมน เมื่อหาค่าได้แล้ว สนามความดันที่ถูกต้องก็จะสามารถหาได้ โดยใช้สมการ (2.53) และความเร็วที่ถูกต้องก็จะหาได้จากสมการ (2.46) ถึงสมการ (2.49) การเฉลยเทอม $\sum a_{nb} u'_{nb}$ จะไม่มีผลกระทบต่อคำตอบสุดท้ายเพราะว่าค่าแก้ความดันและค่าแก้ความเร็วจะเป็นศูนย์เมื่อคำตอบสุดท้ายถูกต้อง นั่นคือ $p^* = p$ และ $u^* = u$

สมการของค่าแก้ความดันอาจจะไม่วิ่งเข้าหาคำตอบได้ถ้าไม่มีการใช้ Under-relaxation ระหว่างกระบวนการทำซ้ำ ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \quad (2.55)$$

ที่ซึ่ง α_p คือ Under-relaxation factor ของความดัน ถ้าเลือกค่านี้เท่ากับ 1 สนามความดันที่เดาค่าจะถูกแก้ไขโดย p' อย่างไรก็ตามค่าแก้ไขที่คำนวณได้ อาจจะใหญ่มากในกรณีที่มีการเดาค่าเริ่มต้นค่อนข้างห่างจากคำตอบสุดท้ายมาก ซึ่งจะทำให้การคำนวณไม่เสถียรได้ ดังนั้นการให้ค่า $\alpha_p = 0$ ย่อมหมายถึงการไม่ปรับปรุงค่าเลย ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการเช่นกัน การใช้ค่าระหว่าง 0 กับ 1 จึงทำให้ได้ใช้บางส่วนของค่าแก้ในการปรับปรุงค่าความดัน โดยต้องไม่น้อยเกินไปจนทำให้การลู่ออกซ้ำและต้องไม่มากจนเกิดความไม่เสถียรขึ้น

สามารถใช้หลักการ Under-relaxation กับความเร็วที่คำนวณได้เช่นกัน ดังนี้

$$u^{new} = \alpha_u u + (1 - \alpha_u) u^{n-1} \quad (2.56)$$

$$v^{new} = \alpha_v v + (1 - \alpha_v) v^{n-1} \quad (2.57)$$

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 เข้าไปในสมการแปลงรูปของโมเมนตัม ในทิศ ความเร็ว u และ v และจัดรูปใหม่จะได้ดังนี้

$$\frac{a_{i,j}}{\alpha_u} u_{i,j} = \sum a_{nb} u_{nb} + (p_{I-1,j} - p_{I,j}) A_{i,j} + b_{i,j} + \left[(1 - \alpha_u) \frac{a_{i,j}}{\alpha_u} \right] u_{i,j}^{(n-1)} \quad (2.58)$$

$$\frac{a_{I,j}}{\alpha_v} v_{I,j} = \sum a_{nb} v_{nb} + (p_{I,j-1} - p_{I,j}) A_{I,j} + b_{I,j} + \left[(1 - \alpha_v) \frac{a_{I,j}}{\alpha_v} \right] v_{I,j}^{(n-1)} \quad (2.58)$$

สมการค่าแก้ของความดันก็จะถูกปรับเปลี่ยนไปด้วย กล่าวคือสัมประสิทธิ์ d ในสมการความต่อเนื่องที่แสดงในรูปของค่าแก้ของความดันจะกลายเป็น

$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j} \alpha_u}{a_{i,j}}, \quad d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j} \alpha_u}{a_{i+1,j}}, \quad d_{I,j} = \frac{A_{I,j} \alpha_v}{a_{I,j}} \quad (2.59)$$

และ

$$d_{I,j+1} = \frac{A_{I,j+1} \alpha_v}{a_{I,j+1}} \quad (2.60)$$

เป็นที่น่าสังเกตว่าสัมประสิทธิ์ $a_{i,j}, a_{i+1,j}, a_{I,j}$ และ $a_{I,j+1}$ ของสมการค่าแก้ความดันคือสัมประสิทธิ์ที่กึ่งกลางของสมการแปลงรูปของความเร็ว โดยมีจุด P คือ (I, J) $(i+1, J)$ (I, j) และ $(I, j+1)$ นั่นเอง

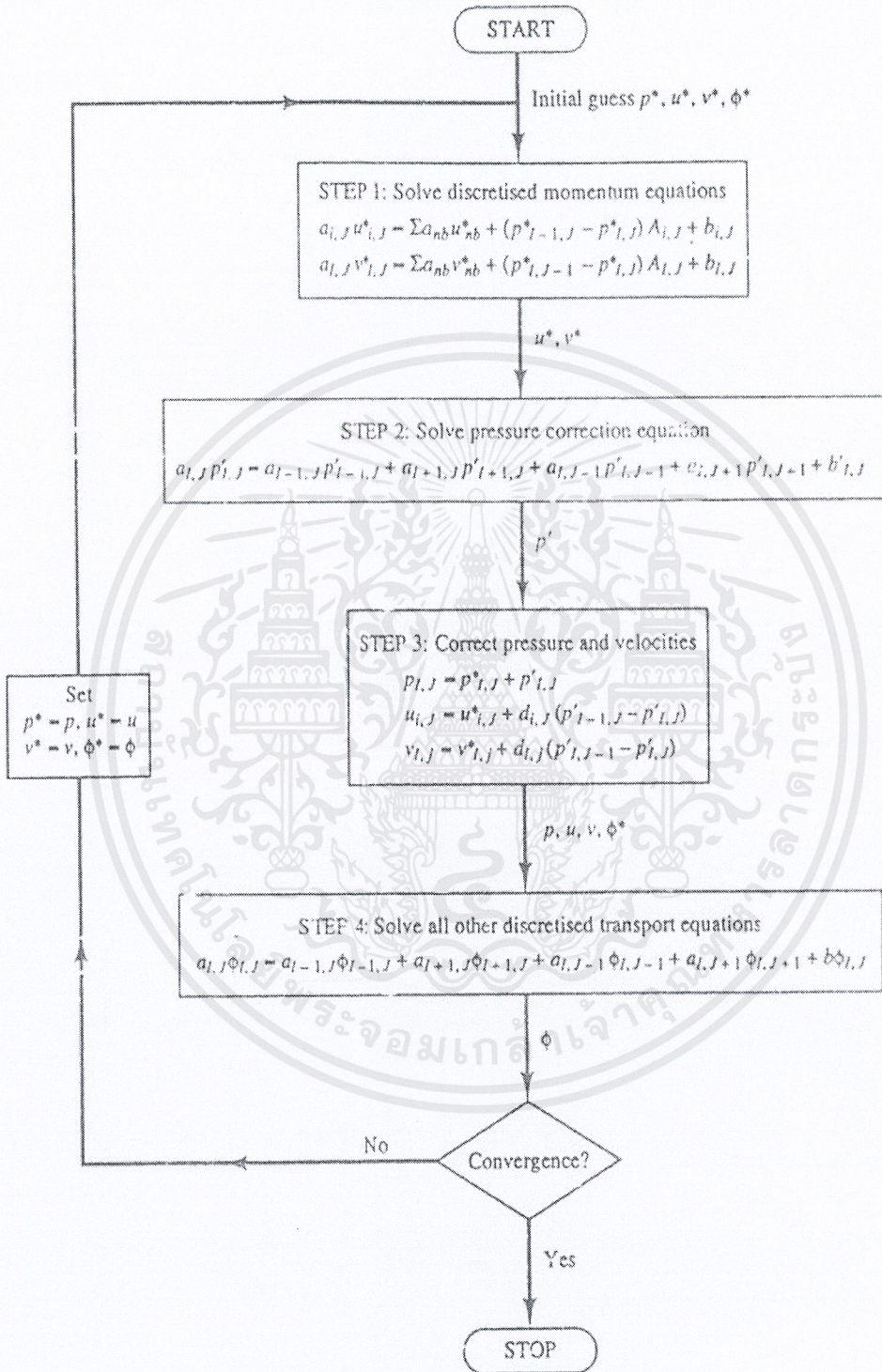
การเลือกค่า α มีผลต่อต้นทุนของการจัดการ ค่า α มากเกินไปทำให้น่าไปสู่การแกว่งหรืออาการแกว่งออกของคำตอบ ถ้าค่า α น้อยเกินไปจะเป็นสาเหตุให้การลู่เข้าหาคำตอบเป็นไปอย่างช้าๆ ค่า α ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับกรณีและจำเป็นต้องพิจารณาเป็นกรณีแต่ละกรณี

2.7 กระบวนการวิธีที่สมบูรณ์ [4]

กระบวนการวิธี SIMPLE นั้น ให้คำตอบในการหาค่าความดัน และความเร็ว โดยกระบวนการวิธีทำซ้ำ ดังนั้นหากมีประมาณสเกลาร์อื่นใดที่ผูกติดอยู่กับสมการโมเมนตัม ก็จำเป็นต้องทำการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณเป็นลำดับ และวนกลับมาทำการคำนวณซ้ำอีก จนกระทั่งคำตอบทั้งหมดคู่เข้า ซึ่งได้ให้

Flow chart ไว้ในรูป 2.5



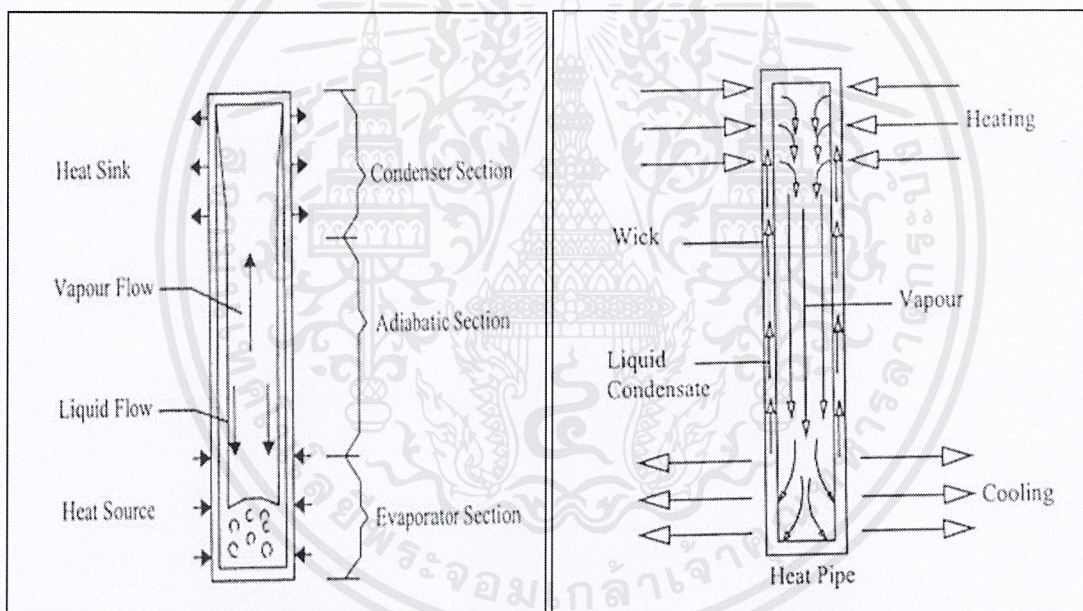
รูปที่ 2.5 ลำดับขั้นตอนการคำนวณวิธี SIMPLE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ท่อความร้อน (Heat pipe) [6]

Heat pipe หรือท่อความร้อน เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถนำความร้อนได้เร็วกว่าแท่งทองแดงทั่วไปถึงพันเท่าหากนำท่อความร้อนมาจุ่มในแก้วน้ำร้อนที่ปลายอีกข้างหนึ่งก็จะร้อนทันที หรือหากนำท่อความร้อนมาจุ่มในแก้วน้ำเย็น ที่ปลายอีกข้างหนึ่งก็จะเย็นทันที แนวคิดเกี่ยวกับท่อความร้อนประสบความสำเร็จโดย Gaugler ในปี 1942 แต่ก็ยังไม่สมบูรณ์ จนกระทั่ง Grover ได้พัฒนาเพิ่มเติมในปี 1960 นั้นเป็นจุดเริ่มต้นของการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนที่แพร่หลายเรื่อยมา

ท่อความร้อนมีลักษณะบางอย่างคล้ายกับ Thermosyphon ซึ่งมีประโยชน์ที่จะใช้อธิบายการทำงานก่อนที่จะกล่าวถึงท่อความร้อน ลักษณะของ Thermosyphon ได้แสดงในรูปที่ 2.6a



(a) Thermosyphon

(b) Heat pipe

รูปที่ 2.6 The heat pipe and thermosyphon. [7]

น้ำปริมาณน้อยได้ถูกบรรจุในท่อปิด ซึ่งได้ทำให้ภายในเป็นสุญญากาศแล้ว บริเวณจุดต่ำสุดของท่อจะถูกให้ความร้อนทำให้ของเหลวกลายเป็นไอ และไอจะเคลื่อนที่ไปบริเวณที่เย็นปลายสุดของท่อด้านบนเพื่อควบแน่น ไอที่ควบแน่นแล้วจะถูกนำกลับมายังบริเวณที่ร้อนโดยแรงโน้มถ่วงของโลกจากการที่ ความร้อนแฝง (Latent heat) ของการกลายเป็นไอมีค่ามาก ปริมาณความร้อนที่มากนี้สามารถถูกถ่ายเทได้ทั้งที่ความแตกต่างของอุณหภูมิจากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายอีกด้านหนึ่งมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อย จึงทำให้ Thermosyphon เป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพการนำความร้อนสูง Thermosyphon ได้ถูกนำมาใช้งานหลายปีแล้วและใช้กับ Working fluid หรือของไหลทำงาน ได้หลากหลาย แต่ข้อจำกัดในการใช้งานก็คือสารที่ควบแน่นจะถูกนำกลับมายังบริเวณ Evaporator ซึ่งเป็นบริเวณที่ต้องอยู่จุดต่ำสุดโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลก ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของ Thermosyphon นั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดของท่อ ชนิดของท่อ ลักษณะการติดตั้งท่อ ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งความเย็น เป็นต้น

ท่อความร้อนพัฒนาจาก Thermosyphon ในการแยกไอและของเหลวโดยใช้ Wick หรือไส้ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนถูกบรรจุไว้ในผิวหน้าด้านในท่อ โดยของเหลวไหลอยู่ใน Wick ด้วยแรง Capillary เพื่อนำสารที่ควบแน่นกลับมายังบริเวณ Evaporator (รูปที่ 2.6b) และไอจะไหลอยู่ใจกลางท่อ ในท่อความร้อนตำแหน่งของ Evaporator ไม่ได้จำกัดและสามารถปรับเปลี่ยนได้ ถ้า Evaporator อยู่จุดต่ำสุด แรงโน้มถ่วงจะมีอำนาจมากกว่าแรง Capillary นั่นคือคำว่า ท่อความร้อน แสดงถึงอุปกรณ์ที่นำความร้อนได้สูง ที่อาศัยแรงต่างในการส่งสารควบแน่นกลับไปประเหยใหม่ เช่น ใช้แรงสู่ศูนย์กลาง Osmosis electrohydrodynamic ดังแสดงในตารางที่ 2.1

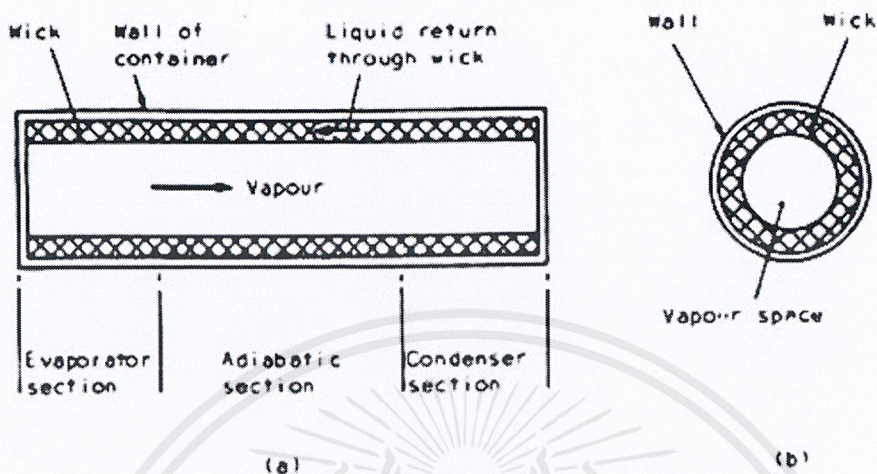
ตารางที่ 2.1 Methods of condensate return

Gravity	Thermal siphon
Capillary force	Standard heat pipe Loop heat pipe
Centripetal force	Rotating heat pipe
Electrokinetic forces	Electrohydrodynamic heat pipe Electro-osmotic heat pipe
Magnetic forces	Magneto-hydrodynamic heat pipe Magnetic fluid heat pipe
Osmotic forces	Osmotic heat pipe
Bubble pump	Inverse thermal siphon

2.8.1 โครงสร้าง การทำงานและคุณสมบัติของท่อความร้อน

ส่วนประกอบหลักของท่อความร้อนมาตรฐาน ได้แสดงในรูปที่ 2.7 ในทิศทางตามยาว (รูป 2.7a) ท่อความร้อนมีส่วนที่เป็น Evaporator และ Condenser สองส่วนนี้จะถูกแยกออกจากกัน โดย

ส่วนที่เรียกว่า Adiabatic พื้นที่หน้าตัดของท่อความร้อนแสดงในรูปที่ 2.7b ประกอบไปด้วยผนังท่อ โครงสร้างของ Wick และ Vapor space



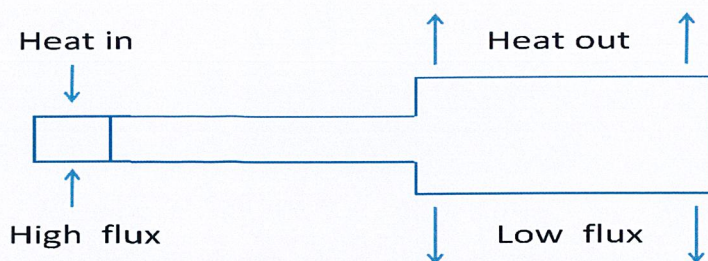
รูปที่ 2.7 The main regions of the heat pipe. [6]

ประสิทธิภาพของท่อความร้อนจะแสดงในรูปของ การนำความร้อนสมมูล (Equivalent thermal conductivity) ความสามารถในการนำฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนจะต่างกันตามชนิดของ Working fluid เช่น ใช้ ลิเทียมเป็น Working fluid ที่ 1,500 องศาเซลเซียส ค่า Flux ในแนวแกน มีค่าถึง 10-20 kW/cm² เป็นต้น ดังนั้นหากเลือก Working fluid และ วัสดุที่ใช้ทำท่อได้เหมาะสม ก็ สามารถสร้างท่อความร้อนที่ทำงานในช่วงอุณหภูมิกว้างๆได้ ในการใช้งานส่วนมากท่อความร้อนรูปทรงกระบอกนั้นมีความเหมาะสม แต่รูปทรงอื่นๆก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ถ้ามีความต้องการเป็นพิเศษ

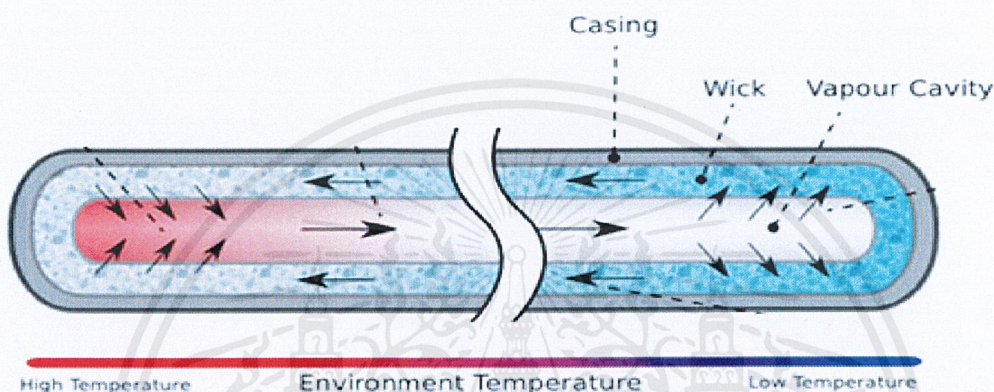
ท่อความร้อนควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีประสิทธิภาพการนำความร้อนสูง
2. สามารถทำหน้าที่เป็นเหมือนตัวแปลง Flux ความร้อน (อธิบายในรูปที่ 2.8)
3. ผนังผิวด้าน Condenser จะต้องมียุณหภูมิที่สม่ำเสมอ เพราะถ้าปริมาณความร้อนเปลี่ยนแปลงไป ให้อัจฉนวนมากจะควมแน่นที่จุดนี้ จึงควรรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในระดับเดิมตลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 พลั๊กซ์ความร้อนของท่อความร้อน [6]



รูปที่ 2.9 วัฏจักรการทำงานของท่อความร้อน [8]

2.8.2 องค์ประกอบพื้นฐานของท่อความร้อน

1. Container (ภาชนะบรรจุ)

ภาชนะบรรจุเป็นตัวแยก Working fluid ออกจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ป้องกันการรั่ว รักษาความต่างของความดันระหว่างผนัง และเป็นตัวการการถ่ายโอนความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกไปยัง Working fluid

การเลือกวัสดุของภาชนะบรรจุ (Container) ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างมีดังต่อไปนี้

- สามารถใช้งานได้ดีกับ ทั้ง Working fluid และ สภาพแวดล้อมภายนอก
- อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนัก มีความสำคัญต่อการใช้งานด้านยานอวกาศ
- ค่าการนำความร้อน ควรมีค่าการนำความร้อนสูงๆเพื่อให้อุณหภูมิระหว่างแหล่งความร้อนและ Wick มีค่าน้อยที่สุด
- ง่ายต่อการผลิต รวมถึงการเชื่อม ประกอบ
- ความเป็นรูปทรง วัสดุไม่ควรมีรูปทรงเพื่อป้องกันการแพร่ของไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Working fluid

ข้อพิจารณาแรกในการเลือกใช้ Working fluid คือ คู่ที่ช่วงอุณหภูมิที่เป็นไอของสาร

Working fluid ที่เหมาะสมควรมีลักษณะดังนี้

- มีความเข้ากันได้กับ Wick และวัสดุผนัง
- มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี
- ความร้อนแฝงสูง
- ค่าการนำความร้อนสูง
- ความหนืดต่ำ
- แรงตึงผิวสูง
- มีจุดแข็งหรือจุดไหลเหวที่ยอมรับได้

3. Wick

เป็น โครงสร้างที่มีรูพรุนทำมาจากวัสดุจำพวกเหล็ก, อะลูมิเนียม, นิกเกิล หรือ คอปเปอร์ ที่มีขนาดของรูพรุนต่างๆกัน สามารถผลิตได้จากการทำให้เป็น โฟม (Metal foam) และการอัดวัสดุที่เป็นเส้นใย (Felt) ซึ่งได้รับความนิยมมากเพราะสามารถควบคุมขนาดของรูพรุนได้โดยควบคุมความดันที่ใช้อัดในกระบวนการผลิต

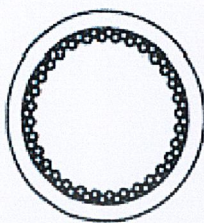
เป้าหมายหลักในการใช้ Wick คือเพื่อทำให้เกิด Capillary pressure ในการลำเลียง Working fluid จากส่วน Condenser ไปยังส่วน Evaporator และต้องสามารถกระจายของเหลวไปรอบๆพื้นผิวส่วน Evaporator ที่ได้รับความร้อนจากภายนอกได้ จึงมักนำสองหลักนี้มาใช้พิจารณาในการเลือก Wick แต่ปัจจัยที่ใช้ในการเลือก Wick ยังมีอีกหลายตัวซึ่งส่วนมากจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติของ Working fluid

2.8.3 ชนิดของไส้ในท่อความร้อน (Wicks type of heat pipe)

ของไหลทำงานในท่อความร้อนจะไหลไปตามทางยาวของท่อ โดยผลของแคปิลลารี (Capillary action) ที่เกิดจากไส้ของท่อความร้อนที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งตามชนิดของไส้มี 4 ชนิดดังนี้

1.) Metal sintered powder wicks

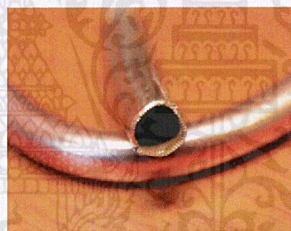
มีลักษณะเป็นผงโลหะอัดติกรอบภายในผนังท่อ ผงทองแดงเผาขึ้นเกิดขึ้นจากกระบวนการทาง พันธะ ซึ่งเกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นต้นทุนในการผลิตท่อความร้อนชนิดนี้จะสูง



รูปที่ 2.10 Metal sintered powder wicks [9]

2.) Grooved wicks

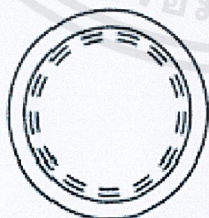
เกิดจากการเซาะร่องเป็นรูปทรงต่างๆภายในท่อ รูปทรงของร่องมีผลต่อประสิทธิภาพของท่อ ต้นทุนการผลิตท่อชนิดนี้จะต่ำ เพราะร่องสร้างได้ง่าย อย่างไรก็ตามใ้ชนิดนี้จะไวต่อแรงโน้มถ่วงและสามารถวางท่อในแนวที่ระนาบไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปจะวางในแนวตั้งจะดีที่สุด



รูปที่ 2.11 Grooved wicks [9]

3.) Metal mesh wicks

มีลักษณะเป็นตาข่ายโลหะวางเรียงซ้อนกันหลายชั้นรอบๆภายในท่อความร้อน

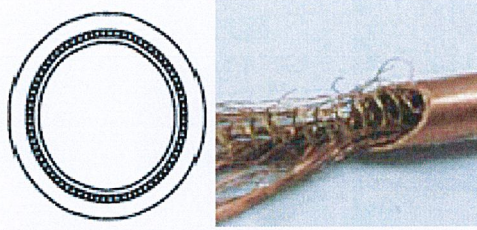


รูปที่ 2.12 Metal mesh wicks [9]

4. Fine fiber bundle wick

มีลักษณะเป็นเส้นใยโลหะที่บรรจุอยู่เต็มท่อ ทำให้ช่วยเสริมการไหลของของเหลวในท่อ แต่ประสิทธิภาพในการนำความร้อนไม่สูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 Fine fiber bundle wicks [9]

2.8.4 ประโยชน์ของท่อความร้อน

- เป็นระบบที่ไม่ใช้เครื่องกลไกใดๆจึงช่วยตัดปัญหาเรื่องเปลี่ยนหรือซ่อมแซมอะไหล่
- เป็นทางเลือกของระบบเพิ่มความร้อนโดยใช้ไฟฟ้า (Electric Reheat) ซึ่งกินไฟมาก
- ไม่ต้องคอยดูแลรักษา เพียงทำความสะอาดตามปกติ
- ประหยัดพลังงาน
- ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม
- มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

2.9 เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) [10]

การจำแนกลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อซึ่งจะพิจารณา จากตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number: Re) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (2.61)$$

โดย Re คือ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
 v คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s) D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)
 μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล (kg/m s)

โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter, D_h) มี นิยามดังนี้

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m^2)

P คือ ความยาวของเส้นรอบรูปของการไหล (m)

hydraulic diameter สำหรับท่อที่มีหน้าตัดขวางเป็นวงกลม หาได้จากสมการ

$$D_h = \frac{4 \frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = D \quad (2.63)$$

โดย D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดขวางของท่อ (m)

hydraulic diameter สำหรับท่อที่มีหน้าตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยม ที่มีการไหลแบบเต็มท่อ หาได้จากสมการ

$$D_h = \frac{4LW}{2(L+W)} = \frac{2LW}{L+W} \quad (2.64)$$

hydraulic diameter สำหรับท่อที่มีหน้าตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีการไหลแบบเต็มท่อ ที่ $L=W$ จะได้ว่า

$$D_h = L = W \quad (2.65)$$

โดย L คือ ความยาวของพื้นที่หน้าตัดขวางของท่อ (m)

W คือ ความกว้างของพื้นที่หน้าตัดขวางของท่อ (m)

hydraulic diameter สำหรับท่อที่มีหน้าตัดขวางเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่มีการไหลแบบเต็มท่อ หาได้จากสมการ

$$D_h = \frac{L\sqrt{3}}{3} \quad (2.66)$$

โดย L คือ ความยาวด้านของสามเหลี่ยมด้านเท่า (m)

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

3.1 คำอธิบายการทดลอง

กระบวนการทำงานของท่อความร้อนคือ เมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อน ของไหลทำงานจะระเหยเป็นไอ และไหลตามท่อผ่านส่วนที่ไม่มีมีการแลกเปลี่ยนความร้อน (adiabatic zone) ไปยังอีกฝั่งของท่อแล้วคายความร้อนออกควบแน่นเป็นของเหลวไหลผ่านไส้ (wick) กลับไปยังฝั่งที่ได้รับความร้อนเป็นวัฏจักร เนื่องจากบริเวณที่มีความยาวมากคือ บริเวณที่ไม่มีมีการแลกเปลี่ยนความร้อน (Adiabatic zone) และของไหลที่ใช้พื้นที่ในการไหลส่วนมาก คือ ใช้น้ำ จากสมมติฐานดังกล่าวจึงศึกษาการไหลในส่วนที่ไม่มีแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้น้ำเป็นของไหลที่ศึกษา

สำหรับการไหลภายในท่อความร้อนตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการไหลคือ ลักษณะของท่อและชนิดของไส้ที่บรรจุอยู่ ซึ่งลักษณะของท่อที่ทำการศึกษาในครั้งนี้คือท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมและท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม ส่วนของไส้ที่ศึกษาคือ ชนิดเขาระ่อง (Groove wicks heat pipe) และชนิดเส้นใย (Fine fiber bundle wicks heat pipe) ในการศึกษาได้เป็น 3 ตอน โดย

ตอนที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากโปรแกรมกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับการไหลในท่อหน้าตัดวงกลม

ตอนที่ 2 สร้างแบบจำลองท่อที่มีหน้าตัดต่างกันประกอบด้วย ท่อที่มีการเขาระ่อง ท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมและท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรลิกเท่ากับ 5.4 mm. อ้างอิงจากเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อความร้อนที่มีใช้งานจริง แล้วทำนายผลแบบจำลองทั้งหมดด้วยโปรแกรมที่สภาวะเดียวกัน

ตอนที่ 3 นำแบบจำลองท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมและท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่สร้างในตอนที่ 2 มาศึกษาเกี่ยวกับการไหลผ่านวัสดุที่เป็นรูพรุน (ไส้ชนิดเส้นใย)

3.2 ขั้นตอนการทำการทดลอง

การทดลองแบ่งได้เป็น 3 ตอน โดยแต่ละตอนสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สรุปแบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง

ตอนที่	แบบจำลองที่	รูปร่างหน้าตัด	Reynolds Number	ความเร็ว (m/s)	Porosity
1	1	วงกลม	1,000	4.477	1
2	1	วงกลม	1,000	4.477	1
	2	สามเหลี่ยมด้านเท่า	1,000	4.477	1
	3	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	1,000	4.477	1
	4	วงกลมเจาะรู	1,000	4.477	1
3	2	สามเหลี่ยมด้านเท่า	1,000	4.477	0.5
			1,000	4.477	0.8
			1,000	4.477	1
	3	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	1,000	4.477	0.5
			1,000	4.477	0.8
			1,000	4.477	1
	4	วงกลมเจาะรู	1,000	4.477	0.5
			1,000	4.477	0.8
			1,000	4.477	1

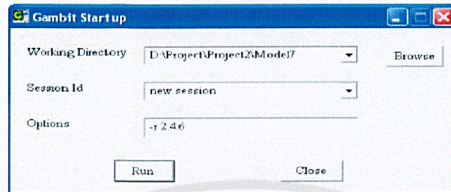
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 1 เปรียบเทียบผลการทำนายจากโปรแกรมกับผลจากการคำนวณ โดยทฤษฎี

- ส่วนที่ 1 การสร้างแบบจำลอง

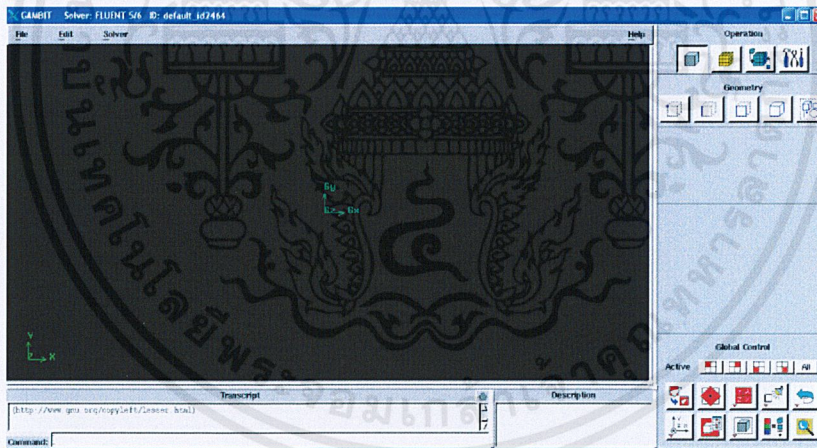
แบบจำลองที่ 1 ท่อหน้าตัดวงกลม

1. เลือก start/All Programs/Fluent Inc Products/Gambit 2.4.6/Gambit2.4.6 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

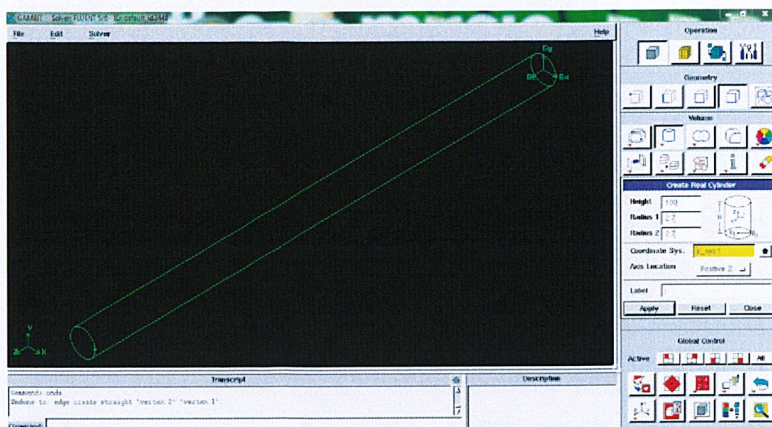


รูปที่ 3.2 โปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 1

3. สร้างปริมาตรทรงกระบอกที่มีรัศมี 2.7 หน่วย ยาว 100 หน่วย โดยเลือก Operation/ Geometry/ Volume/ Create Real Cylinder กำหนด Height เท่ากับ 100 กำหนด Radius 1 และ Radius 2 เท่ากับ 2.7 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 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

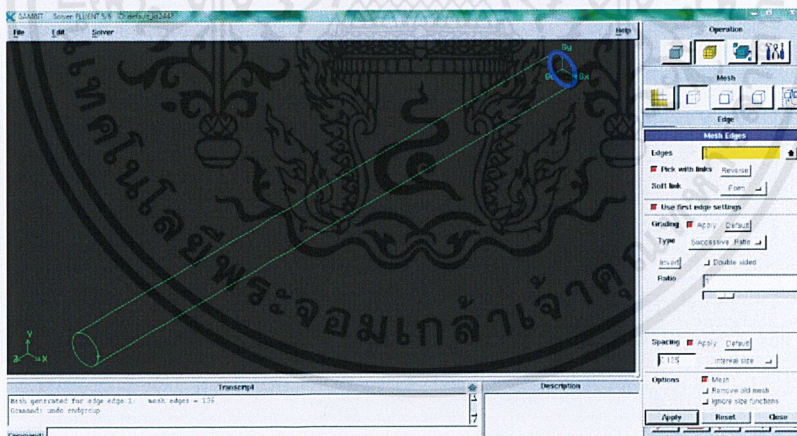


รูปที่ 3.3 แบบจำลองที่ 1 ทรงกระบอกที่มีรัศมี 2.7 หน่วย ยาว 100 หน่วย

- 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 size เท่ากับ 0.125 แล้วเลือก Apply แสดงดังรูปที่ 3.4

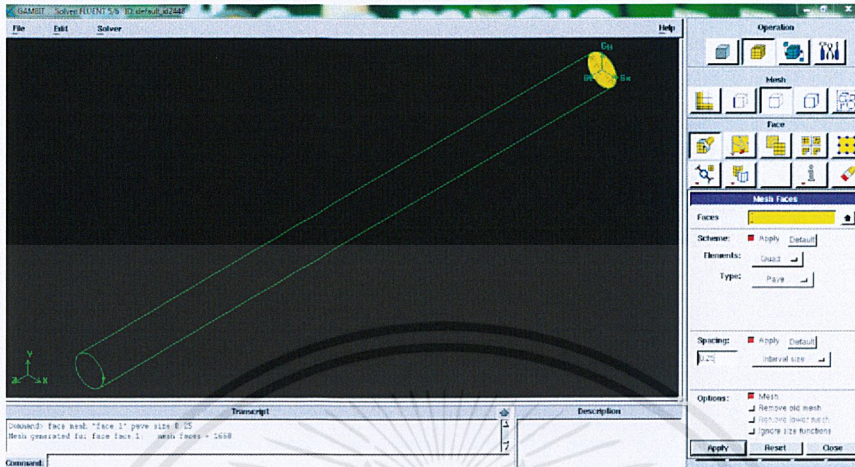


รูปที่ 3.4 แบบจำลองที่ 1 ที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบ

2. การสร้างกริดบนพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

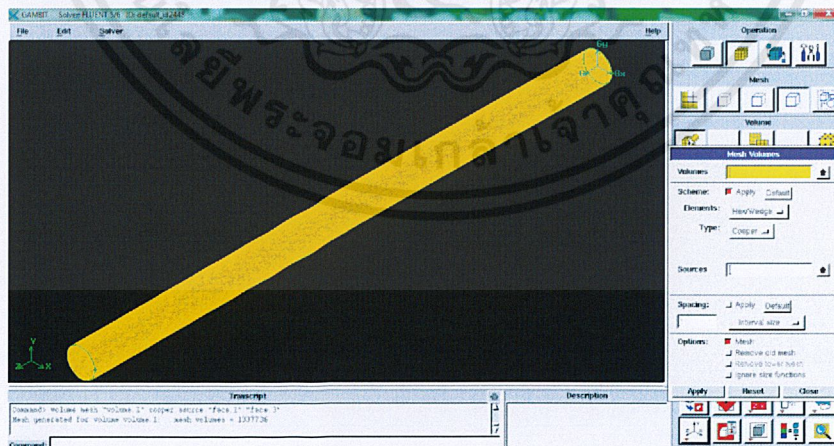
เลือก Operation/Mesh/Face/Mesh Faces เลือก Faces คือ face.1 กำหนด Elements เป็น Quad และ Type เป็น Pave กำหนด Spacing เป็น Interval size เท่ากับ 0.25 แล้วเลือก Apply แสดงดังรูปที่ 3.5



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 จะได้แบบจำลองที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบจำลองที่ 1 ที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การกำหนด Boundary และ Cotinuum

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

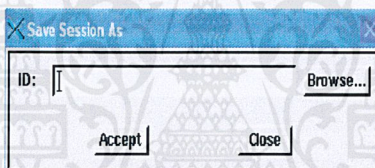
4.2 เลือกพื้นผิว face.3 กำหนด Name เป็น Outlet พร้อมกำหนด Type เป็น PRESSURE_OUTLET แล้วเลือก Apply

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

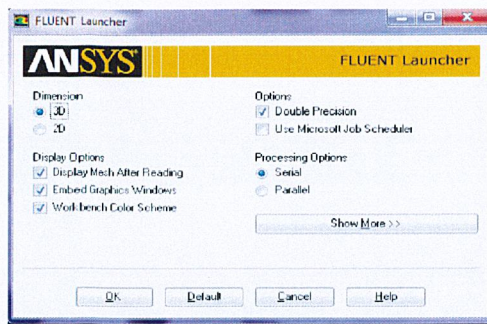
พิมพ์ ID ตามต้องการ แล้วเลือก Accept

6. การบันทึก Mesh เพื่อส่งไปคำนวณในโปรแกรม Fluent 12.0.16

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

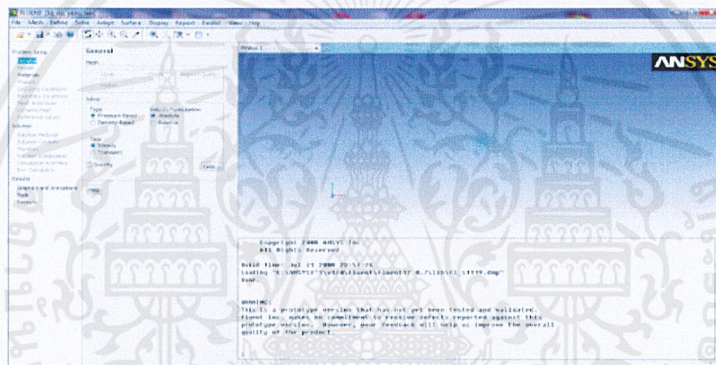
- ส่วนที่ 3 การคำนวณโดยโปรแกรม Fluent 12.0.16

1. เลือก Fluent 12.0.16 จะเห็นหน้าต่างดังรูปที่ 3.8



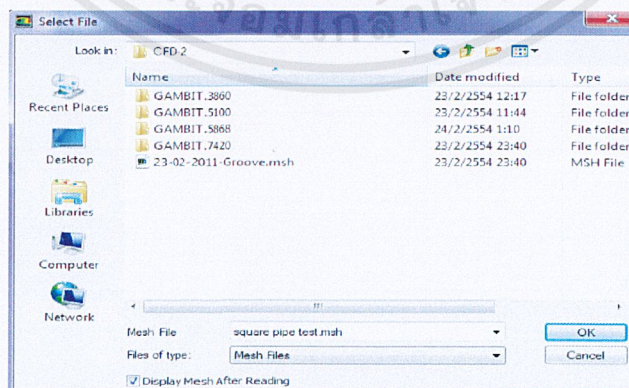
รูปที่ 3.8 หน้าต่างก่อนเข้าโปรแกรม Fluent 12.016

2. กำหนด Dimension เป็น 3D และกำหนด Options เป็น Double Precision แล้วเลือก OK จะเห็นหน้าต่างดังรูปที่ 3.9



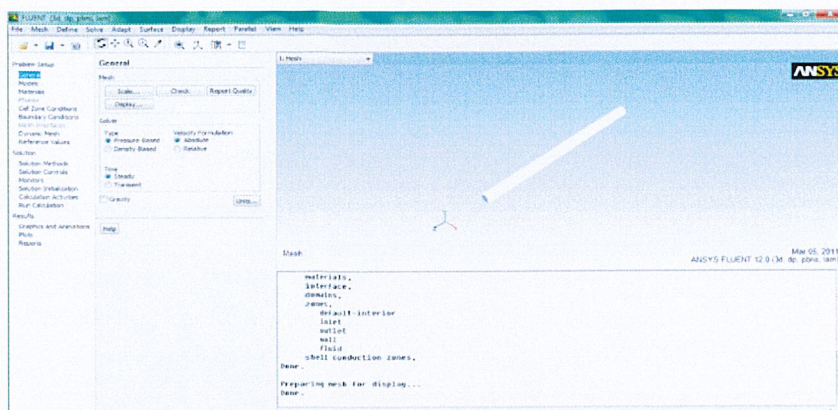
รูปที่ 3.9 โปรแกรม Fluent 12.0.16

3. เลือก File/Read/Mesh จะเห็นหน้าต่างดังรูปที่ 3.10



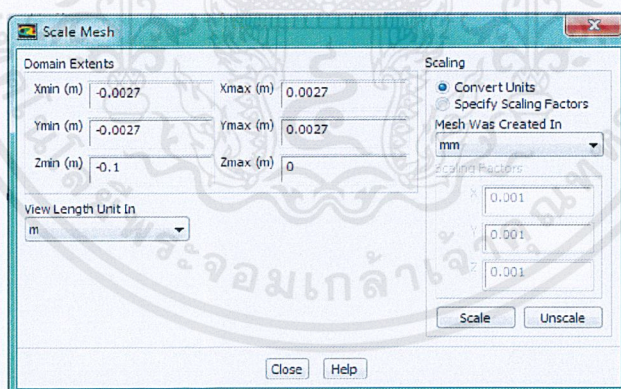
รูปที่ 3.10 หน้าต่างการเลือกไฟล์

4. เลือกไฟล์ (.msh) ที่บันทึกเอาไว้ แล้วเลือก OK โปรแกรมจะแสดงแบบจำลองที่เลือกดังรูปที่ 3.11 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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 mm แล้วเลือก Scale โปรแกรมจะคำนวณขนาดของแบบจำลอง แสดงดังรูป 3.12 แล้วเลือก Close

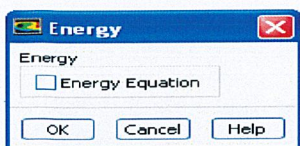


รูปที่ 3.12 หน้าต่างการกำหนดขนาดของแบบจำลอง

7. เลือก General/Mesh เลือก Gravity กำหนด Gravity แกน y เท่ากับ -9.8 m/s
8. ตั้งค่าสมการที่ใช้ในการจำลอง

8.1 เลือก Models/Energy-off แล้วเลือก Edit โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 หน้าต่างการตั้งค่าสมการพลังงาน

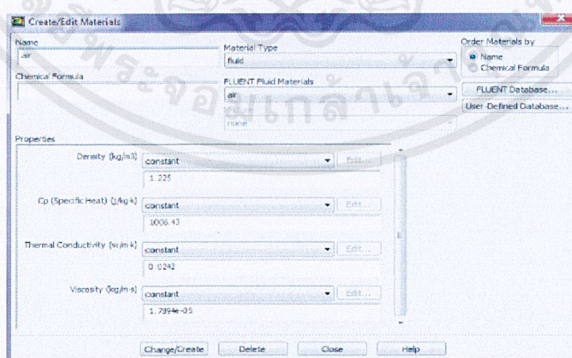
เลือก Energy Equation แล้วเลือก OK โปรแกรมจะเปลี่ยนจาก Energy – Off เป็น Energy – On

8.2 เลือก Models/Viscous-laminar โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ หลังจากนั้นเลือก Laminar แล้วเลือก OK



รูปที่ 3.14 หน้าต่างแสดงการเลือกสมการการไหล

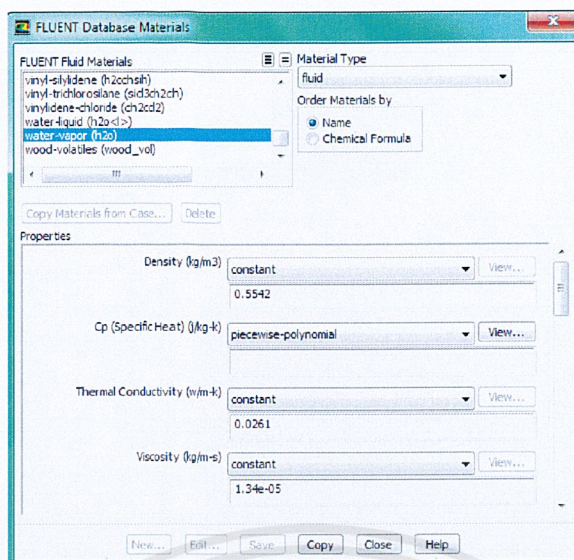
9. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุโดยเลือก Materials/Create/Edit โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงหน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

เลือก FLUENT Database โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.16

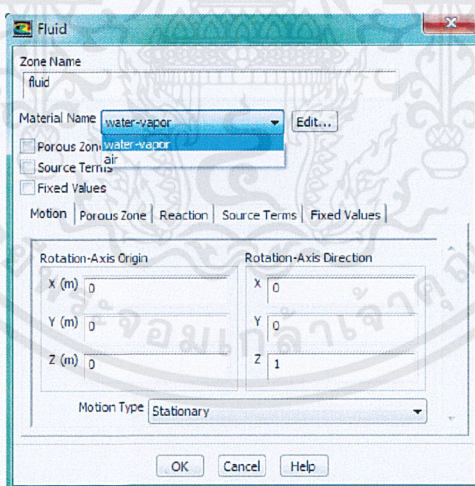
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 หน้าต่างแสดงหน้า FLUENT Database Materials

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

10. กำหนดชนิดของไหล เลือก Cell Zone Conditions โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.17 ให้เปลี่ยน Material name เป็น water-vapor แล้วเลือก OK

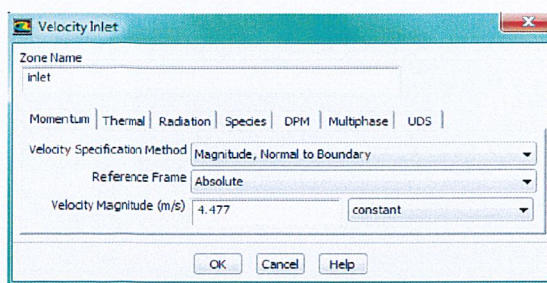


รูปที่ 3.17 แสดงหน้าต่างการกำหนดชนิดของไหล

11. กำหนด Boundary Conditions

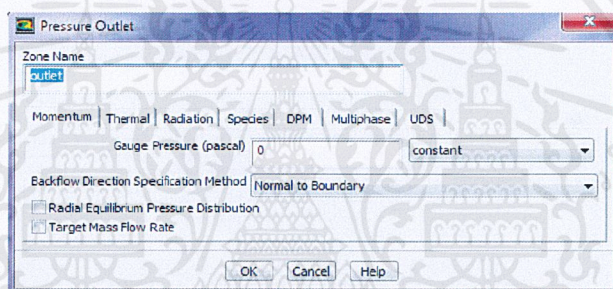
11.1 กำหนด Boundary Condition ของไอน้ำไหลเข้า ด้วยการเลือก Boundary/ Conditions/ Inlet/Edit กำหนดความเร็วเท่ากับ 4.477 m/s และเลือก Thermal กำหนด Temperature(K) เท่ากับ 373.15 เลือก OK แสดงดังรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



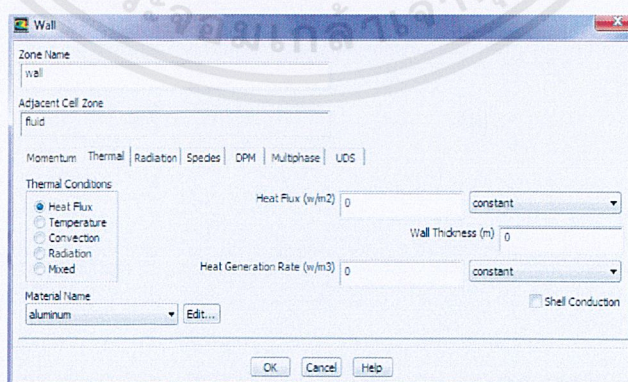
รูปที่ 3.18 การกำหนดความเร็วและอุณหภูมิขาเข้าของไอน้ำ

11.2 กำหนด Boundary Condition ของไอน้ำไหลออก ด้วยการเลือก Boundary/ Conditions/ outlet/Edit กำหนด Gauge Pressure (pascal) เท่ากับ ศูนย์ และเลือก Thermal กำหนด Temperature(K) เท่ากับ 373.15 เลือก OK ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงการกำหนดความดันและอุณหภูมิไอน้ำขาออก

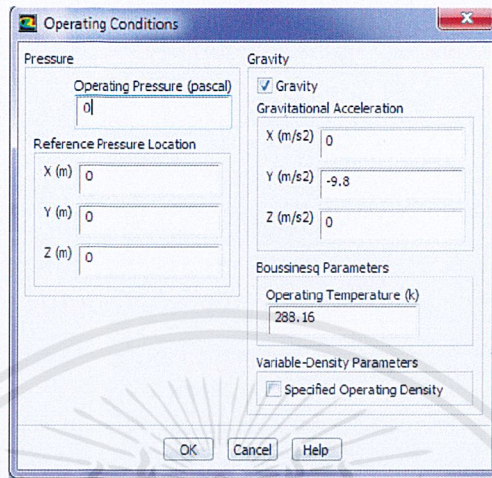
11.3 กำหนด Boundary Condition ของผนัง ด้วยการเลือก Boundary Conditions/wall/Edit กำหนด Heat Flux (w/m²) เท่ากับ ศูนย์ แล้ว เลือก OK แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แสดงการกำหนด Boundary Condition ของผนังท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.4 เลือก Operating Condition กำหนดค่า Operating Pressure (pascal) เท่ากับ ศูนย์ แล้ว
เลือก OK แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงการกำหนด Operating Condition

12. การกำหนด Solution Methods

เลือก Solution Method แล้วกำหนดวิธีการคำนวณหาค่าตอบตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การกำหนด Solution Method

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

13. กำหนด Solution Controls

เลือก Solution Controls แล้วกำหนด Under-Relaxation Factors ตามตารางที่ 3.3

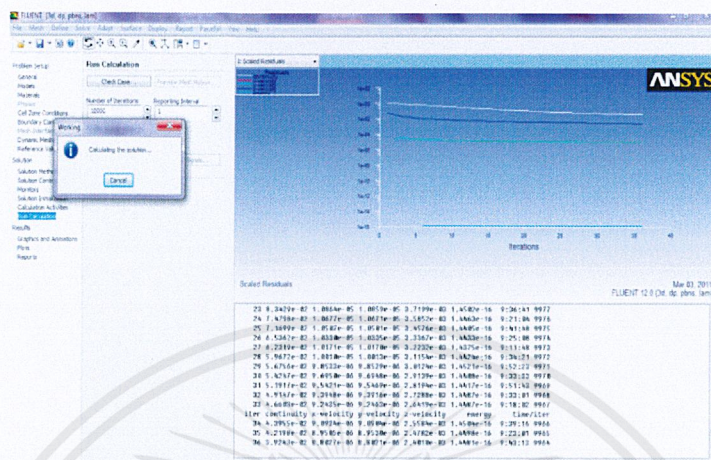
ตารางที่ 3.3 ค่า Under-Relaxation Factors

Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.7
Energy	1

14. เลือก Solution Initialization กำหนด Compute from ให้เป็น inlet แล้วเลือก Initialize

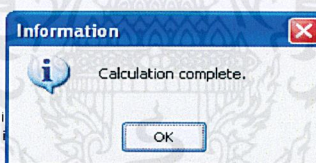
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. เลือก Run Calculation กำหนดค่า Number of Iterations เท่ากับ 1,000 แล้วเลือก Calculate โปรแกรมก็จะเริ่มทำการคำนวณ แสดงการคำนวณของโปรแกรมดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงการคำนวณของโปรแกรม Fluent.12.0.16

เมื่อการคำนวณเสร็จสิ้น โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 หน้าต่างแสดงการคำนวณเสร็จสิ้น

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

ตอนที่ 2 ศึกษาการไหลในท่อที่มีหน้าตัดต่างกัน

แบบจำลองที่ 1 (ท่อหน้าตัดวงกลม)

ใช้แบบจำลองและผลการจำลองที่ได้ในตอนที่ 1

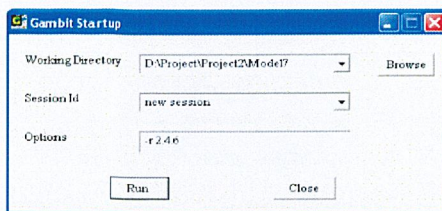
แบบจำลองที่ 2 (ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า)

- ส่วนที่ 1 การสร้างแบบจำลอง

1. เลือก start/All Programs/Fluent Inc Products/Gambit 2.4.6/Gambit2.4.6 จะเห็นหน้าต่าง

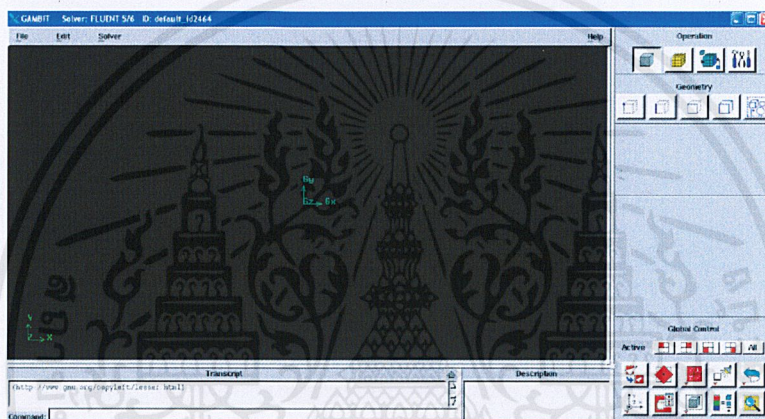
ดังรูปที่ 3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 หน้าต่างก่อนการเข้าโปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 2

2. เลือก Working Directory และ Session Id ตามที่ต้องการ แล้วเลือก Run จะเห็นหน้าต่าง ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 โปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 2

3. สร้างจุด 3 จุด เป็นมุมของรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยเลือก Geometry/Vertex/From Coordinate/Create Real Vertex กำหนดให้ค่า $(x, y, z) = (4.6765, 0, 0)$ แล้วเลือก Apply จะได้ จุด Vertex.1 ที่ระนาบ xy ทำซ้ำแต่เปลี่ยนค่าตามตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.4 การกำหนดจุดที่มุมสามเหลี่ยมด้านเท่า

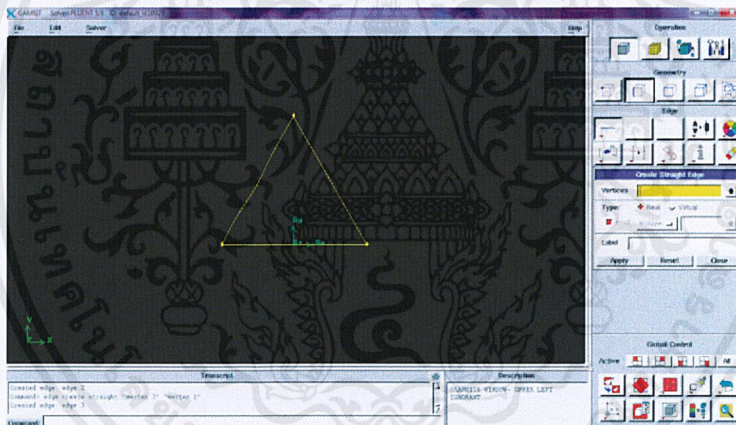
Name	x	y	z
Vertex.2	-4.6765	0	0
Vertex.3	0	8.1	0

หลังจากนั้นจะได้จุดทั้งสี่จุดแสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 แสดงจุดที่มุมของสามเหลี่ยมด้านเท่า

4. สร้างเส้นเชื่อมระหว่างจุดทั้งสามจุด โดยเลือก Geometry/Edge/Straight/Create Straight Edge เลือกจุด Vertex.1 ถึง Vertex.3 แล้วเลือก Apply (ทำซ้ำอีกครั้งโดยเลือก Vertex.3 และ Vertex.1) จะได้สามเหลี่ยมด้านเท่าดังรูปที่ 3.27

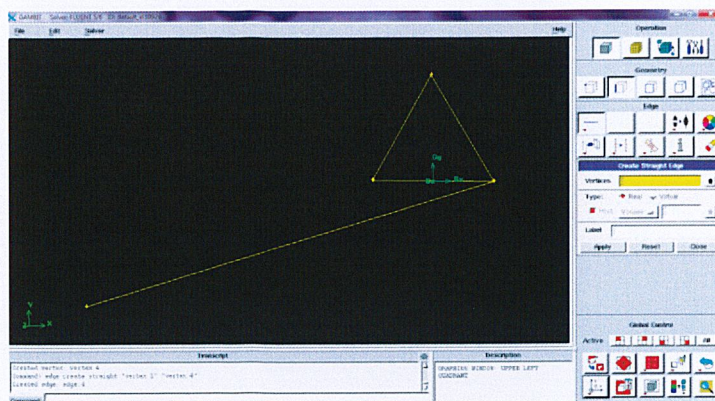


รูปที่ 3.27 แสดงรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

5. สร้างเส้นสำหรับใช้สร้างปริมาตรทรงกระบอก

5.1 เลือก Geometry/Vertex/From Coordinate/Create Real Vertex กำหนดให้พิกัด (x, y, z) คือ (4.6765, 0, 100) แล้วเลือก Apply

5.2 เลือก Geometry /Edge/Straight/Create Straight Edge เลือกจุด Vertex.1 และ Vertex.4 แล้วเลือก Apply จะได้เส้นตรงตามแกน z แสดงดังรูปที่ 3.28



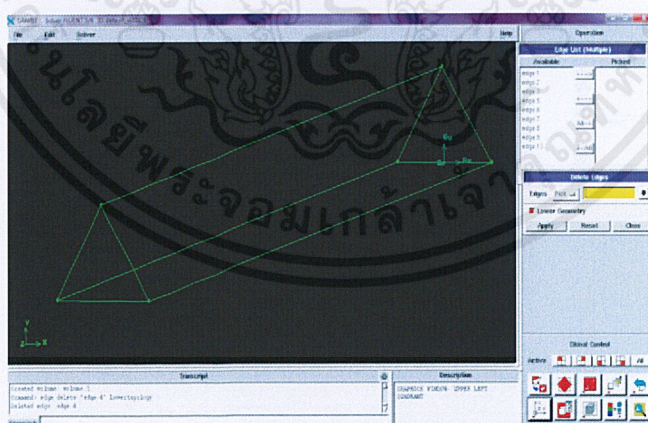
รูปที่ 3.28 แสดงเส้นสำหรับใช้สร้างปริมาตร

6. สร้างปริมาตรทรงกระบอกดังนี้

6.1 เลือก Geometry/Face/Wireframe/Create Face from Wireframe เลือกเส้น edge.1 ถึง edge.3 แล้วเลือก Apply

6.2 เลือก Geometry/Volume/Sweep Face เลือกพื้นผิว face.1 เลือกเส้นขอบ edge.4 แล้วเลือก Apply

6.3 เลือก Geometry /Edge/Delete Edges เลือกเส้นขอบ edge.4 แล้วเลือก Apply จะได้ท่อทรงกระบอกหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า แสดงดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 แสดงท่อทรงกระบอกหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า

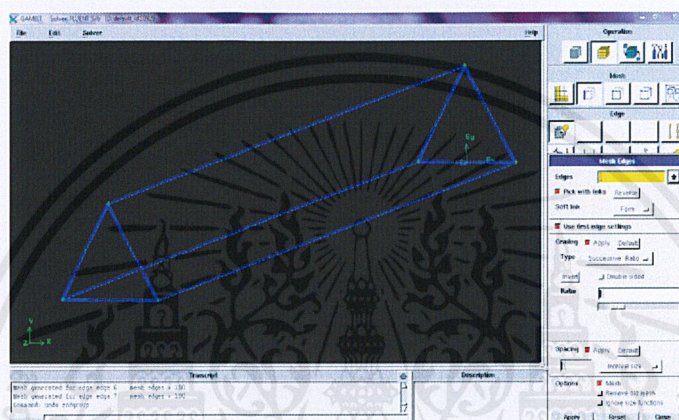
- ส่วนที่ 2 การสร้างกริด (Grid Generation or Mesh Generation)

1. การสร้างกริดบนเส้นขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 เลือก Mesh/Edge/Mesh Edge เลือกเส้นขอบ edge.1 edge.2 edge.3 edge.8 edge.9 และ edge.10 กำหนด Type เป็น Bi-exponent กำหนด Ratio เป็น 0.8 และกำหนด Spacing โดยเลือก Interval size เท่ากับ 0.1 แล้วเลือก Apply

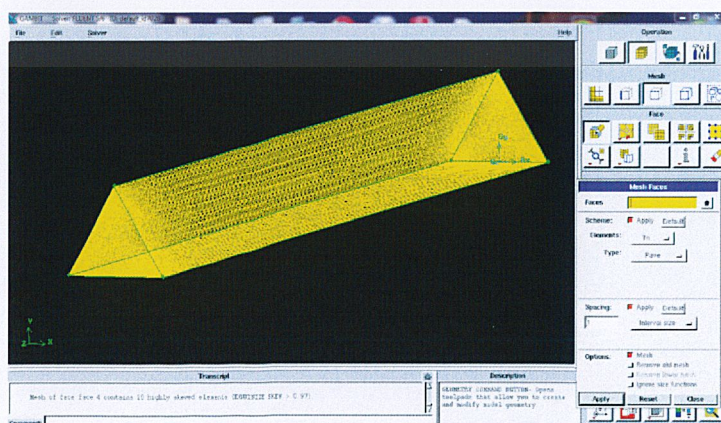
1.2 เลือก Mesh/Edge/Mesh Edge เลือกเส้นขอบ edge.5 edge.6 และ edge.7 กำหนด Type เป็น Successive Ratio กำหนด Ratio เท่ากับ 1 และกำหนด Spacing โดยเลือก Interval size เท่ากับ 0.1 แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบอย่างสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 แบบจำลองที่ 2 ที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบอย่างสมบูรณ์

2. การสร้างกริดบนพื้นผิว

เลือก Mesh/Face/Mesh Faces เลือกพื้นผิว face.1 และ face.5 กำหนด Elements เป็น Tri และ Type เป็น Pave เลือกพื้นผิว face.2 face.3 และ face.4 กำหนด Elements เป็น Tri และ Type เป็น Pave แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการกำหนดกริดบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.31

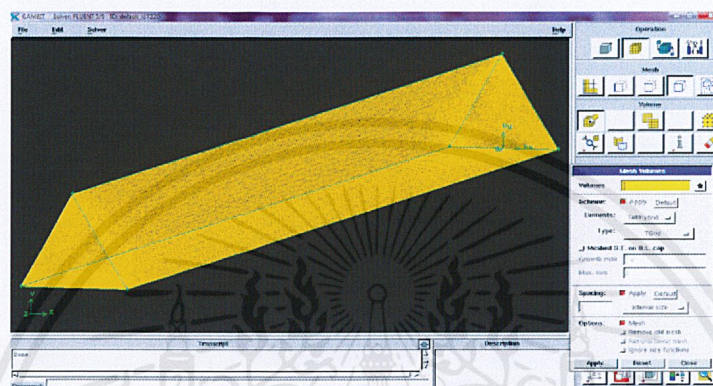


รูปที่ 3.31 แบบจำลองที่ 2 ที่มีการสร้างกริดบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การสร้างกริดในปริมาตร

เลือก Mesh/volume/Mesh volumes เลือกปริมาตร กำหนด Elements เป็น Tet/Hybrid และ Type เป็น TGrid แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 แบบจำลองที่ 2 ที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์

4. การกำหนด Boundary และ Continuum

4.1 เลือก Zones/Specify Boundary Types เลือกพื้นผิว face.1 กำหนด Name เป็น Inlet พร้อมกำหนด Type เป็น VELOCITY_INLET แล้วเลือก Apply (ทำซ้ำแต่เปลี่ยนพื้นผิว เปลี่ยน Name และเปลี่ยน Type ตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การกำหนด Boundary แต่ละพื้นผิว

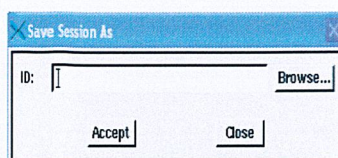
พื้นผิว	Name	Type
face.5	Outlet	PRESSURE_OUTLET
face.2 face.3 และ face.4	Wall	WALL

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

5. การบันทึกข้อมูล

5.1 เลือก File/Save As จะเห็นหน้าต่างดังรูปที่ 3.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 หน้าต่างการบันทึกข้อมูลสำหรับแบบจำลองที่ 2

5.2 พิมพ์ ID ตามต้องการ แล้วเลือก Accept

6. การบันทึก Mesh เพื่อส่งไปคำนวณในโปรแกรม Fluent 12.0.16

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

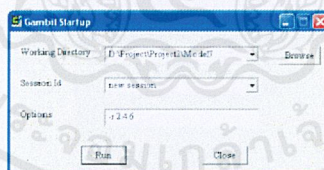
- ส่วนที่ 3 การคำนวณโดยโปรแกรม Fluent 12.0.16

ทำการคำนวณตามขั้นตอนที่ 1 (แบบจำลองที่ 1)

แบบจำลองที่ 3 ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

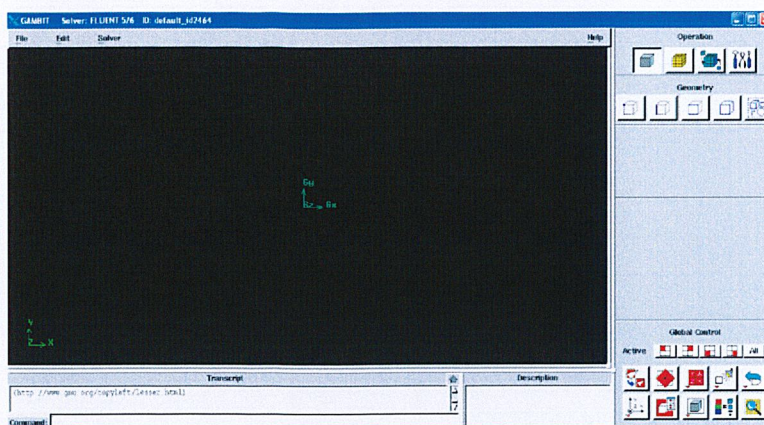
ส่วนที่ 1 การสร้างแบบจำลอง

1. เลือก start/All Programs/Fluent Inc Products/Gambit 2.4.6/Gambit2.4.6 จะเห็นหน้าต่าง ดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 หน้าต่างก่อนการเข้าโปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 3

2. เลือก Working Directory และ Session Id ตามที่ต้องการ แล้วเลือก Run จะเห็นหน้าต่าง ดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 โปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 3

3. สร้างจุด 4 จุด เป็นมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยเลือก Geometry/Vertex/From Coordinate/Create Real Vertex กำหนดให้ค่า $(x,y,z) = (0,0,0)$ แล้วเลือก Apply จะได้จุด Vertex.1 ที่จุดกำเนิดระนาบ xy ทำซ้ำแต่เปลี่ยนค่าตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การกำหนดจุดที่มุมสี่เหลี่ยมจัตุรัส

Name	x	y	z
Vertex.2	5.4	0	0
Vertex.3	5.4	5.4	0
Vertex.4	0	5.4	0

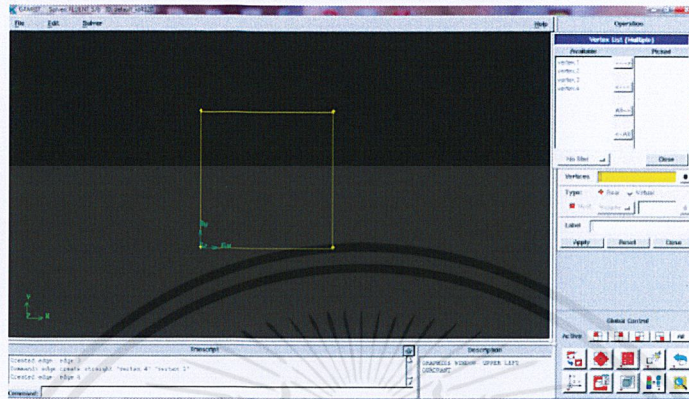
หลังจากนั้นจะได้จุดทั้งสี่จุดแสดงดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 จุดที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สร้างเส้นเชื่อมระหว่างจุดทั้งสี่จุด โดยเลือก Geometry/Edge/Straight/Create Straight Edge เลือกจุด Vertex.1 ถึง Vertex.4 แล้วเลือก Apply (ทำซ้ำอีกครั้งโดยเลือก Vertex.4 และ Vertex.1) จะได้สี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

5. สร้างปริมาตรทรงกระบอก

5.1 เลือก Geometry/Vertex/From Coordinate/Create Real Vertex กำหนดให้พิกัด (x,y,z) คือ (0,0,100) แล้วเลือก Apply

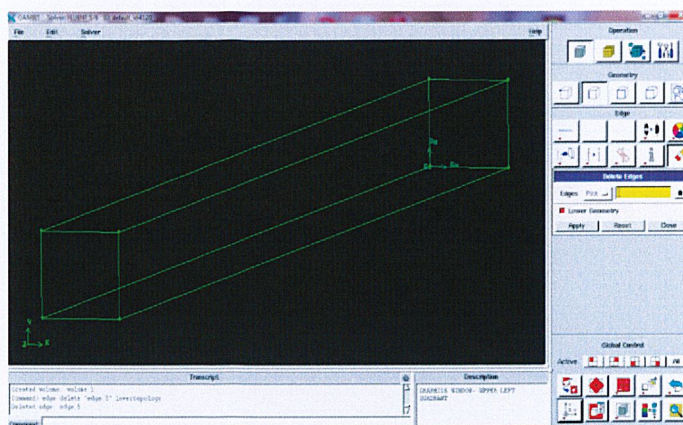
5.2 เลือก Geometry /Edge/Straight/Create Straight Edge เลือกจุด Vertex.1 และ Vertex.5 แล้วเลือก Apply จะได้เส้นตรงตามแกน z

5.3 เลือก Geometry/Face/Wireframe/Create Face from Wireframe เลือกเส้น edge.1 ถึง edge.4 แล้วเลือก Apply

5.4 เลือก Geometry/Volume/Sweep Face เลือกพื้นผิว face.1 เลือกเส้นขอบ edge.5 แล้วเลือก Apply

5.5 เลือก Geometry /Edge/Delete Edges เลือกเส้นขอบ edge.5 แล้วเลือก Apply จะได้ท่อทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงดังรูปที่ 3.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



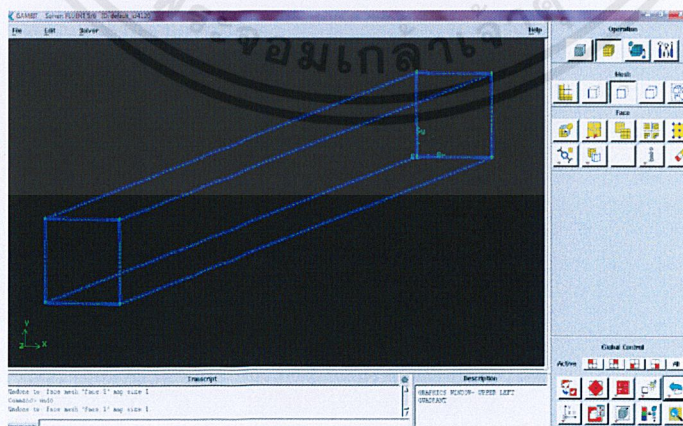
รูปที่ 3.38 ท่อทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

- ส่วนที่ 2 การสร้างกริด (Grid Generation or Mesh Generation)

1. การสร้างกริดบนเส้นขอบ

1.1 เลือก Mesh/Edge/Mesh Edge เลือกเส้นขอบ edge.1 edge.2 edge.3 edge.4 edge.10 edge.11 edge.12 และ edge.13 กำหนด Type เป็น Bi-exponent กำหนด Ratio เป็น 0.8 และกำหนด Spacing โดยเลือก Interval size เท่ากับ 0.1 แล้วเลือก Apply

1.2 เลือก Mesh/Edge/Mesh Edge เลือกเส้นขอบ edge.6 edge.7 edge.8 และ edge.9 กำหนด Type เป็น Successive Ratio กำหนด Ratio เท่ากับ 1 และกำหนด Spacing โดยเลือก Interval size เท่ากับ 1 แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.39

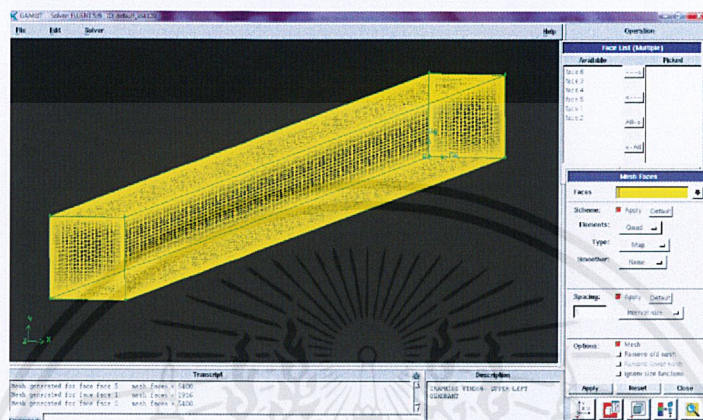


รูปที่ 3.39 แบบจำลองที่ 3 ที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสร้างกริดบนพื้นผิว

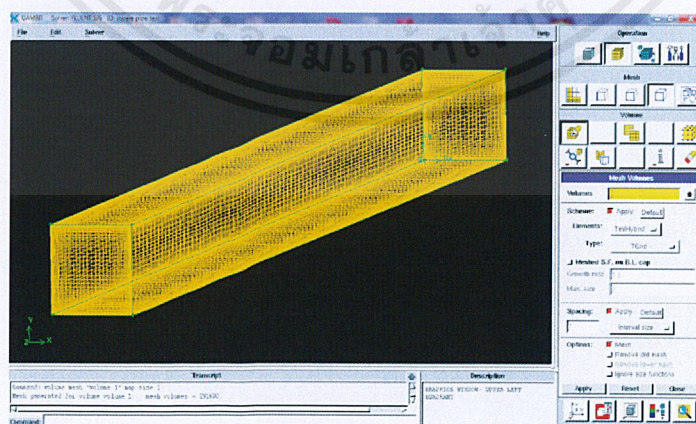
เลือก Mesh/Face/Mesh Faces เลือกพื้นผิวทุกพื้นผิว กำหนด Elements เป็น Quad และ Type เป็น Map แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการกำหนดกริดบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 แบบจำลองที่ 3 ที่มีการสร้างกริดบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์

3. การสร้างกริดในปริมาตร

เลือก Mesh/volume/Mesh volumes เลือกปริมาตรทั้งหมด กำหนด Elements เป็น Hex และ Type เป็น Map แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 แบบจำลองที่ 3 ที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การกำหนด Boundary และ Continuum

4.1 เลือก Zones/Specify Boundary Types เลือกพื้นผิว face.1 กำหนด Name เป็น Inlet พร้อมกำหนด Type เป็น VELOCITY_INLET แล้วเลือก Apply (ทำซ้ำแต่เปลี่ยนพื้นผิว เปลี่ยน Name และเปลี่ยน Type ตามตารางที่ 3.7

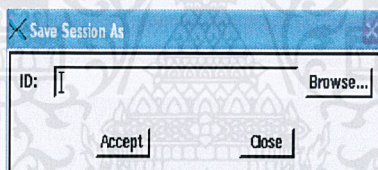
ตารางที่ 3.7 การกำหนด Boundary แต่ละพื้นผิว

พื้นผิว	Name	Type
face.6	Outlet	PRESSURE_OUTLET
face.2, face.3, face.4, face.5	Wall	WALL

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

5. การบันทึกข้อมูล

5.1 เลือก File/Save As จะเห็นหน้าต่างดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.42 หน้าต่างการบันทึกข้อมูลสำหรับแบบจำลองที่ 3

5.2 พิมพ์ ID ตามต้องการ แล้วเลือก Accept

6. การบันทึก Mesh เพื่อส่งไปคำนวณในโปรแกรม Fluent 12.0.16

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

- ส่วนที่ 3 การคำนวณโดยโปรแกรม Fluent 12.0.16

ทำการคำนวณตามขั้นตอนที่ 1 (แบบจำลองที่ 1)

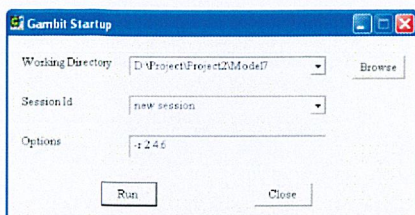
แบบจำลองที่ 4 ท่อหน้าตัดวงกลมเขี้ยวร่อง

- ส่วนที่ 1 การสร้างแบบจำลอง

1. เลือก start/All Programs/Fluent Inc Products/Gambit 2.4.6/Gambit2.4.6 จะเห็นหน้าต่างดังรูปที่

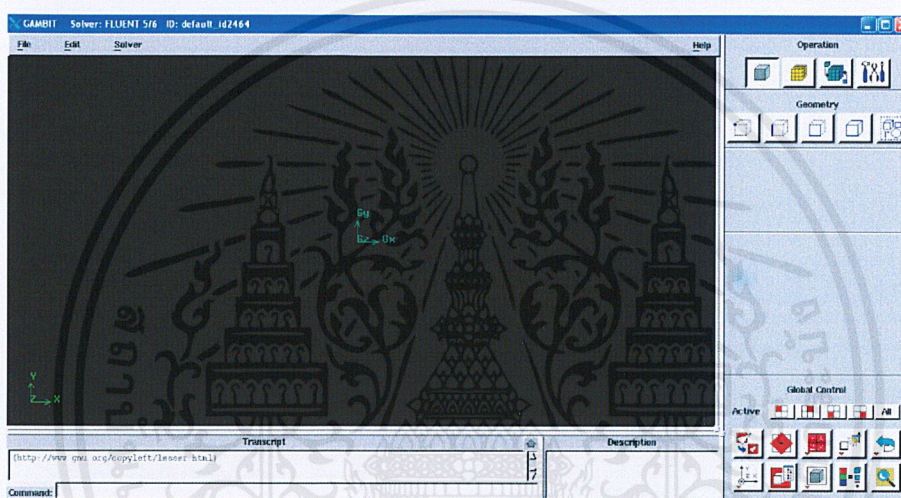
3.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.43 หน้าต่างก่อนการเข้าโปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 4

2. เลือก Working Directory และ Session Id ตามที่ต้องการแล้วเลือก Run จะเห็นหน้าต่างดังรูปที่ 3.44



รูปที่ 3.44 โปรแกรม Gambit 2.4.6 ในการสร้างแบบจำลองที่ 4

3. สร้างจุดโดยเลือก Operation/Geometry/Vertex/Create Real Vertex กำหนดพิกัดจุด Local คือ $x = 0$ $y = 0$ และ $z = 0$ แล้วเลือก Apply

สร้างเส้นโค้ง โดยเลือก Operation/Geometry/Edge/Create Circular Arc กำหนด Radius = 2.4 Start Angle = 0 End Angle = 90 และ Center = vertex.1 แล้วเลือก Apply

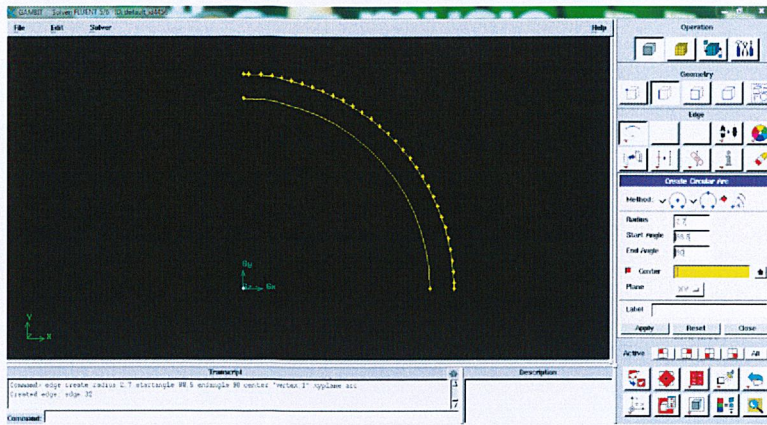
สร้างส่วนของเส้นรอบวงอื่นๆ โดยวิธีการเดียวกันนี้ โดยกำหนดค่าดังนี้

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลสำหรับสร้างส่วนของเส้นรอบวง

Radius	Start Angle	End Angle	Center
2.7	0	1.5	vertex.1
2.7	1.5	4.5	vertex.1
2.7	4.5	7.5	vertex.1
2.7	7.5	10.5	vertex.1
2.7	10.5	13.5	vertex.1
2.7	13.5	16.5	vertex.1
2.7	16.5	19.5	vertex.1
2.7	19.5	22.5	vertex.1
2.7	22.5	25.5	vertex.1
2.7	25.5	28.5	vertex.1
2.7	28.5	31.5	vertex.1
2.7	31.5	34.5	vertex.1
2.7	34.5	37.5	vertex.1
2.7	37.5	40.5	vertex.1
2.7	40.5	43.5	vertex.1
2.7	43.5	46.5	vertex.1
2.7	46.5	49.5	vertex.1
2.7	49.5	52.5	vertex.1
2.7	52.5	55.5	vertex.1
2.7	55.5	58.5	vertex.1
2.7	58.5	61.5	vertex.1
2.7	61.5	64.5	vertex.1
2.7	67.5	70.5	vertex.1
2.7	70.5	73.5	vertex.1
2.7	73.5	76.5	vertex.1
2.7	76.5	79.5	vertex.1
2.7	79.5	82.5	vertex.1
2.7	82.5	85.5	vertex.1
2.7	85.5	88.5	vertex.1
2.7	88.5	90	vertex.1

ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.45 ส่วนของเส้นรอบวงที่รัศมีเท่ากับ 2.4 และ 2.7

4. สร้างเส้นตรงจากจุดสองจุดโดยเลือก Operation/Geometry/Edge/Create Straight Edge กำหนด Vertices โดยเลือก vertex.1 และ vertex.4 แล้วเลือก Apply

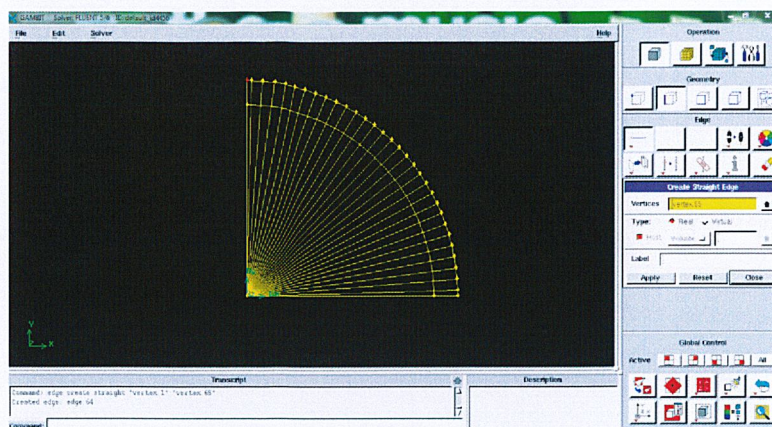
สร้างเส้นตรงอื่นๆ ด้วยวิธีเดียวกัน โดยเลือก Vertices ดังนี้

ตารางที่ 3.9 ข้อมูลสำหรับสร้างเส้นตรง

Vertices	Vertices	Vertices
vertex.1 และ vertex.4	vertex.1 และ vertex.25	vertex.1 และ vertex.47
vertex.1 และ vertex.5	vertex.1 และ vertex.27	vertex.1 และ vertex.49
vertex.1 และ vertex.7	vertex.1 และ vertex.29	vertex.1 และ vertex.51
vertex.1 และ vertex.9	vertex.1 และ vertex.31	vertex.1 และ vertex.53
vertex.1 และ vertex.11	vertex.1 และ vertex.33	vertex.1 และ vertex.55
vertex.1 และ vertex.13	vertex.1 และ vertex.35	vertex.1 และ vertex.57
vertex.1 และ vertex.15	vertex.1 และ vertex.37	vertex.1 และ vertex.59
vertex.1 และ vertex.17	vertex.1 และ vertex.39	vertex.1 และ vertex.61
vertex.1 และ vertex.19	vertex.1 และ vertex.41	vertex.1 และ vertex.63
vertex.1 และ vertex.21	vertex.1 และ vertex.43	vertex.1 และ vertex.65
vertex.1 และ vertex.23	vertex.1 และ vertex.45	

ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.46 เส้นตรงที่สร้างจากจุดต่างๆ

5. แบ่งส่วนของเส้นรอบวงที่มีรัศมี 2.4 ด้วยเส้นตรงโดยเลือก Operation/Geometry/Edge/Split Edge กำหนด Edge คือ edge.1 เลือก Split with Edge คือ edge.33 แล้วเลือก Apply

แบ่งส่วนของเส้นรอบวงออกเป็นหลายส่วนโดยเลือก Edge ดังนี้

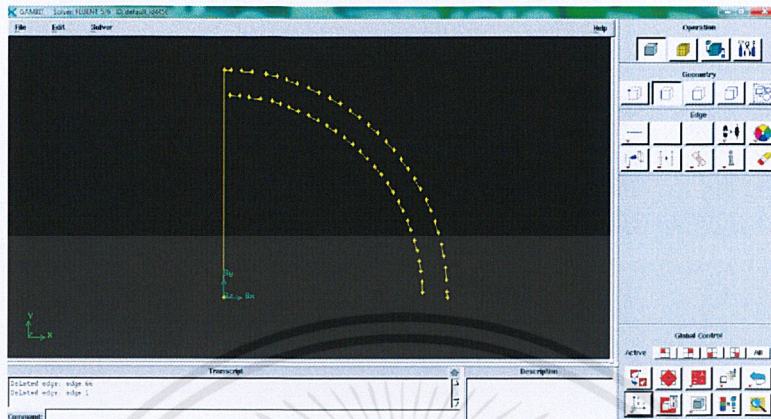
ตารางที่ 3.10 ข้อมูลสำหรับตัดแบ่งส่วนของเส้นรอบวง

Edge	Split with	Edge	Split with	Edge	Split with
edge.1	edge.33	edge.74	edge.44	edge.85	edge.55
edge.1	edge.34	edge.75	edge.45	edge.86	edge.56
edge.65	edge.35	edge.76	edge.46	edge.87	edge.57
edge.66	edge.36	edge.77	edge.47	edge.88	edge.58
edge.67	edge.37	edge.78	edge.48	edge.89	edge.59
edge.68	edge.38	edge.79	edge.49	edge.90	edge.60
edge.69	edge.39	edge.80	edge.50	edge.91	edge.61
edge.70	edge.40	edge.81	edge.51	edge.92	edge.62
edge.71	edge.41	edge.82	edge.52	edge.93	edge.63
edge.72	edge.42	edge.83	edge.53		
edge.73	edge.43	edge.84	edge.54		

ลบเส้นที่ไม่ต้องการออกโดยเลือก Operation/Geometry/Edge/Delete Edges กำหนด Edges ที่ต้องการลบคือ edge.1, edge.3, edge.5, edge.7, edge.9, edge.11, edge.13, edge.15, edge.17, edge.19, edge.21, edge.23, edge.25, edge.27, edge.29, edge.31, edge.66, edge.68,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

edge.70, edge.72, edge.74, edge.76, edge.78, edge.80, edge.82, edge.84, edge.86, edge.88, edge.90, edge.92 และ edge.94 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.47 ส่วนของเส้นรอบวงที่ลบส่วนที่ไม่ต้องการออกแล้ว

6. สร้างเส้นตรงเชื่อมจุดโดยเลือก Operation/Geometry/Edge/Create Straight Edge กำหนด Vertices โดยเลือก vertex.1 และ vertex.4 แล้วเลือก Apply

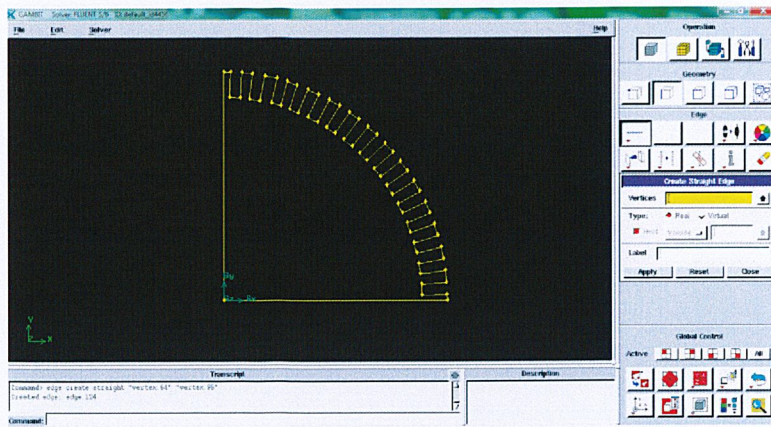
สร้างเส้นตรงอื่นๆ ด้วยวิธีเดียวกัน โดยเลือก Vertices ดังนี้

ตารางที่ 3.11 ข้อมูลสำหรับสร้างเส้นตรง

Vertices	Vertices	Vertices
vertex.1 และ vertex.4	vertex.25 และ vertex.76	vertex.48 และ vertex.87
vertex.5 และ vertex.66	vertex.28 และ vertex.77	vertex.49 และ vertex.88
vertex.8 และ vertex.67	vertex.29 และ vertex.78	vertex.52 และ vertex.89
vertex.9 และ vertex.68	vertex.32 และ vertex.79	vertex.53 และ vertex.90
vertex.12 และ vertex.69	vertex.33 และ vertex.80	vertex.56 และ vertex.91
vertex.13 และ vertex.70	vertex.36 และ vertex.81	vertex.57 และ vertex.92
vertex.16 และ vertex.71	vertex.37 และ vertex.82	vertex.60 และ vertex.93
vertex.17 และ vertex.72	vertex.40 และ vertex.83	vertex.61 และ vertex.94
vertex.20 และ vertex.73	vertex.41 และ vertex.84	vertex.64 และ vertex.95
vertex.21 และ vertex.74	vertex.44 และ vertex.85	
vertex.24 และ vertex.75	vertex.45 และ vertex.86	

ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.48 เส้นตรงที่สร้างเชื่อมจุดต่างๆ

7. สร้างพื้นผิวจากเส้น โดยเลือก Operation/Geometry/Face/Create Face From Wireframe กำหนด Edge ที่จะใช้ประกอบเป็นพื้นผิวโดยเลือกทุก Edge แล้วเลือก Apply จะได้พื้นผิวแสดงดังรูปที่ 3.49



รูปที่ 3.49 พื้นผิวที่สร้างจากเส้นที่เชื่อมต่อกัน

8. สร้างพื้นผิวรูปร่างกลมเต็ม

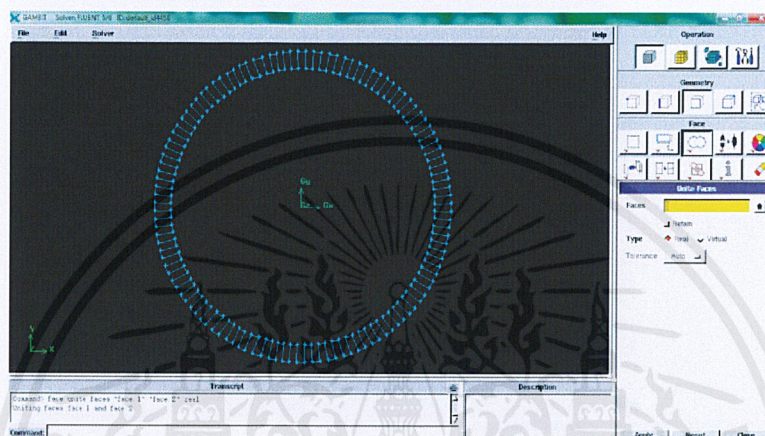
8.1 สร้างพื้นผิวรูปร่างครึ่งวงกลมโดยเลือก Operation/Geometry/Face/Move-Copy Faces กำหนด Face คือ face.1 เลือก Copy จำนวน 1 กำหนด Operation เป็น Reflect กำหนด Reflect Plane โดยเลือก Define/Direction/X-Positive แล้วเลือก Apply

8.2 รวมสองพื้นผิวให้เป็นพื้นผิวเดียวโดยเลือก Operation/Geometry/Face/Unite Faces กำหนด Face คือ face.1 และ face.2 แล้วเลือก Apply จะได้พื้นผิวรูปร่างครึ่งวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3 สร้างพื้นผิวรูปวงกลมโดยเลือก Operation/Geometry/Face/Move-Copy Faces กำหนด Face คือ face.1 เลือก Copy จำนวน 1 กำหนด Operation เป็น Reflect กำหนด Reflect Plane โดยเลือก Define/Direction/Y-Positive แล้วเลือก Apply

8.4 รวมสองพื้นผิวให้เป็นพื้นผิวเดียวโดยเลือก Operation/Geometry/Face/Unite Faces กำหนด Face คือ face.1 และ face.2 แล้วเลือก Apply จะได้พื้นผิวรูปวงกลม แสดงดังรูปที่ 3.50

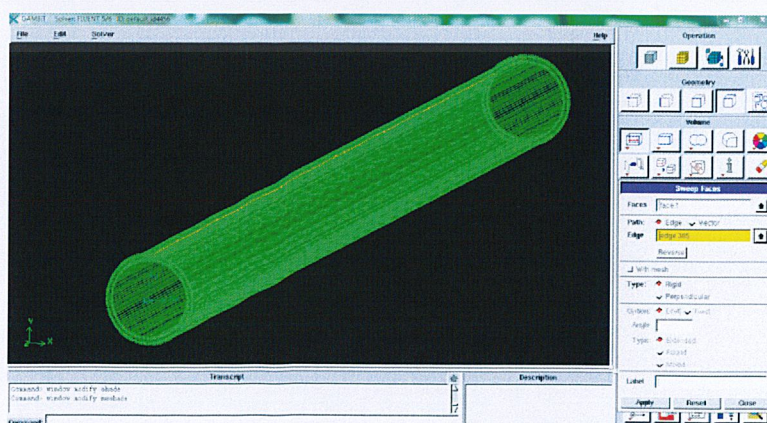


รูปที่ 3.50 แบบจำลองที่ 4 ที่มีพื้นผิวรูปวงกลมอย่างสมบูรณ์

9. สร้างปริมาตรทรงกระบอกจากพื้นผิว

9.1 สร้างเส้นตรงโดยเลือก Operation/Geometry/Edge/Sweep Vertices กำหนด Vertices คือ vertex.64 กำหนด Path โดยเลือก Vector/Define/Z-Negative/Magnitude = 100 แล้วเลือก Apply

9.2 สร้างปริมาตรทรงกระบอกโดยเลือก Operation/Geometry/Volume/Sweep Faces กำหนด Face คือ face.1 กำหนด Path คือ edge.305 แล้วเลือก Apply แสดงดังรูปที่ 3.51



รูปที่ 3.51 แบบจำลองที่ 4 ที่เป็นปริมาตรทรงกระบอกอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ส่วนที่ 2 การสร้างกริด (Grid Generation or Mesh Generation)

1. การสร้างกริดบนเส้นขอบ

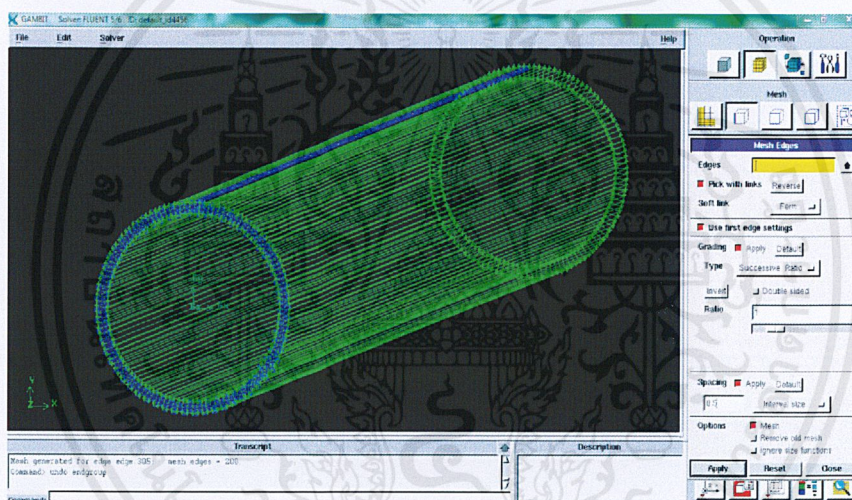
1.1 เลือก Operation/Mesh/Edge/Mesh Edge เลือกเส้นขอบ edge.109, edge.102, edge.89, edge.101, edge.94, edge.82, edge.93, edge.86, edge.70, edge.80, edge.62, edge.76, edge.72, edge.52, edge.73, edge.69, edge.48, edge.65, edge.63, edge.32, edge.57, edge.56, edge.18, edge.54, edge.43, edge.10, edge.39, edge.29, edge.7, edge.21, edge.19, edge.2, edge.20, edge.28, edge.6, edge.25, edge.22, edge.3, edge.17, edge.14, edge.1, edge.15, edge.13, edge.4, edge.23, edge.34, edge.41, edge.8, edge.49, edge.46, edge.11, edge.27, edge.5, edge.26, edge.36, edge.9, edge.42, edge.44, edge.12, edge.50, edge.58, edge.31, edge.61, edge.68, edge.51, edge.71, edge.79, edge.64, edge.81, edge.88, edge.75, edge.90, edge.96, edge.85, edge.98, edge.104, edge.92, edge.106, edge.112, edge.99, edge.114, edge.120, edge.107, edge.122, edge.128, edge.115, edge.130, edge.136, edge.123, edge.138, edge.144, edge.131, edge.145, edge.152, edge.139, edge.153, edge.159, edge.147, edge.161, edge.167, edge.155, edge.169, edge.175, edge.163, edge.177, edge.183, edge.171, edge.185, edge.191, edge.178, edge.192, edge.197, edge.186, edge.198, edge.205, edge.193, edge.206, edge.212, edge.201, edge.213, edge.220, edge.209, edge.221, edge.227, edge.217, edge.229, edge.233, edge.235, edge.225, edge.240, edge.239, edge.238, edge.234, edge.224, edge.231, edge.228, edge.216, edge.223, edge.218, edge.203, edge.215, edge.210, edge.195, edge.208, edge.202, edge.189, edge.200, edge.194, edge.181, edge.188, edge.184, edge.170, edge.180, edge.176, edge.162, edge.173, edge.168, edge.154, edge.165, edge.160, edge.146, edge.157, edge.150, edge.137, edge.149, edge.142, edge.129, edge.141, edge.134, edge.121, edge.133, edge.126, edge.113, edge.125, edge.118, edge.105, edge.117, edge.110, edge.97, edge.11, edge.144, edge.84, และ edge.80 กำหนด Spacing โดยเปลี่ยน Interval size เป็น Interval count พร้อมกำหนด Interval count เท่ากับ 8 แล้วเลือก Apply

1.2 เลือก Operation/Mesh/Edge/Mesh Edge เลือกเส้นขอบ edge.199, edge.207, edge.214, edge.222, edge.230, edge.236, edge.237, edge.232, edge.226, edge.219, edge.211, edge.204, edge.196, edge.190, edge.182, edge.174, edge.166, edge.158, edge.151, edge.143, edge.135,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

edge.127, edge.119, edge.111, edge.103, edge.95, edge.87, edge.78, edge.67, edge.59, edge.45, edge.37, edge.47, edge.53, edge.35, edge.16, edge.24, edge.33, edge.38, edge.30, edge.40, edge.55, edge.60, edge.66, edge.74, edge.77, edge.83, edge.91, edge.100, edge.108, edge.116, edge.124, edge.132, edge.140, edge.148, edge.156, edge.164, edge.172, edge.179, และ edge.187 กำหนด Spacing โดยเปลี่ยน Interval size เป็น Interval count พร้อมกำหนด Interval count เท่ากับ 2 แล้วเลือก Apply

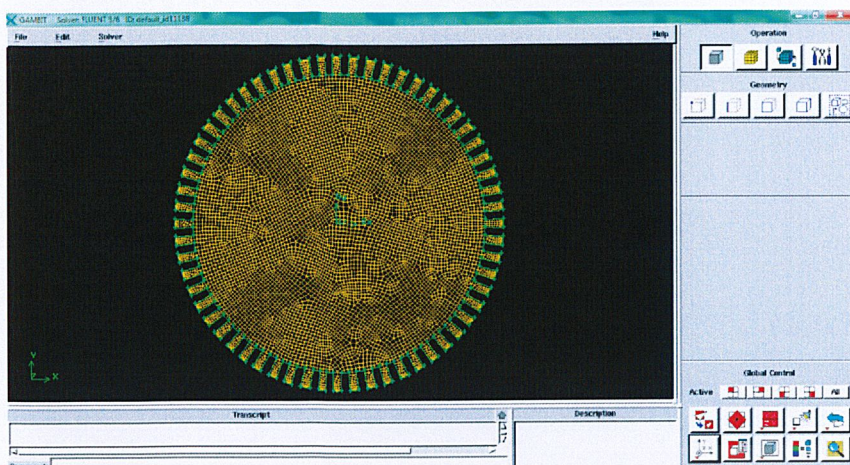
1.3 เลือก Operation/Mesh/Edge/Mesh Edge เลือกเส้นขอบ edge.305 กำหนด Spacing โดยกำหนด Interval size เท่ากับ 0.5 แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการกำหนดกริดบนเส้น ดังแสดงดังรูปที่ 3.52



รูปที่ 3.52 แบบจำลองที่ 4 ที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบ

2. การสร้างกริดบนพื้นผิว

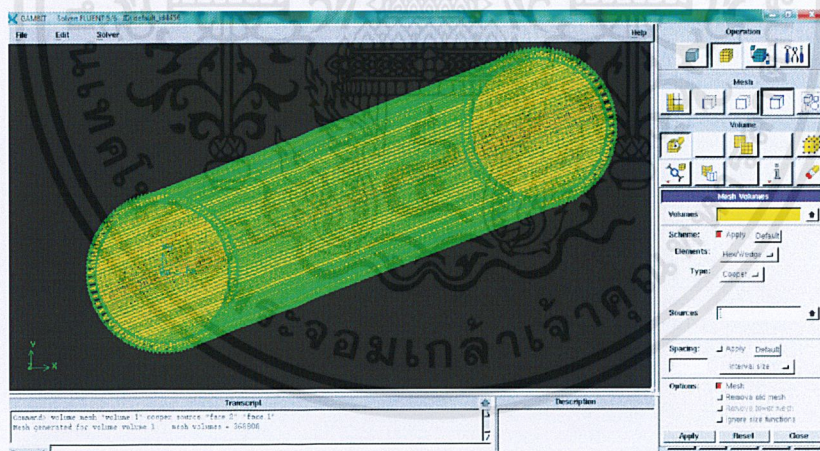
เลือก Operation/Mesh/Face/Mesh Faces เลือก Faces คือ face.1 กำหนด Elements เป็น Quad และ Type เป็น Pave แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการกำหนดกริดบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.53



รูปที่ 3.53 แบบจำลองที่ 4 ที่มีการสร้างกริดบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์

3. การสร้างกริดในปริมาตร

เลือก Operation/Mesh/Volume/Mesh Volumes เลือก Volumes คือ volume.1 กำหนด Elements เป็น Hex/Wedge และ Type เป็น Cooper แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.54



รูปที่ 3.54 แบบจำลองที่ 4 ที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์

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.2 กำหนด Name เป็น Outlet พร้อมกำหนด Type เป็น PRESSURE_OUTLET แล้วเลือก Apply

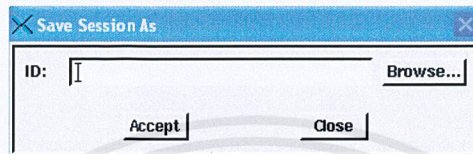
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 เลือกพื้นผิวที่เหลือทั้งหมดคลิกเว้น face.1 และ 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 3.55



รูปที่ 3.55 หน้าต่างการบันทึกข้อมูลในการสร้างแบบจำลองที่ 4

พิมพ์ ID ตามต้องการ แล้วเลือก Accept

6. การบันทึก Mesh เพื่อส่งไปคำนวณในโปรแกรม Fluent 12.0.16

เลือก File/Export/Mesh ตรวจสอบ File Name ว่าถูกต้องหรือไม่ ถ้าถูกต้องแล้วเลือก

Accept

-ส่วนที่ 3 การคำนวณโดยโปรแกรม Fluent 12.0.16

ทำการคำนวณตามตอนที่ 1 (แบบจำลองที่ 1)

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของความเป็นรูพรุนที่มีต่อความดันลด ที่เกิดในการไหล

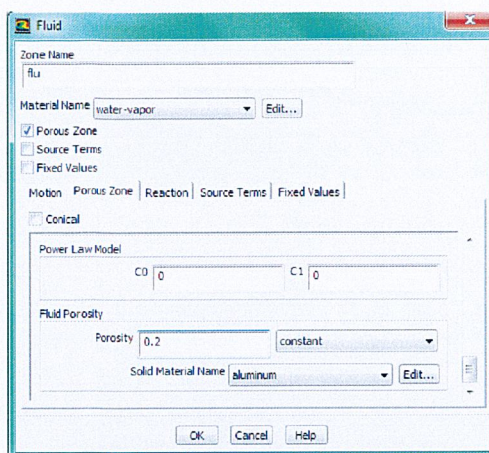
แบบจำลองที่ 1 ท่อน้ำตัดวงกลม

-ส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 2 ทำตามแบบจำลองที่สร้างในการทดลองตอนที่ 1 (แบบจำลองที่ 1)

-ส่วนที่ 3 คำนวณโดยโปรแกรม Fluent 12.0.16

1. ทำตามขั้นตอนข้อที่ 1 ถึง 9 ในการทดลองตอนที่ 1 (แบบจำลองที่ 1)

2. กำหนดชนิดของไหล เลือก Cell Zone Conditions ให้เปลี่ยน Material name เป็น water vapor แล้วเลือก Porous Zone กำหนดค่า Porosity เท่ากับ 0.2 แล้วเลือก OK กำหนด Porous Formulation เป็น Physical Velocity แสดงดังรูปที่ 3.56



รูปที่ 3.56 แสดงหน้าต่างการกำหนดชนิดของไหลสำหรับการไหลผ่านรูพรุน

3. ทำตามขั้นตอนที่ 11 ถึง 16 ในการทดลองที่ 1.1(แบบจำลองที่ 1)
4. ทำการคำนวณด้วยวิธีข้างต้น โดยเปลี่ยนค่า Fluid Porosity เป็น 0.5 และ 0.8 ตามลำดับ

แบบจำลองที่ 2 ท่อหน้าตัดรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

- ส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ใช้แบบจำลองที่สร้างในการทดลองตอนที่ 2 (แบบจำลองที่ 2)
- ส่วนที่ 3 ทำการคำนวณตามตอนที่ 3 ในส่วนที่ 3

แบบจำลองที่ 3 ท่อหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

- ส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ใช้แบบจำลองที่สร้างในการทดลองตอนที่ 2 (แบบจำลองที่ 3)
- ส่วนที่ 3 ทำการคำนวณตามตอนที่ 3 ในส่วนที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

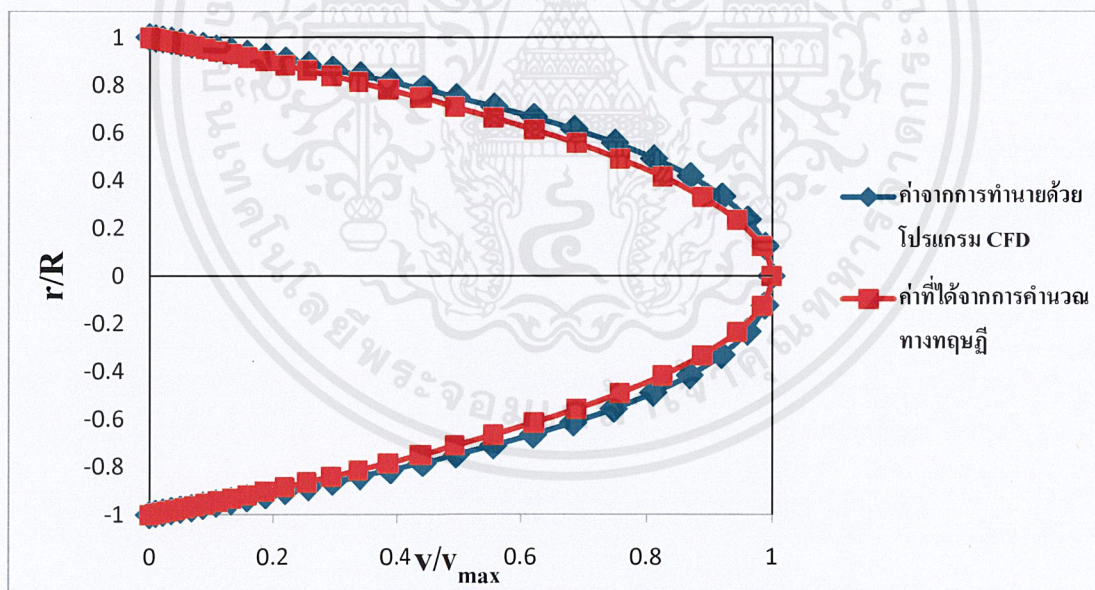
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดลอง

ตอนที่ 1

จากการศึกษารูปแบบการไหลภายในท่อที่จำลองด้วยเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลโดยเปรียบเทียบที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยใช้แบบจำลองท่อเปล่าหน้าตัดวงกลมรัศมี 0.0027 m ความยาว 0.1 m กำหนดความเร็วไอน้ำที่ทางเข้า 4.477 m/s ($Re = 1000$) เป็นการไหลแบบราบเรียบพัฒนาเต็มท่อ จากการศึกษาได้แสดงผลในรูปแบบของรูปแบบความเร็ว (Velocity profile) ของการไหลในท่อที่เส้นระนาบ $x = 0$ และ $z = 0.0995$ ผลที่แสดงเป็นค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



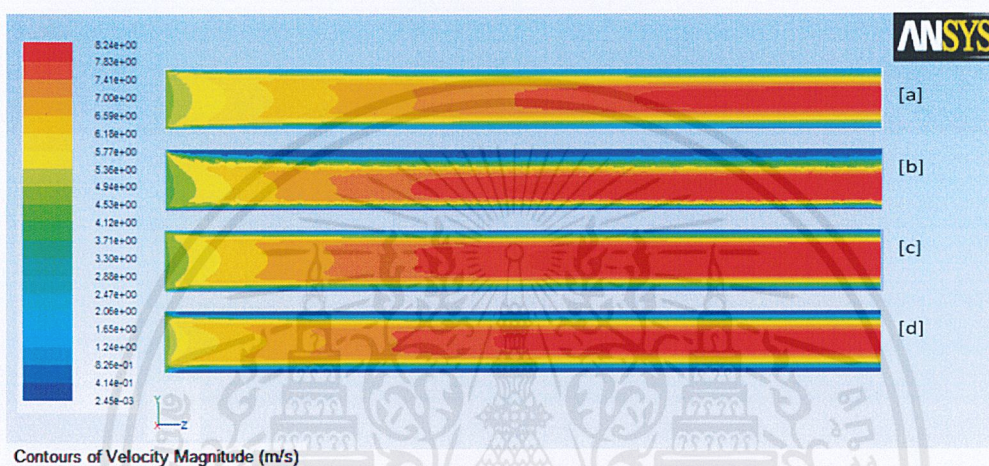
รูปที่ 4.1 โปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile) ของการไหลในแบบจำลองท่อเปล่าหน้าตัดวงกลม

ความยาว 0.1 m รัศมี 0.0027 m ตัดที่ระนาบ $x = 0$ และ $z = 0.0995$

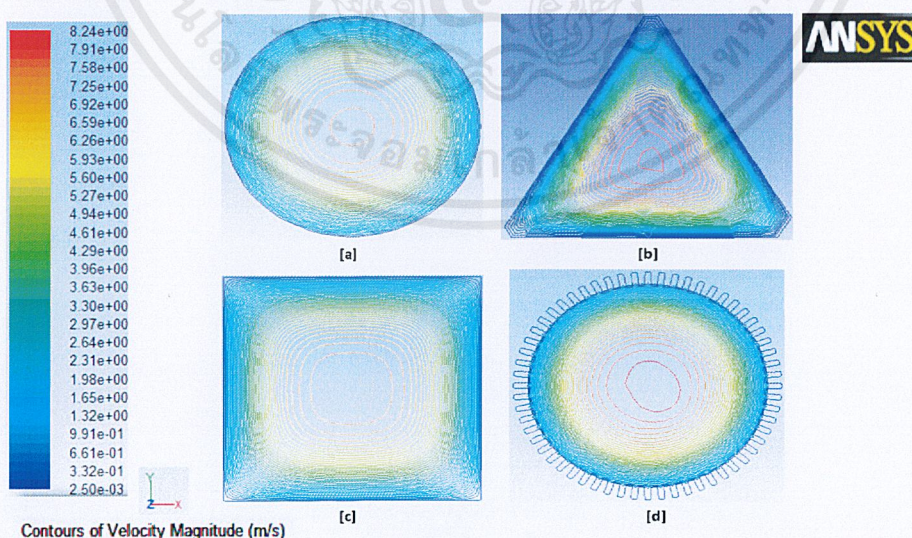
ตอนที่ 2

ผลที่ได้จากการจำลองในการทำนายพฤติกรรมของไอน้ำ ซึ่งไหลผ่านท่อที่มีหน้าตัดต่างกัน ด้วยอัตราการไหลของไอน้ำเข้าท่อเท่ากับ 4.477 เมตรต่อวินาที ($Re = 1,000$)

คอนทัวร์ของความเร็วที่ระนาบ $x = 0$ และที่ระนาบ $z = 0.075$ ของท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม และท่อหน้าตัดวงกลมแบบเจาะร่อง ตามลำดับ เมื่อทำนายโดยใช้ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1,000 แสดงดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3



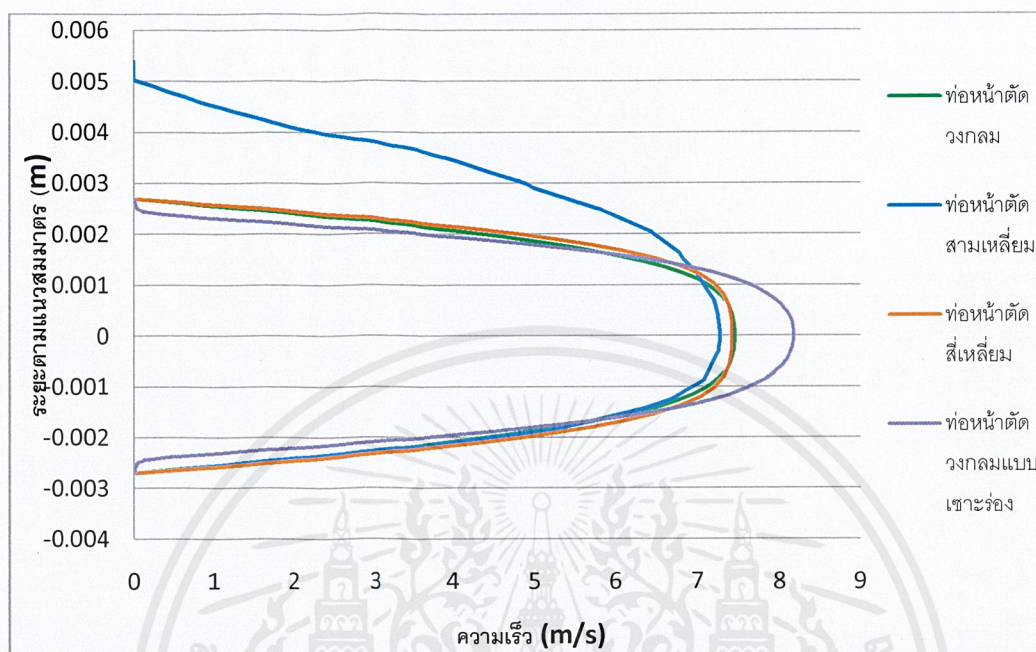
รูปที่ 4.2 คอนทัวร์ของความเร็วที่ระนาบ $x = 0$ โดยที่ [a] [b] [c] และ [d] คือ ท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม และ ท่อหน้าตัดวงกลมแบบเจาะร่อง ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 คอนทัวร์ของความเร็วที่ระนาบ $z = 0.075$ โดยที่ [a] [b] [c] และ [d] คือ ท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม และ ท่อหน้าตัดวงกลมแบบเจาะร่อง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตามแนวการไหล (velocity) กับระยะตามแนวสมมาตร ของท่อทุกแบบ บนระนาบ $z = 0.075 \text{ m}$ ได้ดังรูปที่ 4.4

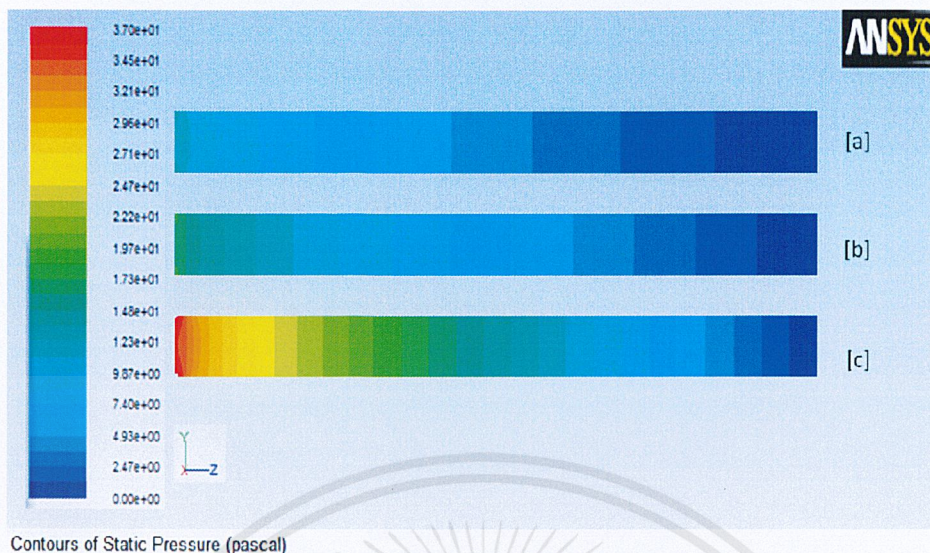


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตามแนวการไหล (velocity) กับระยะตามแนวสมมาตรของท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม และท่อหน้าตัดวงกลมแบบเซาะร่อง บนระนาบ $z = 0.075 \text{ m}$

ตอนที่ 3

การศึกษาผลของความเป็นรูพรุนที่มีต่อค่าความดันลดตามแนวการไหล ($-\Delta P/\Delta z$) ของไอน้ำที่ไหลด้วยความเร็วเท่ากับ 4.477 เมตรต่อวินาที ($Re = 1,000$) ในท่อที่มีหน้าตัดต่างกัน ค่าความเป็นรูพรุน (Porosity) ที่ใช้ศึกษาเท่ากับ 0.5 0.8 และ 1 และแบบจำลองท่อที่ใช้มีพื้นที่หน้าตัดวงกลม หน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า และหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ผลจากการศึกษาแสดงคอนทัวร์ของความดันตามแนวการไหลแสดงดังรูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7

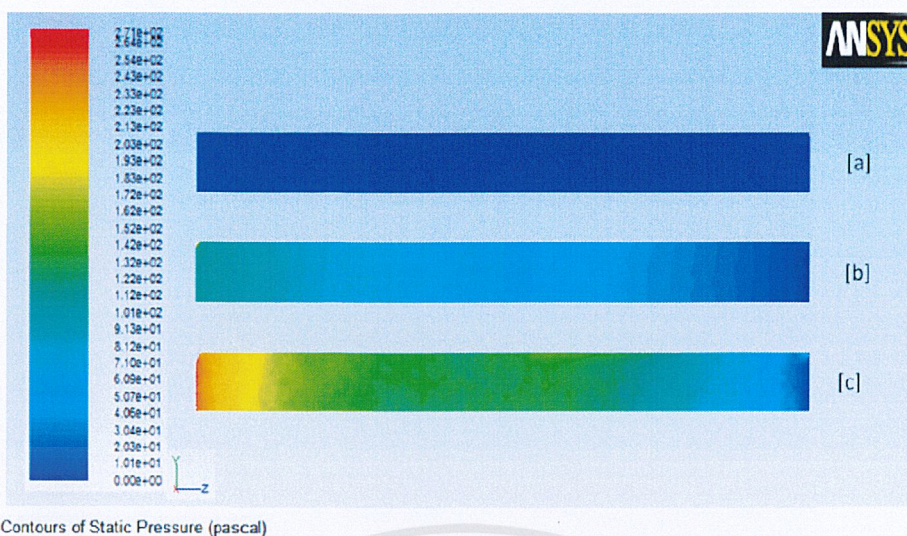


รูปที่ 4.5 คอนทัวร์ของความดันที่ระนาบ $x = 0$ ของท่อหน้าตัดวงกลมโดยที่ [a] [b] และ [c] คือ ผลการคำนวณที่ค่า Porosity เท่ากับ 1 0.8 และ 0.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 คอนทัวร์ของความดันที่ระนาบ $x = 0$ ของท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม โดยที่ [a] [b] และ [c] คือ ผลการคำนวณที่ค่า Porosity เท่ากับ 1 0.8 และ 0.5 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

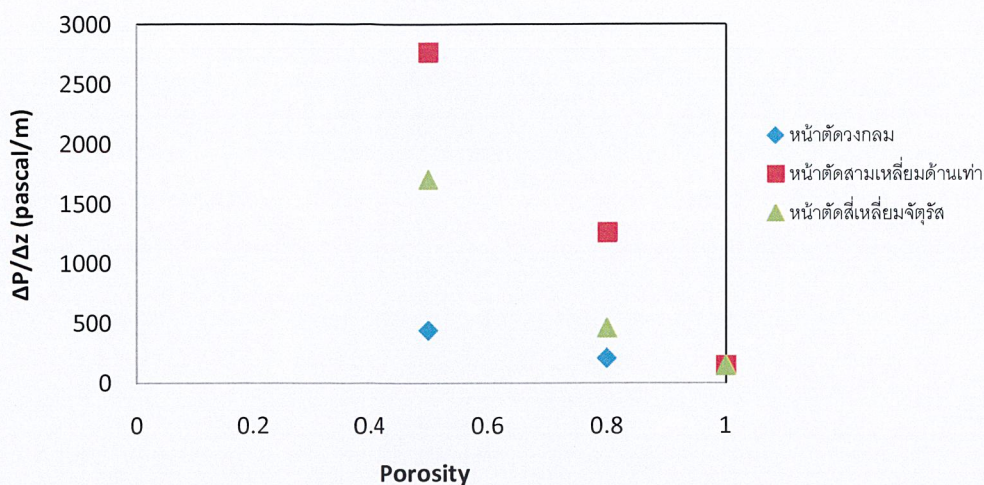


รูปที่ 4.7 คอนทัวร์ของความดันที่ระนาบ $x = 0$ ของท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม โดยที่ [a] [b] และ [c] คือ ผลการคำนวณที่ค่า Porosity เท่ากับ 1 0.8 และ 0.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความดันลดตามแนวการไหล ($-\Delta P/\Delta z$) ของท่อที่ค่าความเป็นรูพรุนต่างๆ

ค่าความเป็นรูพรุน (Porosity)	ค่าความดันลดตามแนวการไหล $-\Delta P/\Delta z$ (pascal/m)		
	ท่อหน้าตัดวงกลม	ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม	ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม
0.5	443.47	2,770.00	1,705.72
0.8	210.80	1,264.00	465.23
1	152.36	148.35	145.78

สามารถนำข้อมูลในตารางที่ 4.1 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันลดตามแนวการไหลกับค่าความเป็นรูพรุนได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันลดตามแนวการไหลกับค่าความเป็นรูพรุน

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตอนที่ 1

จากกราฟรูปที่ 4.1 จะเห็นว่ารูปแบบโปรไฟล์ความเร็วที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม CFD กับรูปแบบโปรไฟล์ความเร็วที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาที่สภาวะขอบเขต ความเร็วตรงกลางท่อ (รัศมีเท่ากับศูนย์) ค่าความเร็วจะมีค่ามากที่สุด ที่ผนังท่อ (รัศมีเท่ากับ 0.0027 m) ความเร็วจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ระยะรัศมีต่างๆ โปรไฟล์ความเร็วทั้งสองแบบให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเล็กน้อยอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ตอนที่ 2

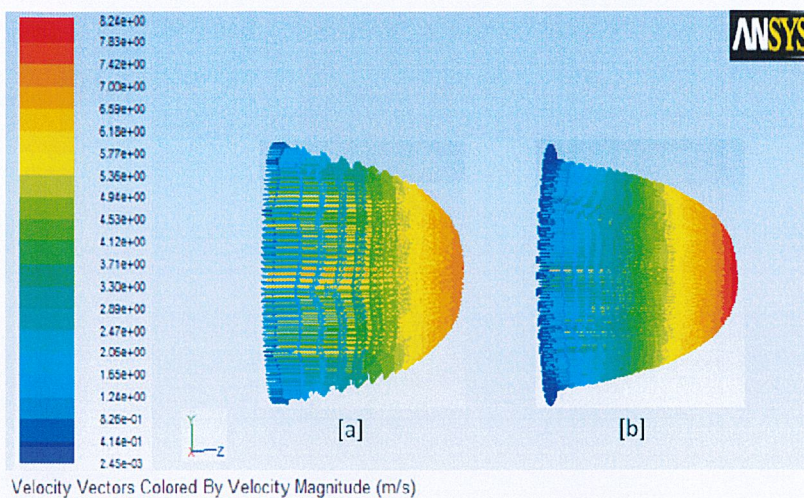
จากรูปที่ 4.2 [a] [b] และ [c] คอนทัวร์ของความเร็วตามแนวการไหลแสดงให้เห็นว่าผลการจำลองรูปแบบการไหล (Velocity profile) ในท่อแต่ละท่อ รูปแบบการไหลจะมีการพัฒนารูปแบบ (Developed) ที่ไม่เท่ากันในท่อที่มีหน้าตัดแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลบนพื้นผิวเรียบ อนุภาคของของไหลในชั้นที่สัมผัสติดกับผนังท่อ จะหยุดนิ่งหรือมีความเร็วเป็นศูนย์ ซึ่งอนุภาคของของไหลในชั้นนี้จะเป็นตัวหน่วงให้อนุภาคของของไหลในชั้นถัดไปมีความเร็วต่ำลง อันเป็นผลจากแรงเสียดทานหรือแรงเฉือนระหว่างชั้นของของไหล ในช่วงแรกของการไหลความเร็วในการไหลที่แกนกลางท่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการไหล เพื่อที่จะชดเชยความเร็วของของไหลที่ลดต่ำลงในชั้นถัดไป เพื่อที่จะรักษาอัตราการไหลของของไหลให้มีค่าคงที่ตลอดทั้งหน้าตัด จนกระทั่ง

รูปแบบของการไหลเข้าสู่ภาวะพัฒนาเต็มรูปแบบ (Fully developed) ความเร็วจึงคงที่ และอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลคือ การเกิด Secondary flow ที่บริเวณมุมของท่อ ซึ่งทำให้ความเร็วของการไหลบางส่วนในหน้าตัดหนึ่งๆของการไหลตามทิศทางการไหลหายไป แต่เพื่อต้องการให้อัตราการไหลทั้งหน้าตัดคงที่ ความเร็วของของไหลในทิศทางการไหล(บริเวณกลางท่อ) จึงมีความเร็วสูงขึ้นเพื่อชดเชยความเร็วส่วนที่หายไป

เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองของรูปแบบการไหลบนระนาบ $x = 0$ m ดังแสดงในคอนทัวร์รูปที่ 4.2 [a] [b] และ [c] ซึ่งแสดงการพัฒนาของรูปแบบการไหลในท่อแบบต่างๆพบว่า การไหลในท่อหน้าตัดวงกลมมีการพัฒนาการไหลได้เร็วที่สุด รองลงมาคือในท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า และท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองของรูปแบบการไหลบนระนาบ $z = 0.075$ m ดังแสดงในคอนทัวร์รูปที่ 4.3 [a] [b] และ [c] พิจารณาร่วมกับกราฟรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตามแนวการไหล (velocity) กับระยะตามแนวสมมาตรของท่อ พบว่าการไหลในท่อหน้าตัดวงกลมมีขนาดของความเร็วตรงแกนกลางท่อมักกว่าและการพัฒนาของรูปแบบการไหลพัฒนาได้เร็วกว่าในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยจะเห็นว่าเส้นกราฟของท่อหน้าตัดวงกลมมีลักษณะเป็นพาราโบลามากที่สุด รองลงมาคือ ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าตามลำดับ ซึ่งแม้ว่าท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าจะมีความเร็วในแกนกลางมากกว่าท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า แต่มีการพัฒนารูปแบบความเร็วได้ช้ากว่าเนื่องจากการพัฒนารูปแบบการไหลถูกรบกวนโดย Secondary flow ที่มากกว่า สังเกตคอนทัวร์ในรูปที่ 4.3 จะเห็นผลการรบกวนของ Secondary flow ที่บริเวณมุมของท่อ

ผลของการจำลองการไหลในท่อหน้าตัดวงกลมแบบเซาะร่องซึ่งเป็นการเพิ่มส่วนที่ทำให้เกิด Secondary flow ให้กับการไหลผ่านท่อหน้าตัดวงกลม พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวการไหลที่แกนกลางท่อมักเพิ่มขึ้นเร็วกว่าในท่อหน้าตัดวงกลมธรรมดาและท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสธรรมดา ดังคอนทัวร์ที่แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด Secondary flow ในบริเวณที่เป็นร่องจำนวนมากทำให้ความเร็วในแนวการไหลเพิ่มขึ้นมากเพื่อคงให้อัตราการไหลคงที่ และผลจำลองการพัฒนาของรูปแบบการไหลบนระนาบ $z = 0.075$ m ดังแสดงในรูปที่ 4.3 [d] จะเห็นว่าพัฒนาการของรูปแบบการไหลใกล้เคียงกับการไหลในท่อหน้าตัดวงกลมแต่มีขนาดของความเร็วมากกว่า ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อแสดงผลในรูปของเวกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบ $z = 0.075$ m ในท่อหน้าตัดวงกลม[a] และในท่อหน้าตัดวงกลมแบบเซาะร่อง [b]

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองบนระนาบ $z = 0.075$ m แสดงดังกราฟรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในแนวการไหลกับระยะตามแนวสมมาตรของท่อ จะเห็นถึงความแตกต่างในการพัฒนาของรูปแบบการไหลในท่อแต่ละแบบ

ตอนที่ 3

จากรูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 แสดงคอนทัวร์ของความดันลดตามแนวการไหลของท่อหน้าตัดต่างๆ จะเห็นว่าความดันจากขาเข้าจะต่ำและลดลงเรื่อยๆตามระยะแนวการเคลื่อนที่ แล้วความดันจะต่ำสุดตรงทางออก และจากผลการคำนวณค่า $\Delta P/\Delta z$ ในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าที่ท่อชนิดเดียวกัน ความดันลดตามแนวการเคลื่อนที่มีค่าลดลงเมื่อค่าความเป็นรูพรุนมากขึ้น

จากการนำค่าในตารางที่ 4.1 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันลดตามแนวการไหลกับค่าความเป็นรูพรุนดังกราฟรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าที่ค่าความเป็นรูพรุนเท่ากับ 1 ความดันลดตามแนวการไหลของท่อหน้าตัดทั้งสามจะใกล้เคียงกัน ถ้าค่าความเป็นรูพรุนต่ำลง ค่าความดันลดตามแนวการไหลจะสูงขึ้นเรื่อยๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษารูปแบบความเร็วของการไหลภายในของท่อโดยการสร้างแบบจำลองและคำนวณด้วยเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าทางทฤษฎีนั้นมีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล สามารถทำนายรูปแบบความเร็วของการไหลของของไหลภายในท่อได้

จากการจำลองเพื่อทำนายอิทธิพลของรูปทรงของท่อที่มีผลต่อการไหลของไอน้ำในท่อความร้อนบริเวณที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยรูปทรงที่จำลองได้แก่ ท่อหน้าตัดวงกลมแบบเซาะร่อง ท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า และท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากันทุกท่อ ผลการทำนายพบว่า รูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดวงกลมแบบเซาะร่องมีการพัฒนา(Developed) รูปแบบได้เร็วที่สุด รองลงมาคือ ท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า และท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด Secondary flow บริเวณมุมของท่อไปรบกวนการพัฒนาของรูปแบบความเร็ว เมื่อรูปแบบการไหลมีการพัฒนาแล้ว พบว่าความเร็วในแนวแกนกลางของท่อหน้าตัดวงกลมแบบเซาะร่องมีขนาดมากที่สุด รองลงมาคือ ท่อหน้าตัดวงกลม ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าตามลำดับ

จากการศึกษาผลของค่าความเป็นรูพรุนภายในท่อที่มีต่อค่าความดันลดตามแนวการไหลจะเห็นว่าที่ท่อหน้าตัดเดียวกัน เมื่อมีค่าความเป็นรูพรุนมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความดันลดตามแนวการไหลลดลง เป็นเพราะที่ค่าความเป็นรูพรุนมาก ปริมาตรของรูพรุนต่อปริมาตรทั้งหมดของท่อมีค่ามาก ของไหลจะมีพื้นที่ช่องว่างในการไหลผ่านมาก การสัมผัสกันของอนุภาคของไหลกับผิวรูพรุนก็จะเกิดน้อยลง การเกิดแรงเสียดทานบริเวณพื้นผิวรูพรุนจึงมีน้อย ทำให้ค่าความดันลดตามแนวการไหลมีค่าน้อย ในขณะที่ถ้าค่าความเป็นรูพรุนน้อย ปริมาตรของรูพรุนต่อปริมาตรทั้งหมดของท่อมีค่าน้อย ของไหลจะมีพื้นที่ในการไหลผ่านน้อยลง การสัมผัสกันของอนุภาคของไหลกับผิวรูพรุนก็จะเกิดขึ้นบ่อย การเกิดแรงเสียดทานบริเวณพื้นผิวรูพรุนจึงมีมาก ทำให้ค่าความดันลดตามแนวการไหลมีค่ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

5.2.1 เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของเครื่องคอมพิวเตอร์จึงทำให้ไม่สามารถสร้างขนาดของกริดให้มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะใช้ในการคำนวณในบริเวณที่อยู่ภายในรูปวงรี จึงทำให้ไม่สามารถแสดงผลของเวกเตอร์ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการไหลผ่านบริเวณที่มีรูปวงรี

5.2.2 เนื่องจากในการทำนายผล ได้ให้คุณสมบัติต่างๆของสารมีค่าคงที่ ทำให้ค่าที่ได้จากการทำนายอาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงได้

5.2.3 เนื่องจากต้องการสร้างแบบจำลองโดยอ้างอิงจากขนาดของฮีทไปป์ที่มีชื่ออยู่ในปัจจุบัน ความยาวของท่อที่ใช้จึงถูกจำกัด ทำให้เห็นช่วงที่ความเร็วมีการพัฒนาเต็มรูปแบบเพียงเล็กน้อย

5.2.4 เนื่องจากการสร้างกริดที่ไม่สมมาตร อาจทำให้ผลการจำลองที่ได้ไม่มีความสมมาตรกัน ซึ่งทำให้สรุปได้ยากกว่าเป็นผลของปรากฏการณ์ หรือผลของกริดที่ไม่สมมาตรกัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ต้องสร้างความสัมพันธ์ของคุณสมบัติต่างๆ ของสารในรูปของฟังก์ชันของตัวแปรต่างๆ เนื่องจากคุณสมบัติของสารต่างๆมีค่าไม่คงที่ขึ้นกับสถานะต่างๆที่ทำการศึกษา เช่น ความหนาแน่นเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน

5.3.2 ควรสร้างแบบจำลองให้มีความยาวมากเพียงพอที่จะให้เห็นช่วงที่ความเร็วอยู่ในภาวะพัฒนาเต็มรูปแบบอย่างชัดเจน เพื่อความแม่นยำในการนำผลของการทำนายมาวิเคราะห์

5.3.3 ควรมีการศึกษาเพิ่มสำหรับของไหลชนิดอื่นๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเลือกของไหลทำงานในท่อความร้อน

5.3.4 ควรสร้างกริดที่มีความสมมาตรกัน เพื่อจะได้วิเคราะห์ผลของการจำลองได้แม่นยำยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (1995). An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Pearson, England.
- [2] James R.Welty, Charles E.Wicks and Robert E.Wilson, Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer, Third edition, 1983
- [3] ANSYS, Inc. 2009. **ANSYS FLUENT 12.0 : Theory Guide**. United States
- [4] จารุวัตร เจริญสุข. 2552. เอกสารประกอบการสอนรายวิชา **Computational Fluid Dynamics**. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] Suhas, V. Patankar. 1980. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. United stated of America : McGraw-Hill.
- [6] David Reay and Peter Kew, Heat pipes Theory ,Design and Applications , Fifth edition ,2006
- [7] Heat pipe Laboratory. (10 sep 2010). Available from : URL.
<http://www.eme-rmuti.com/heatpipe1.htm>
- [8] Heat Pipes Explained.(10 sep 2010).Available from : URL.
<http://www.ocmodshop.com/ocmodshop.aspx?a=920>
- [9] Heat pipe Wick Structures Exposed: Sintered, Groove and Mesh. (10 sep 2010). Available from : URL. <http://www.frostytech.com/articleview.cfm?articleID=2466>
- [10] Chanatip C., Chinaruk T.,and Pongjet P. 2550. Laminar flow heat transfer in grooved channel. Kmitl , Thailand.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 ความดันภายในท่อหน้าตัดวงกลมที่ค่าความพรุนต่างๆ

ความยาว (m)	ค่าความเป็นรูพรุน			ความยาว (m)	ค่าความเป็นรูพรุน		
	1	0.8	0.5		1	0.8	0.5
0	11.8922	17.8080	36.5360	0.063	3.0552	4.8390	10.6271
0.002	11.2246	15.7262	33.0401	0.064	2.9648	4.7082	10.3398
0.004	10.5005	14.7069	30.3918	0.065	2.8749	4.5774	10.0525
0.006	9.9809	14.0539	29.1612	0.066	2.7855	4.4466	9.7653
0.008	9.5514	13.4727	28.0228	0.067	2.6965	4.3159	9.4781
0.01	9.1710	12.9531	27.0028	0.068	2.6081	4.1851	9.1909
0.012	8.8233	12.4773	26.0878	0.069	2.5201	4.0543	8.9037
0.014	8.4999	12.0346	25.2612	0.070	2.4326	3.9235	8.6165
0.016	8.1954	11.6186	24.5089	0.071	2.3456	3.7927	8.3293
0.017	8.0490	11.4193	24.1553	0.072	2.2592	3.6619	8.0422
0.018	7.9062	11.2255	23.8137	0.073	2.1732	3.5311	7.7550
0.02	7.6297	10.8536	23.1586	0.074	2.0877	3.4003	7.4678
0.022	7.3638	10.5019	22.5297	0.075	2.0027	3.2696	7.1806
0.024	7.1073	10.1687	21.9170	0.076	1.9182	3.1388	6.8935
0.026	6.8588	9.8512	21.3148	0.077	1.8341	3.0080	6.6063
0.028	6.6174	9.5463	20.7202	0.078	1.7504	2.8772	6.3191
0.03	6.3823	9.2511	20.1315	0.079	1.6672	2.7464	6.0319
0.032	6.1529	8.9632	19.5474	0.080	1.5845	2.6156	5.7447
0.036	5.7090	8.4042	18.3884	0.081	1.5021	2.4849	5.4575
0.038	5.4937	8.1312	17.8117	0.082	1.4201	2.3541	5.1703
0.04	5.2822	7.8616	17.2359	0.083	1.3385	2.2233	4.8831
0.042	5.0743	7.5945	16.6608	0.084	1.2573	2.0925	4.5959
0.044	4.8698	7.3294	16.0861	0.085	1.1764	1.9617	4.3087
0.046	4.6684	7.0656	15.5116	0.086	1.0959	1.8309	4.0214
0.048	4.4698	6.8026	14.9371	0.087	1.0157	1.7002	3.7342
0.05	4.2739	6.5403	14.3627	0.088	0.9359	1.5694	3.4470
0.051	4.1769	6.4092	14.0754	0.089	0.8564	1.4386	3.1597
0.052	4.0805	6.2782	13.7881	0.090	0.7772	1.3078	2.8725
0.053	3.9847	6.1473	13.5008	0.091	0.6984	1.1770	2.5852
0.054	3.8895	6.0164	13.2134	0.092	0.6198	1.0463	2.2980
0.055	3.7948	5.8855	12.9260	0.093	0.5415	0.9155	2.0107
0.056	3.7007	5.7547	12.6386	0.094	0.4635	0.7847	1.7235
0.057	3.6070	5.6239	12.3512	0.095	0.3857	0.6539	1.4363
0.058	3.5139	5.4930	12.0638	0.096	0.3082	0.5231	1.1491
0.059	3.4212	5.3622	11.7764	0.097	0.2308	0.3924	0.8619
0.06	3.3290	5.2314	11.4890	0.098	0.1537	0.2616	0.5747
0.061	3.2373	5.1006	11.2017	0.099	0.0765	0.1309	0.2875
0.062	3.1460	4.9698	10.9144	0.100	0.0000	0.0000	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2 ความดันภายในท่อหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ค่าความพรุนต่างๆ

ความยาว (m)	ความดัน(pascal)			ความยาว (m)	ความดัน(pascal)		
	1	0.8	0.5		1	0.8	0.5
0.000	11.7851	117.7800	270.5510	0.061	3.3560	46.1587	135.9350
0.001	11.7640	112.4000	239.6030	0.063	3.2413	44.4489	129.3040
0.002	11.5295	109.3180	225.5730	0.064	3.0978	42.6557	124.2210
0.004	10.6075	104.4150	212.3780	0.065	3.0854	42.4140	123.0830
0.006	10.3336	102.1470	205.4590	0.066	2.9257	41.5131	127.7790
0.008	9.8981	99.2139	198.2010	0.067	2.8785	40.9841	128.0650
0.010	9.5203	95.8692	187.6250	0.068	2.7696	39.7422	122.2230
0.012	9.0295	92.0992	177.6880	0.069	2.7426	39.4007	120.8130
0.014	8.6874	88.7453	167.8560	0.070	2.6099	36.6443	109.8210
0.016	8.3546	86.1408	160.4280	0.071	2.5261	36.8650	116.0110
0.018	8.0759	84.1878	156.8560	0.072	2.4383	35.6662	113.2970
0.020	7.7691	81.6872	151.8920	0.073	2.3704	34.3334	108.9050
0.022	7.5055	79.7486	148.7450	0.074	2.2917	32.9850	103.3330
0.024	7.3374	77.6926	142.8030	0.076	2.1233	31.5288	100.5950
0.026	6.9804	74.6812	139.6370	0.077	2.1139	31.4739	100.6350
0.028	6.7311	72.7875	137.9060	0.078	1.9857	30.0230	96.1057
0.030	6.4937	70.6889	132.7070	0.079	1.8769	28.8371	94.4968
0.032	6.2480	68.7191	131.0240	0.081	1.7371	27.3001	90.7699
0.034	6.0289	67.1034	131.6300	0.082	1.6267	25.8869	86.4554
0.036	5.7854	65.8359	135.0770	0.083	1.5320	24.8427	82.5174
0.038	5.5740	64.1966	135.0780	0.084	1.5210	24.6484	81.8952
0.040	5.3189	62.2449	133.2670	0.085	1.3484	22.6790	75.0602
0.042	5.1622	61.1730	134.2860	0.086	1.2436	21.8699	73.9442
0.044	4.9506	59.0976	129.7690	0.087	1.2196	21.7229	74.3031
0.046	4.7282	57.1605	129.8340	0.088	1.0582	19.8384	69.8022
0.048	4.5488	56.1056	133.8560	0.089	0.9796	18.3197	62.1747
0.050	4.3675	54.5863	131.4760	0.090	0.9592	18.1360	61.5990
0.051	4.2124	53.6419	134.2740	0.091	0.8229	16.7185	57.8230
0.052	4.1160	52.6425	132.1440	0.092	0.7668	16.3337	58.5758
0.053	4.0228	52.1087	135.1410	0.093	0.5789	13.4202	48.8945
0.054	4.0072	51.9578	134.9700	0.094	0.5749	13.2938	48.1165
0.055	3.8388	49.8428	130.5350	0.095	0.4098	10.6702	38.8702
0.056	3.8364	49.8087	130.4430	0.096	0.3989	10.4330	38.0717
0.057	3.6583	48.9617	135.8120	0.097	0.2507	7.6791	27.0669
0.058	3.5711	47.9403	133.2340	0.098	0.2335	7.2757	24.8581
0.059	3.5477	47.7599	133.7820	0.099	0.0994	1.5726	4.8552
0.060	3.4049	46.4311	134.4220	0.100	0.0000	0.0000	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3 ความดันภายในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความพรุนต่างๆ

ความยาว (m)	ความดัน(pascal)			ความยาว (m)	ความดัน(pascal)		
	1	0.8	0.5		1	0.8	0.5
0.100	0.0000	0.0000	0.0000	0.068	2.3838	12.4757	37.4658
0.099	0.0593	0.3116	0.9430	0.067	2.4475	12.7879	38.4071
0.098	0.1140	0.6229	1.8819	0.066	2.5115	13.0999	39.3458
0.098	0.1702	0.9346	2.8199	0.066	2.5757	13.4120	40.2823
0.097	0.2270	1.2462	3.7546	0.065	2.6401	13.7243	41.2173
0.096	0.2840	1.5577	4.6867	0.064	2.7049	14.0367	42.1511
0.095	0.3411	1.8691	5.6170	0.063	2.7699	14.3492	43.0843
0.094	0.3985	2.1805	6.5469	0.062	2.9009	14.9747	44.9527
0.094	0.4559	2.4918	7.4776	0.060	3.0330	15.6005	46.8277
0.093	0.5135	2.8031	8.4092	0.058	3.1664	16.2260	48.7123
0.092	0.5713	3.1145	9.3412	0.056	3.3689	17.1636	51.5468
0.091	0.6292	3.4261	10.2738	0.050	3.8545	19.3524	58.0941
0.090	0.6872	3.7378	11.2082	0.048	4.0687	20.2926	60.9217
0.090	0.7454	4.0497	12.1459	0.046	4.2870	21.2313	63.7600
0.089	0.8037	4.3619	13.0876	0.044	4.4350	21.8560	65.6425
0.088	0.8622	4.6741	14.0319	0.042	4.6611	22.7958	68.4632
0.087	0.9209	4.9863	14.9776	0.040	4.8147	23.4265	70.3419
0.086	0.9797	5.2983	15.9240	0.038	4.9707	24.0573	72.2176
0.086	1.0387	5.6103	16.8695	0.034	5.4555	25.9479	77.8574
0.085	1.0978	5.9222	17.8122	0.032	5.6233	26.5788	79.7415
0.084	1.1571	6.2341	18.7506	0.030	5.8817	27.5222	82.5652
0.083	1.2166	6.5460	19.6852	0.028	6.0590	28.1534	84.4469
0.082	1.2762	6.8579	20.6169	0.026	6.3332	29.1084	87.2618
0.082	1.3360	7.1697	21.5472	0.024	6.5221	29.7425	89.1350
0.081	1.3960	7.4815	22.4772	0.023	6.6187	30.0582	90.0729
0.080	1.4562	7.7934	23.4083	0.022	6.7167	30.3736	91.0124
0.079	1.5166	8.1053	24.3418	0.020	7.0203	31.3211	93.8359
0.078	1.5772	8.4172	25.2785	0.018	7.3407	32.2696	96.6463
0.078	1.6380	8.7292	26.2184	0.016	7.5653	32.9013	98.5155
0.077	1.6989	9.0413	27.1605	0.014	7.8005	33.5330	100.3890
0.076	1.7601	9.3535	28.1027	0.012	8.1774	34.4816	103.2070
0.075	1.8215	9.6658	29.0429	0.010	8.4491	35.1152	105.0860
0.074	1.8830	9.9781	29.9797	0.008	8.8995	36.0657	107.9020
0.074	1.9448	10.2903	30.9131	0.006	9.4319	37.0149	110.7410
0.073	2.0069	10.6024	31.8439	0.004	9.8659	37.6758	112.9530
0.072	2.0691	10.9146	32.7740	0.002	10.7794	39.7250	124.6900
0.070	2.1943	11.5390	34.6411	0.000	11.1833	42.6143	143.3820

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-4 ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลภายในแบบจำลองท่อเปล่าหน้าตัดวงกลม ที่ระนาบ

$$x = 0 \text{ และ } z = 0.075$$

รัศมี (ระยะแกน y)	ความเร็ว (m/s)	y(m)	ความเร็ว (m/s)
0.0027	0.0000	0.0000	7.4573
0.0026	0.8743	-0.0001	7.4543
0.0025	1.7634	-0.0003	7.4447
0.0023	2.6172	-0.0003	7.4429
0.0022	3.3670	-0.0004	7.4239
0.0021	4.0298	-0.0005	7.3996
0.0020	4.6095	-0.0005	7.3972
0.0018	5.1119	-0.0007	7.3595
0.0017	5.5506	-0.0008	7.2813
0.0016	5.9641	-0.0009	7.2147
0.0015	6.3231	-0.0009	7.1912
0.0013	6.6051	-0.0010	7.0876
0.0012	6.8278	-0.0012	6.9423
0.0011	7.0008	-0.0013	6.7525
0.0010	7.1305	-0.0014	6.5339
0.0009	7.2194	-0.0015	6.2720
0.0008	7.3059	-0.0016	5.9615
0.0006	7.3669	-0.0017	5.5909
0.0006	7.3923	-0.0018	5.1519
0.0005	7.3998	-0.0020	4.6398
0.0004	7.4212	-0.0021	4.0507
0.0004	7.4302	-0.0022	3.3811
0.0003	7.4465	-0.0023	2.6262
0.0002	7.4491	-0.0025	1.7685
0.0001	7.4567	-0.0026	0.8767
0.0000	7.4573	-0.0027	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.-5 ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลภายในแบบจำลองท่อเปล่าหน้าตัดวงกลม ที่ระนาบ

$$x = 0 \text{ และ } z = 0.0995$$

y(m)	ความเร็ว (m/s)	y(m)	ความเร็ว (m/s)
0.0027	0.0000	0.0000	7.6689
0.0026	0.8525	-0.0001	7.6647
0.0025	1.7246	-0.0003	7.6504
0.0023	2.5678	-0.0003	7.6474
0.0022	3.3136	-0.0004	7.6162
0.0021	3.9774	-0.0005	7.5778
0.0020	4.5620	-0.0005	7.5741
0.0018	5.0721	-0.0007	7.5194
0.0017	5.5211	-0.0008	7.4110
0.0016	5.9487	-0.0009	7.3234
0.0015	6.3259	-0.0009	7.2929
0.0013	6.6285	-0.0010	7.1651
0.0012	6.8734	-0.0012	6.9943
0.0011	7.0696	-0.0013	6.7798
0.0010	7.2221	-0.0014	6.5401
0.0009	7.3312	-0.0015	6.2597
0.0008	7.4423	-0.0016	5.9335
0.0006	7.5238	-0.0017	5.5496
0.0006	7.5597	-0.0018	5.1002
0.0005	7.5713	-0.0020	4.5806
0.0004	7.6059	-0.0021	3.9879
0.0004	7.6211	-0.0022	3.3191
0.0003	7.6500	-0.0023	2.5703
0.0002	7.6546	-0.0025	1.7254
0.0001	7.6678	-0.0026	0.8528
0.0000	7.6690	-0.0027	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-6 ความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลภายในแบบจำลองท่อเปล่าหน้าตัดวงกลมเซาะร่อง

ที่

ระนาบ $x = 0$ และ $z = 0.075$

ระยะแกน y	ความเร็ว (m/s)	y(m)	ความเร็ว (m/s)	y(m)	ความเร็ว (m/s)
-0.00270	0.00000	-0.00074	7.92376	0.00119	7.31237
-0.00269	0.00579	-0.00070	7.94648	0.00120	7.29375
-0.00267	0.00886	-0.00067	7.97137	0.00125	7.19149
-0.00266	0.01160	-0.00065	7.98395	0.00130	7.05232
-0.00263	0.01611	-0.00057	8.03802	0.00136	6.89071
-0.00254	0.03013	-0.00053	8.05944	0.00142	6.71779
-0.00246	0.10813	-0.00049	8.07740	0.00142	6.70665
-0.00237	0.54328	-0.00042	8.10277	0.00148	6.50191
-0.00228	1.25807	-0.00036	8.12201	0.00153	6.28206
-0.00211	2.79870	-0.00029	8.13745	0.00158	6.09657
-0.00204	3.31095	-0.00023	8.15028	0.00159	6.03962
-0.00192	4.20573	-0.00017	8.16079	0.00165	5.75874
-0.00185	4.67276	-0.00010	8.16818	0.00171	5.44128
-0.00178	5.12907	-0.00004	8.17160	0.00172	5.41892
-0.00168	5.62735	0.00001	8.17094	0.00177	5.13449
-0.00162	5.92859	0.00002	8.17083	0.00181	4.88932
-0.00161	5.97033	0.00007	8.16863	0.00182	4.85955
-0.00156	6.20021	0.00009	8.16838	0.00186	4.60901
-0.00152	6.34998	0.00013	8.16743	0.00191	4.28449
-0.00150	6.44750	0.00019	8.16452	0.00196	3.92206
-0.00144	6.66925	0.00028	8.15198	0.00201	3.52512
-0.00143	6.69457	0.00030	8.14756	0.00207	3.09374
-0.00138	6.86418	0.00039	8.12051	0.00212	2.64671
-0.00133	7.00964	0.00046	8.09272	0.00218	2.18883
-0.00132	7.03765	0.00046	8.09242	0.00223	1.71592
-0.00125	7.18887	0.00053	8.05878	0.00229	1.23354
-0.00120	7.31299	0.00056	8.04186	0.00233	0.87193
-0.00119	7.34719	0.00058	8.03330	0.00234	0.75970
-0.00115	7.40756	0.00060	8.02263	0.00240	0.33746
-0.00113	7.44319	0.00065	7.98949	0.00245	0.10628
-0.00110	7.48364	0.00071	7.94700	0.00246	0.09786
-0.00108	7.52339	0.00077	7.90083	0.00249	0.05407
-0.00106	7.54895	0.00080	7.86508	0.00254	0.02955
-0.00102	7.61510	0.00082	7.85133	0.00260	0.02074
-0.00100	7.63939	0.00087	7.79703	0.00263	0.01604
-0.00092	7.74436	0.00093	7.73678	0.00266	0.01157
-0.00091	7.75744	0.00098	7.66945	0.00267	0.00883
-0.00084	7.84032	0.00100	7.64186	0.00269	0.00577
-0.00084	7.84331	0.00103	7.59432	0.00270	0.00000
-0.00079	7.88739	0.00109	7.51101		
-0.00074	7.92376	0.00114	7.41788		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-7 ความเร็วตามแนวแกน y ของของไหลภายในแบบจำลองท่อเปล่าหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ระนาบ $x = 0$ และ $z = 0.075$

ระยะแกน y (m)	ความเร็ว (m/s)	ระยะแกน y (m)	ความเร็ว (m/s)
0.0081	0	0.0042	6.8496
0.0077	0	0.0041	6.88439
0.0077	0.0110509	0.0040	6.96724
0.0075	0.428947	0.0039	6.99153
0.0075	0.433182	0.0036	7.11112
0.0073	0.815708	0.0035	7.16809
0.0073	0.824832	0.0034	7.20114
0.0073	0.825547	0.0033	7.22039
0.0073	0.827359	0.0031	7.24878
0.0070	1.49571	0.0028	7.27319
0.0069	1.79968	0.0028	7.27523
0.0068	1.88824	0.0028	7.27601
0.0068	2.10498	0.0027	7.27565
0.0064	3.51274	0.0026	7.27468
0.0063	3.61819	0.0024	7.25789
0.0063	3.63753	0.0024	7.25495
0.0063	3.68432	0.0023	7.2364
0.0063	3.69308	0.0018	7.0886
0.0062	3.88355	0.0018	7.0833
0.0062	3.90292	0.0018	7.00822
0.0062	3.95531	0.0017	6.9281
0.0059	4.49214	0.0016	6.85116
0.0057	4.82434	0.0016	6.80391
0.0057	4.82857	0.0014	6.68148
0.0057	4.89897	0.0013	6.45311
0.0056	4.99244	0.0013	6.35002
0.0052	5.7697	0.0010	5.58745
0.0052	5.80652	0.0009	5.25921
0.0051	5.90905	0.0006	4.02061
0.0051	5.93566	0.0006	3.83961
0.0051	5.98064	0.0005	3.71016
0.0047	6.435	0.0003	2.14547
0.0047	6.46913	0.0001	0.524998
0.0043	6.77283	0.0000	0.084468
0.0043	6.78985	0.0000	0.0789138
0.0042	6.82112	0.0000	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-8 ความเร็วตามแนวแกน y ของของไหลภายในแบบจำลองท่อเปล่าหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ที่ระนาบ $x = 0.0027$ และ $z = 0.075$

ระยะแกน y (m)	ความเร็ว (m/s)	ระยะแกน y(m)	ความเร็ว (m/s)
0.00540	0.00000	0.00240	7.41365
0.00538	0.14799	0.00213	7.38582
0.00536	0.31143	0.00189	7.32202
0.00534	0.49165	0.00168	7.20589
0.00532	0.69003	0.00149	7.02488
0.00529	0.90796	0.00132	6.77475
0.00527	1.14683	0.00116	6.45960
0.00523	1.40793	0.00103	6.08991
0.00520	1.69242	0.00090	5.67963
0.00516	2.00125	0.00079	5.24354
0.00511	2.33499	0.00070	4.79528
0.00506	2.69371	0.00061	4.34638
0.00500	3.07673	0.00053	3.90590
0.00494	3.48241	0.00046	3.48053
0.00487	3.90778	0.00040	3.07490
0.00479	4.34821	0.00034	2.69197
0.00470	4.79698	0.00029	2.33338
0.00461	5.24506	0.00024	1.99979
0.00450	5.68093	0.00020	1.69113
0.00437	6.09095	0.00017	1.40681
0.00424	6.46039	0.00013	1.14589
0.00408	6.77529	0.00011	0.90720
0.00391	7.02521	0.00008	0.68944
0.00372	7.20606	0.00006	0.49122
0.00351	7.32208	0.00004	0.31116
0.00327	7.38583	0.00002	0.14786
0.00300	7.41364	0.00000	0.00000
0.00270	7.42067		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตอนที่ 2 การคำนวณค่าความดันลดตามแนวการไหลที่หน้าตัดวงกลม

ตารางที่ ข ตัวแปรที่เลือกมาใช้คำนวณค่าตัวแปรลดตามแนวการไหล

ค่าความเป็นรูพรุน	ระยะทาง(m)	ความดัน(pascal)
1	0	11.8922
	0.05	4.2739
0.8	0	17.080
	0.05	6.54
0.5	0	36.536
	0.05	14.36

ที่ค่าความเป็นรูพรุนเท่ากับ 1

$$\begin{aligned} \text{ค่าความดันลดตามแนวการไหล } (-\Delta P/\Delta z) &= (4.2739 - 11.8922) / (0.05 - 0) \\ &= 152.36 \text{ pascal/m} \end{aligned}$$

ที่ค่าความเป็นรูพรุนเท่ากับ 0.8

$$\begin{aligned} \text{ค่าความดันลดตามแนวการไหล } (-\Delta P/\Delta z) &= (6.54 - 17.080) / (0.05 - 0) \\ &= 210.795 \text{ pascal/m} \end{aligned}$$

ที่ค่าความเป็นรูพรุนเท่ากับ 0.5

$$\begin{aligned} \text{ค่าความดันลดตามแนวการไหล } (-\Delta P/\Delta z) &= (14.36 - 36.536) / (0.05 - 0) \\ &= 443.466 \text{ pascal/m} \end{aligned}$$

สำหรับที่หน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า และสี่เหลี่ยมจัตุรัสคำนวณด้วยวิธีเช่นเดียวกัน โดยเลือกค่าความดันที่ระยะทางเดียวกัน

ตอนที่ 3 ตัวอย่างการคำนวณความเร็วจากทฤษฎี

ใช้ที่หน้าตัดวงกลม เลือกความเร็วที่ระยะทาง 0.0995 m เนื่องจากเป็นระยะทางที่มีการไหล

ใกล้เคียงการไหลแบบราบเรียบมากที่สุด

จากสมการที่ 2.24

$$v_x = v_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.24)$$

จากตาราง ก-5 ความเร็วสูงสุดที่ $y = 0$ มีค่า 7.669 m/s ท่อมีรัศมี 0.0027 m

ที่ระยะ $y = 0.0026$ ความเร็วหาได้ดังนี้

$$v = 7.669 \times \left(1 - \left(\frac{0.0026}{0.0027} \right)^2 \right) = 0.56 \text{ m/s}$$

ที่รัศมีอื่นๆคำนวณโดยใช้วิธีเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้